

## SADRŽAJ

UVOD	3
1. OPIS LABORATORIJSKE OPREME	5
1.1. Pravila rada u laboratoriju	5
1.2. Mjere zaštite na radu i opasnosti od strujnog udara	6
1.3. Elektronički instrumentarij	8
1.3.1. Analogni osciloskop	8
1.3.1.1. Princip rada analognog osciloskopa	9
1.3.1.2. Mjerenje amplitude osciloskopom	12
1.3.1.3. Mjerenje frekvencije osciloskopom	14
1.3.1.4. Mjerenje faznog pomaka osciloskopom	14
1.3.1.5. Mjerenje karakteristika poluprovodničkih komponenti osciloskopom	15
1.3.1.6. Kalibracija osciloskopa	16
1.3.1.7. Analogni osciloskop Tektronix TAS465 – kratko upustvo	17
1.3.1.8. Analogni osciloskop Hameg HM-504 – kratko upustvo	18
1.3.2. Generator funkcija	19
1.3.3. Unimjer	21
1.3.3.1. Princip rada digitalnih instrumenata	21
1.3.3.2. Mjerenje struje	22
1.3.3.3. Mjerenje napona	22
1.3.3.4. Mjerenje otpora	24
1.3.4. LRC metar	24
1.3.4.1. Mjerenje induktiviteta	24
1.3.4.2. Mjerenje kapaciteta	25
1.3.5. Laboratorijski naponski izvor	26
1.4. Elektronske komponente	27
1.4.1. Tipovi i označavanje elektronskih komponenti	27
1.4.2. Tipovi i označavanje otpora	27
1.4.3. Tipovi i označavanje kondenzatora	29
1.4.4. Tipovi i označavanje dioda	30
1.4.5. Tipovi i označavanje tranzistora	32
1.4.5.1. Hladnjaci	37
1.4.5.2. Primjer analize elektronskih sklopova na bazi tranzistora	39
1.4.6. Kataloške karakteristike komponenti	41
2. CAD	44
2.1. Izrada elektroničkih šema i projektne dokumentacije	44
2.2. Simulacija elektroničkih krugova	44
2.3. Izrada maski za štampane ploče	45
2.4. Priprema za proizvodnju	45
2.5. ACCEL EDA	46
2.6. PROTEL	46
2.7. MULTISIM	47
2.8. Izrada štampane ploče	51
2.9. Lemljenje	51
2.9.1. Ručno lemljenje	51
2.9.2. Mašinsko lemljenje	52
2.10. SMT	52
3. AMPLITUDNO-FREKVENTNE I FAZNO-FREKVENTNE KARAKTERISTIKE	53
4. OPERACIONI POJAČAVAČ	58

4.1 Pakovanje i napajanje OP	59
4.2. Model OP	60
4.2.1. Parametri realnih OP	60
4.2.1.1. Ulazna impedansa	60
4.2.1.2. Naponsko pojačanje pojačala u otvorenom	60
4.2.1.3. Izlazni otpor pojačavača	61
4.2.1.4. Frekventni opseg operacionog pojačavača	61
4.2.1.5. Strujno i naponsko razdešenje	62
4.3. Karakteristični spojevi na bazi OP	63
4.3.1. Komparator	63
4.3.2. Negativna povratna sprega	64
4.3.3. Invertorski spoj	64
4.3.4. Neinvertorski spoj	65
4.3.5. Naponsko sljedilo	66
4.3.6. Spoj za sabiranje	67
4.3.7. Spoj za oduzimanje	68
4.3.8. Diferencijator	68
4.3.9. Integrator	69
4.3.10. Instrumentaciono pojačalo	70
4.3.11. Pozitivna povratna sprega	73
4.3.12. Šmitov triger	73
4.3.13. Astabilni multivibrator	74
4.3.14. Oscilator s Wienovim mostom	78
4.3.15. Sklop za punovalno ispravljanje	79
5. REGULATORI NAPONA	82
5.1. Serijski linearni regulator napona	82
5.2. Paralelni linearni regulator napona	86
5.3. Integrirani linearni naponski regulatori	89
5.3.1. Linearni regulatori napona sa fiksnim izlaznim naponom	89
5.3.2. Linearni regulatori sa promjenjivim izlazom	89
5.3.3. Proširenje strujnog opsega linearnih regulatora	90
6. REALIZACIJA MULTIVIBRATORA NA BAZI DISKRETNIH KOMPONENTI	92
6.1. Astabil, monostabil i bistabil sa bipolarnim tranzistorima	92
6.2. Astabil, monostabil i bistabil sa MOSFET-ovima	94
6.3. Spojevi na bazi NE555	97
6.3.1. Astabilni multivibrator na bazi NE555	97
6.3.2. Monostabilni multivibrator na bazi NE555	98
7. GENERATORI FUNKCIJA	100
7.1. Diodni sintetizator sinusnog napona	101
7.2. Generator pile	105
8. NAPONSKO-STRUJNI I STRUJNO-NAPONSKI KONVERTORI	106
9. ELEKTRONIČKA REALIZACIJA ANALOGNIH REGULATORA	111
9.1. PID regulator	111
9.2. Realizacija PI regulatora za regulaciju brzine vrtnje istosmjernog motora	112
LITERATURA	114

## UVOD

Elektronika je u zadnjih 100 godina prešla vrlo buran i dinamičan put, od elektronskih cijevi, prvih primjena u radiotehnici, tranzistora, integriranih krugova, mikroprocesora, pa do 'sistema na čipu' koji su danas uveliko u upotrebi. Ne treba posebno isticati značaj ovog razvoja kao i sve discipline koje se baziraju na dostignućima elektronike, on je sveprisutan i temelj je civilizacije čiji smo sudionici. Ono što se pojavljuje kao pitanje jeste: 'Kako organizirati nastavni proces u oblasti elektronike pa da studenti efikasno ovladaju potrebnim znanjima koja će ih sresti u njihovoj budućoj praksi?' Bolonjski proces kao opšti trend koji je u toku postavlja pred visokoškolske institucije dva, na prvi pogled međusobno oprečna zahtjeva: prvi – *'pripremiti studenta, u relativno kratkom vremenu, za potrebe industrije'* i drugi – *'pripremiti studenta za cjeloživotno učenje'*. Prvi princip ima akcenat na konkretnim odmah upotrebljivim znanjima, usko orijentiranim praktičnim znanjima, dok drugi princip traži temeljito poznavanje vrlo širokih teorijskih znanja. Ostvarenje oba ova zahtjeva moguće je jedino uz kompletan angažman i studenata i nastavnika. Nijedan program ma gdje se odvijao i ma u kakvim uslovima neće postići željene rezultate ako u njemu student ne učestvuje kompletnim svojim vremenom i aktivnošću. Da bi se to ostvarilo temeljna stvar nastavnog procesa po Bolonji je *'kontinuirano i motivirano učenje'*, jednostavno rečeno studiranje u punom smislu te riječi. U tom kontekstu je zamišljen i program rada na predmetima: 'Praktikum elektronike i elektrotehnike', 'Praktikum automatike i informatike', 'Praktikum elektronike' i 'Praktikum automatike'. Od navedena četiri predmeta koja se nalaze u grupi izbornih predmeta studenti biraju dva, jedan u četvrtom semestru, a drugi u petom semestru. Na ovaj način studentima dajemo mogućnost izbora, tj. opredjeljenja odnosno povećavamo njihovu motiviranost i nudimo im šansu da steknu potrebna znanja koja će moći neposredno primijeniti u inženjerskoj praksi. Da bismo pripremili studenta za cjeloživotno učenje predmeti su koncipirani tako da student već u ovoj fazi samostalno rješava praktične zadatke, koristi najnoviju stručnu literaturu i uči se samostalnosti u radu, a za sve to neophodno je temeljito poznavanje teorijskih predmeta položenih u prethodnom dijelu studija i nekih koji se slušaju paralelno. Želimo dati krila njihovoj kretivosti, motivirati ih za stvaranjem, i istovremeno ih uvesti u mnoge tajne prakticanja koja će ih sresti u praksi. Jasno nam je da sa fondom sati koji nam stoji na raspolaganju, ni izbliza ih nemožemo naučiti svim fenomenima koji se sreću u oblasti elektronike niti je to za bilo koji fond sati moguće. Ali, ako im damo dovoljno znanja da ih učinimo samostalnim u korištenju elektroničke instrumentacije, izradi elektronskih sklopova, korištenju računara za projektiranje, dizajniranje i mjerenje onda smo postigli cilj. Duboko poznavanje tajni u elektronici doći će sa vremenom provedenim u njenom prakticanju. Ali ono što trebaju naučiti jeste kako se tamo kretati i kako se snalaziti u moru informacija koje nam se nude. Za jednostavnije savladavanje navedenog programa urađena je skripta koja će studentima biti na raspolaganju prije početka kursa. Skripta sadrži niz korisnih informacija kao što je opis tehnika rada, opis instrumentacije, kratak prikaz teorijskih fenomena koji će biti obrađivani, opis zadataka, kataloške karakteristike korištenih komponenti itd. Skripta je u osnovi kostur koji će studenti dopunjavati rezultatima vlastitih mjerenja koja će izvoditi, napomenama i iskustvima koja će sresti tokom rada, karakteristikama komponenti koje nisu date u polaznom materijalu, a studentima će biti neophodne u radu i tehničkim prikazom projekta na kome će studenti raditi. Ovaj materijal napredni studenti će moći proširiti razmjenom sa kolegama jer će značajan broj zadataka koje studenti budu radili biti različit. Na ovaj način studenti će imati solidan materijal koji će moći koristiti kako tokom studija tako i kasnije u inženjerskoj praksi.

Na kursu 'Praktikum elektronike i elektrotehnike' studenti izvode praktičnu nastavu organiziranu kroz tri nivoa edukacije:

- Vođene laboratorijske vježbe 6 puta po 3 sata.
- Samostalni pojedinačni rad studenta na zadate teme 7 puta po 3 sata.
- Timski rad na zadatu temu.

U toku semetra organizuje se 6 vođenih laboratorijskih vježbi u ukupnom trajanju od 18 školskih sati kada studenti pod vođstvom asistenta rješavaju pojedine praktične zadatke. Ova faza ima za cilj da studente nauči ispravnom korištenju instrumentacije, komponentama, pisanju izvještaja, obradi rezultata, itd. Studenti za svaku vježbu pišu izvještaj koji se ocjenjuje kao domaća zadaća.

Za samostalan rad studenata predviđen je 21 školski sat. Na ovim satima studenti rješavaju postavljene zadatke. Izrada zadataka izvodi se u tri dijela: pripremni, izvedbeni i pisanje izvještaja. U pripremnom dijelu student analitički rješava problem, formira elektičnu šemu ako se to traži, izvrši simulaciju rada sklopa na računaru i sa takvom pripremom dolazi u laboratoriju. Za vrijeme izvedbene faze student samostalno realizira traženi sklop, izvrši zahtjevana mjerenja, te snimi rezultate. Po osnovu dobivenih rezultata i načinjene pripreme student pravi izještaj koji ima formu zadaće i ocjenjuje se. Za izvedbenu fazu po svakoj vježbi studentu stoje na raspolaganju tri sata. Ukoliko za navedeno vrijeme student ne dobije odgovarajuće rezultate ovo vrijeme se može produžiti, odnosno student dobija rezervni termin. Student takođe ponavlja vježbu za koju nastavnik ustanovi po pregledu izvještaja da nije korektno odrađena. Izvještaj sa prethodne vježbe se predaje na početku slijedeće vježbe.

U fazi timskog rada studenti će dobiti složenije zadatke koje sami rješavaju. Zadataka ima više i studenti se dijele u grupe od 3 do 5 studenata po grupi. Podjela zadataka i formiranje grupa se izvodi na kraju 7 sedmice semestra. Studenti samostalno analiziraju postavljeni zadatak i donose okvirni plana rada. Okvirni plan rada treba da sadrži: kratak opis ideje rješavanja problema, podjelu zadataka unutar grupe, izbor vođe grupe, vremenski plan, potencijalno potrebni materijal (komponente). Za rješavanje postavljenog zadatka studenti mogu koristiti sve komponente koje su na raspolaganju u laboratoriju ili komponente koje će sami obezbijediti. Poslije podjele zadataka jednom sedmično održava se sat konsultacija svake grupe sa asistentom. Na tom satu vođe grupa podnose izvještaj o odvijanju projekta, iznose probleme i predlažu rješenja. Zadatak se mora završiti u potpunosti za 6 sedmica. Po završetku zadatka studenti predaju nastavniku izvještaj prije polaganja drugog parcijalnog ispita. Odbrana zadataka se izvodi poslije uspješno položenih parcijalnih ispita i ima formu usmenog ispita. Tom prilikom svi studenti jedne grupe treba podjednako da uzmu učešća u prezentiranju svoga rada. Prezentacija radova se izvodi u sali uz prisustvo svih studenata sa godine.

Za rješavanje praktičnog zadatka studentima stoji na raspolaganju laboratorija najmanje tri sata sedmično po rasporedu koji se unaprijed utvrdi (ukupno 18 sati).

## 1. OPIS LABORATORIJSKE OPREME

### 1.1. Pravila rada u laboratoriju

Laboratorija za Elektroniku LE2 je opremljena sa 10 radnih mjesta namijenjenih za pojedinačan rad studenata. Svako radno mjesto je opremljeno sa:

1. Dvokanalnim osciloskopom 50/100MHz,
2. Generatorom funkcija 2MHz,
3. Naponskim izvorom 2x(0-16V), 2A i 1x5V 5A ili 2x(0-20V), 0.5A i 1x5V, 2A;
4. Lemilo marke Weler 60W,
5. Unimjer 1 komad,
6. Matador za lemljenje,
7. Matador za spajanje,
8. Tri sonde za osciloskop i generator funkcija,
9. Spojne kablove sa bananama za napajanje 6 kom.

Prilikom rada u laboratoriju studenti su dužni pridržavati se slijedećih pravila:

- Svaki student tokom rada u laboratoriju za vrijeme jednog kursa radi na jednom istom radnom mjestu.
- Prije početka svake vježbe student je dužan provjeriti kompletnost i ispravnost opreme prema gornjem spisku te sve uočene nedostatke prijaviti asistentu.
- Nije dozvoljeno korištenje opreme sa susjednih stolova niti iznošenje opreme iz laboratorije.
- Na kraju svake vježbe student je dužan ostaviti uredno radno mjesto sa isključenim svim uređajima sa napajanja.
- Elektronički materijal je složen u ormariće (otpornici, kondenzatori, tranzistori) prema vrsti i rasporedu naznačenom na ladicama. Studenti za pojedinu vježbu uzimaju materijal iz ormarića i isti vraćaju na isto mjesto u ormariće na kraju vježbe.
- Materijal koji se lemi se odlaže u posebne ormariće u odnosu na onaj koji se ne lemi.
- Ostale komponente potrebne za vježbu studenti će dobiti na početku vježbe i njih vraćaju na kraju vježbe.
- Za vrijeme rada u laboratoriju nije dozvoljeno međusobno komuniciranje studenata, telefoniranje, pušenje, pijeње kafe ili sokova niti neka druga aktivnost koja može poremetiti rad.
- Sve nejasnoće u radu student rješava u komunikaciji sa asistentom.
- Za jednim radnim mjestom može raditi samo jedan student.

Pored navedene laboratorijske opreme u laboratoriju se nalazi i slijedeća oprema:

- Dvostarna UV lampa,
- Strujna kliješta,
- Generator funkcija 10MHz,
- Precizni unimjer,
- RLC metar,
- Mikrokordinatna bušilica,
- Elektronički sitni alat,
- Mini frezer.

Ovo je dodatna oprema i ona se koristi uz standardnu opremu za realizaciju timskih zadataka uz prethodnu najavu asistentu.

## 1.2. Mjere zaštite na radu i opasnosti od strujnog udara

Rad u naponskom okruženju 220/380V nosi određene rizike za radno osoblje. Takvo okruženje je naša cjeloživotna stvarnost u laboratoriji, kući, na radnom mjestu. Stoga treba ovome pitanju posvetiti posebnu pažnju. Dolazak čovjeka u dodir sa naponom pri čemu se čovjek nalazi u konturi preko koje se zatvara strujni krug uvijek je praćen proticanjem struje kroz čovječje tijelo. U ovisnosti od jačine struje posljedice za čovjeka mogu biti različite: od blagog peckanja do smrtnog ishoda. Tabela 1 pokazuje moguće djelovanje struje na čovječji organizam u ovisnosti od intenziteta. To djelovanje zavisi od okolnosti kao što je kontaktni napon, te otpora tijela tako da su podaci orijentacioni.

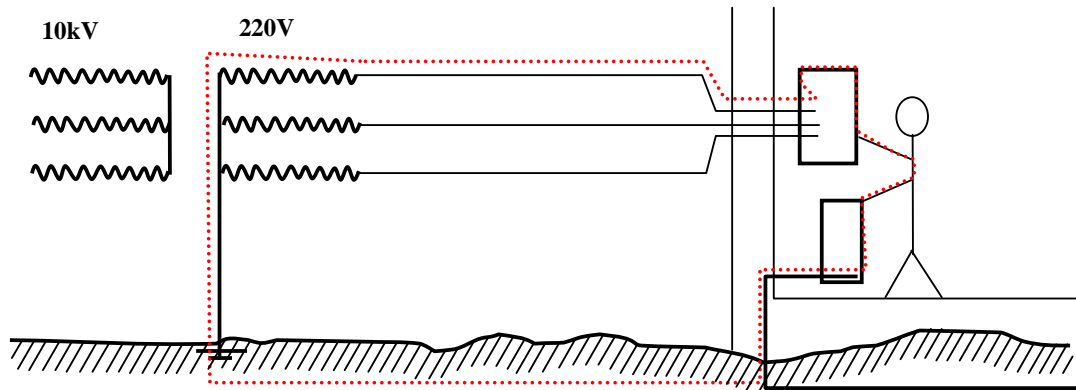
Tabela 1. Uticaj struje na čovjeka

Jačina struje	Djelovanje
$I < 1\text{mA}$	Stuja se ne osjeti
$1\text{mA} < I < 30\text{mA}$	Struja se vrlo slabo osjeti
$I > 30\text{mA}$	Osjeća se bol

Ukoliko struja veća od 50 mA djeluje duže na čovjeka može nastupiti kočenje mišića, zatim smrt i onda ugljenisanje tijela. Zato je vrlo važno obezbijediti da prilikom rada ne dođe do zatvaranja strujne konture preko dijelova tijela, a ako do toga slučajno dođe da to traje što kraće. Znači, neophodno je pružanje pomoći unesrećenom što prije. Pomoć se sastoji u: izoliranju unesrećenog od naponskog izvora, razelektrisanju tijela, masaži i vještačkom disanju ako je došlo do grčenja mišića i prestanka rada srca, pozivanju stručne ljekarske pomoći. Da do ovakvih situacija nebi došlo potrebno je pridržavati se određenih pravila u radu u naponskom okruženju 220V/380V.

- Nikada ne treba dirati neizolirane električne vodiče pod naponom.
- Bilo kakav rad na neizoliranim električnim instalacijama podrazumijeva prethodno isključenje instalacija sa mreže, čak i kada se to uradi uvijek se provjeri ispitivačem prisustvo napona na instalacijama.
- Studentima je strogo zabranjeno bilo kakvo eksperimentisanje, mjerenje, ili sl. na strani napona 220V.
- Ako pojedina vježba podrazumijeva rad sa potrošačima na strani 220V onda se ista izvodi pod strogom kontrolom asistenta i sve manipulacije na strani visokog napona (povezivanje, mjerenje) izvodi asistent.
- Sav laboratorijski instrumentarij se napaja iz mreže 220V i student može samostalno koristiti se samo naponskim izvorima na strani niskog napona <48V.
- Bilo kakvo oštećenje napojnih kablova koji povezuju instrumentarij i mrežu 220V treba odmah prijaviti asistentu.

Da bi studenti stekli predstavu o izvorima opasnosti i mjerama za njihovo minimiziranje opisaćemo uobičajene mjere zaštite. Te mjere se prije svega odnose na pravilno izvedene instalacije na radnom mjestu i u stanu. Druga važna stvar je korištenje propisanih osigurača. Najveću opasnost predstavlja postojanje napona 220V na vodiču koji predstavlja fazu. Dovodna električna mreža 220V/380V je uvijek kruto uzemljena u lokalnoj trafostanici. Većina naših instalacija (grijanje, voda itd) imaju direktan kontakt sa zemljom ili preko nekih malih otpora. Diranje dijelom tijela faze pri čemu je drugi dio tijela u kontaktu sa nekim od instalacija spojenih na zemlju dovodi do direktnog zatvaranja strujnog kruga preko tijela (slika1).



Slika 1. Zatvaranje strujne konture preko tijela čovjeka

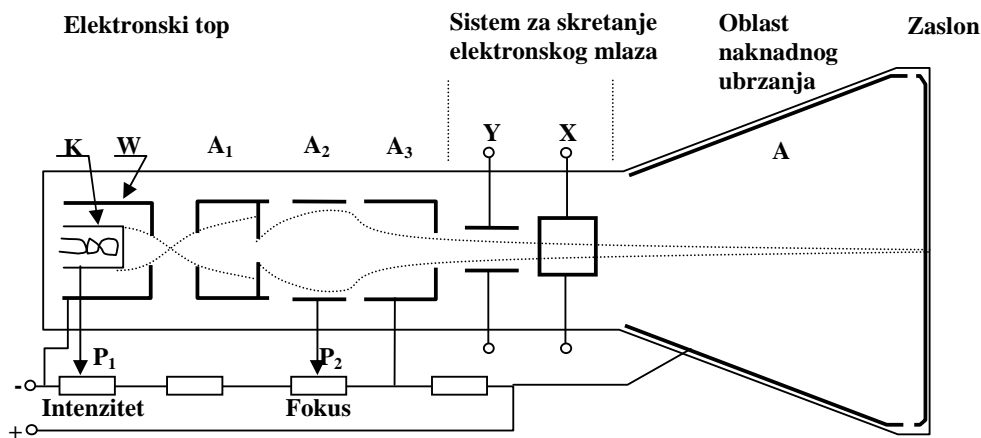
Dolazak u kontakt čovjeka i faze najčešće dolazi zbog oštećenja napojnih vodova kada ogoljeli dio faze može biti u kontaktu sa metalnim dijelom aparata. Ukoliko instalacije nisu pravilno izvedene ovakvu grešku aparat ne 'primjećuje' te normalno funkcioniše što i jeste najveća opasnost. Osoblje nema informaciju da ima problem. Sjetite se da ste bar jedanput čuli nekog u komšiluku kako se žali da ga električna peć 'ponekad pecka'. To je zato što instalacije nisu korektne, a faza povremeno dolazi u kontakt sa metalnim kućištem aparata. Sve do jednom. Da se to nebi desilo uveden je propis obaveznog uzemljena metalnih dijelova kućanskih aparata. To se izvodi preko trećeg vodiča u utičnicama (šuko utičnice) koji se uzemljuje. Uzemljenje može biti izvedeno lokalno ili koristiti uzemljeni četvrti vodič gradske mreže koji je uzemljen u lokalnoj trafostanici (nulovanje). Šta se desi kada je mreža pravilno urađena i kućišta aparata su uzemljena, a faza dođe u kontakt sa metalnim dijelom aparata? Nastupi kratki spoj na koji reaguje osigurač. Znači reagovanje osigurača učiniće dvije korisane stvari: isključiće naponski izvor sa oštećenog aparata i signaliziraće osoblju da imamo problem. Rješavanje ovakvih problema ne treba se svesti na prostu zamjenu osigurača. Treba prvo pregledati aparat koji je izazvao kratak spoj pa tek onda zamjeniti osigurač. Osigurač se uvijek mora mijenjati originalnim patronima predviđenim za to mjesto, a nikako nadomjestiti pregorjelu nit osigurača bakarnom žicom ili ekserom. Ukoliko je instalacija ispravno izvedena a imamo neadekvatne osigurače opet imamo potencijalne probleme.

### 1.3. Elektronički instrumentarij

Za efikasan rad u oblasti elektronike od posebne je važnosti poznavati tehnologiju korištenja elektroničke instrumentacije. Da bi se ista ispravno koristila treba dobro poznavati teorijske osnove mjerenja, mjernih metoda i principe rada pojedinih instrumenata, pa tek onda na bazi ovih znanja upoznati način korištenja konkretne instrumentacije. Teorijske osnove rada elektroničke instrumentacije studenti detaljno obrađuju u sklopu predmeta Električna mjerenja i ovdje nećemo ulaziti u te detalje. Zato ćemo dati samo kratki osvrt na principe rada, te detaljno dati uputstva za korištenje konkretne instrumentacije koju će studenti koristiti u toku rada na ovom kursu. Upoznaćemo način korištenja: analognog osciloskopa, generatora funkcija, unimjera, LRC metra, strujnih klijesta, laboratorijskog naponskog izvora.

#### 1.3.1. Analogni osciloskop

Analogni osciloskop koristi katodnu cijev kao svoj najvažniji dio pa ćemo zato ukratko dati prikaz katodne cijevi. U savremenim osciloskopima koristi se katodna cijev sa indirektno grijanom katodom, elektrostatičkim fokusiranjem elektronskog mlaza i elektrostatičkim skretanjem elektronskog mlaza. Osnovni dijelovi jedne katodne cijevi su: elektronski top, sistem za skretanje elektronskog mlaza, oblast naknadnog ubrzanja elektronskog mlaza i fluorescentni zaslon (slika 2). Svi elementi katodne cijevi smješteni su u jednu cilindričnu staklenu cijev iz koje je izvučen vazduh.



Slika 2. Katodna cijev

Elektronski top ima funkciju izvora uskog snopa ubrzanih elektrona. Sastoji se iz indirektno grijane katode K, Veneltovog cilindra W, te anoda A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub> i A<sub>3</sub>. Indirektno grijana katoda je sačinjena od niklovanog cilindra sa posebnim okruglim udubljenjem duž ose cijevi u kome je nanesen sloj materijala koji pri zagrijavanju emituje elektrone. Pošto je izvor elektrona svojom konstrukcijom okrugao i malog presjeka, elektronski snop će u svom nastajanju biti malog presjeka. Katoda je potpuno obavijena cilindrom od nikla koji ima mali otvor na osi prema katodi. Ovaj cilindar se zove Veneltov i nalazi se na negativnom potencijalu (-20 do -70V) u odnosu na katodu, tako da ovaj negativni potencijal još više sužava snop elektrona. Ovaj negativni potencijal može da se mijenja potenciometrom na prednjoj ploči osciloskopa označenim kao 'intenzitet', tako da možemo mijenjati struju elektrona koju daje izvor (katoda).



Pri određenom iznosu ovog napona može u potpunosti da se zaustavi prolazak elektrona na zaslon. Anode  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  i potencijometar  $P_2$  se koriste za fokusiranje snopa elektrona. Elektroni iz Veneltovog cilindra izlaze zato što ih privlači visoki napon koji se preko anoda  $A_1, A_2, A_3$  i  $A$  povećava na putu elektrona prema zaslonu katodne cijevi. Ovaj napon iznosi nekoliko kV. Ako bi se elektroni prepustili samo djelovanju ovog napona zbog međusobnog djelovanja elektrona jednih na druge snop bi se na putu do zaslona prilično raspršio. Zato se koristi sistem za fokusiranje koga čine anode  $A_1$ ,  $A_2$ , i  $A_3$ . Anode su smještene jedna za drugom na putu prolaska elektrona. Svojim električnim poljem one vrše ubrzavanje elektronskog mlaza i njegovo fokusiranje. Fokusiranje se podešava potencijetrom  $P_2$  kojim se mijenja potencijal elektrode  $A_2$  u odnosu na  $A_1$  i  $A_3$  koje su na fiksnom potencijalu. Promjena ovog potencijala ima isti efekat kao promjena geometrije kod sočiva pri prolasku svjetlosti tako da se snop elektrona može fokusirati. Potencijometar  $P_2$  je postavljen na prednjoj ploči osciloskopa i označen sa 'fokus'. X otklonski i Y otklonski sistem predstavljaju sisteme kondenzatora čiji promjenjivi napon djeluje svojim elektrostatskim poljem na elektronski mlaz tako da vrše njegovo skretanje po horizontalnoj (X sistem) i vertikalnoj (Y sistem) osi. Rezultat toga djelovanja biće padanje snopa elektrona na neku od tačaka u X,Y ravni displeja proporcionalno vrijednostima napona na X i Y otklonskom sistemu. Ako se naponi na X otklonskom sistemu i Y otklonskom sistemu mijenjaju u vremenu po zakonima:  $X(t)$  i  $Y(t)$  tada će pozicija tačke na zaslonu biti vremenski ovisna i određena ovim funkcijama, odnosno  $F(X(t), Y(t))=0$ .

Na primjer neka se na X otklonski sistem dovodi sinusni signal amplitude 5V i frekvencije 300Hz, a na Y otklonski sistem sinusni signal amplitude 3V i frekvencije 300Hz, pri čemu je fazni pomak među signalima nula. Tada su  $X(t)$  i  $Y(t)$  date sa:  $X(t) = 5 \sin(1884t)$ ,  $Y(t) = 3 \sin(1884t)$ , iz kojih se jednostavnom računicom dobija

$$F(X(t), Y(t)) = 5Y(t) - 3X(t) = 0, \text{ odnosno: } Y = \frac{3}{5}X, |X| \leq 5, |Y| \leq 3. \text{ Kao što se vidi dobili}$$

smo duž omeđenu kordinatama:  $((-5,-3);(5,3))$ . Ovaj primjer daje prikaz jedne funkcije u ovisnosti od druge poznat kao XY prikaz. Ako želimo da posmatramo signal u ovisnosti od vremena  $Y(t)$  onda na X otklonski sistem dovodimo signal koji je proporcionalan vremenu, odnosno funkcija  $X(t)$  ima oblik  $X(t) = kt$ . Konstanta  $k$  se može mijenjati i prilagođavati karakteristikama signala  $Y(t)$ . Sada funkcija  $F(X(t), Y(t))=0$  ima oblik:

$$F(X(t), Y(t)) = Y\left(\frac{X}{k}\right) = 0, \text{ odnosno na ekranu će biti funkcija koja predstavlja signal doveden}$$

na Y otklonski sistem skaliran po vremenu za  $k$ . Pošto konstantu  $k$  mi postavljamo (razmjera po vremenskoj skali), mi na displeju možemo pročitati ulazni signal kao funkciju vremena.

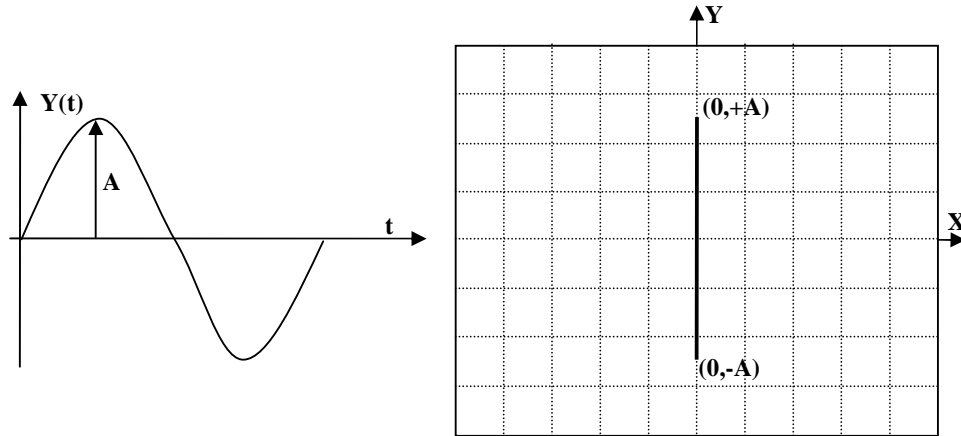
Zaslon katodne cijevi je izgrađen od luminiscentnog materijala. Luminiscentni materijali imaju osobinu da pod djelovanjem kinetičke energije upadnih elektrona emituju svjetlost. Luminiscentni materijal se bira tako da emitirana svjetlost bude smještena u vidljivom dijelu spektra tako da se mjesto gdje padaju elektroni 'vidi', tj. ponaša se kao svjetlosni izvor. Ova svjetlost se emituje za vrijeme dok elektroni padaju na zaslon (fluorescencija) kao i neposredno nakon prestanka djelovanja svjetlosnog snopa (fosforescencija).

### 1.3.1.1. Princip rada analognog osciloskopa

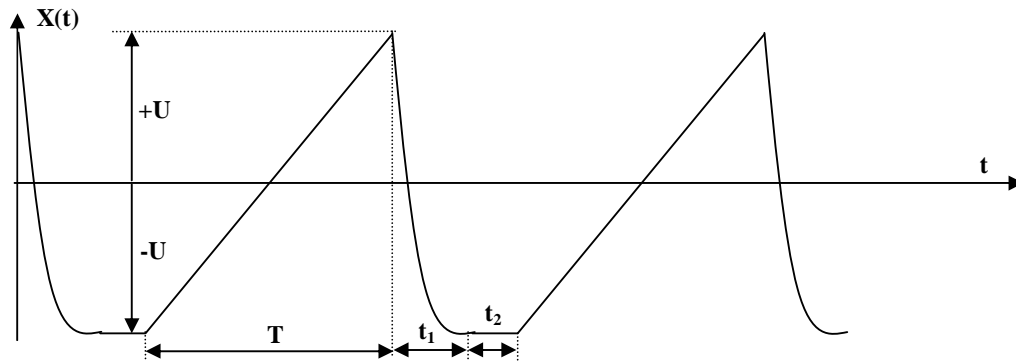
Svaki analogni osciloskop ima tri osnovna dijela koji omogućuju prikaz signala koga gledamo. To su:

- X-otklonski sistem ili vremenska baza,
- Y-otklonski sistem,
- triggerski sistem.

Na sva tri navedena sistema možemo dovoditi signal sa vanjskog izvora dok X otkloni sistem (vremenska baza) i trigerski sistem, obično, koriste interne izvore. Obično, osciloskopom posmatramo vremenski promjenjive signale i to periodične signale. U tom slučaju na Y otkloni sistem dovodimo naponski signal koji posmatramo, a X otkloni sistem služi kao vremenska baza. Pretpostavimo da na ulaz dovodimo sinusni signal amplitude  $A$  i frekvencije  $f$ . Ako koristimo XY prikaz a na X ulaz nismo doveli nikakav signal odnosno  $X(t)=0$  prikaz na osciloskopu će biti vertikalna duž od tačke  $(0,-A)$  do tačke  $(0,+A)$  (slika 3).

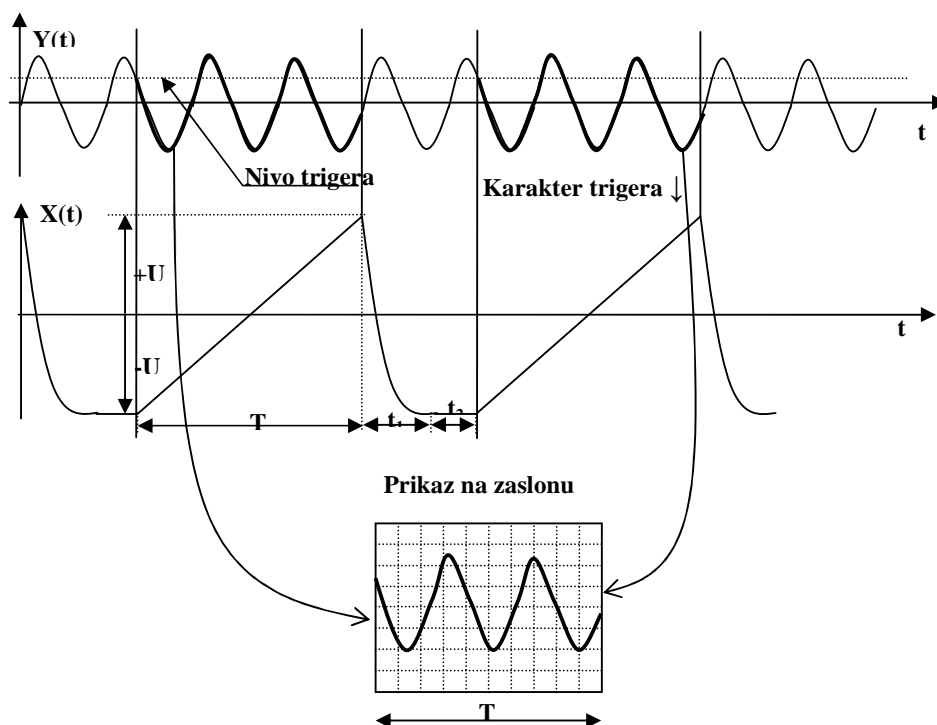
Slika 3. Prikaz sinusnog signala na Y-otklonskom sistemu ( $X(t)=0$ )

Generator vremenske baze koji se koristi kao interni izvor signala za X otkloni sistem ima signal oblika kao na slici 4. To je u osnovi linearni signal kojim upravlja generator linearnog napona i triger. Generator vremenske baze daje signal koji se linearno mijenja od  $-U$  do  $+U$  za vrijeme  $T$ , zatim se signal brzo vraća u tačku  $-U$  po eksponencijalnom zakonu za vrijeme  $t_1$  znatno kraće od vremena  $T$ , poslije toga za vrijeme  $t_2$  signal ima vrijednost  $-U$ . Triger starta početak linearnog dijela signala. Vrijeme  $T$  mi biramo izborom razmjere po vremenskoj skali. Za vrijeme koje izaberemo tačka koju ispisuje elektronski mlaz kreće se od krajnjeg lijevog položaja na zaslonu, do krajnjeg desnog položaja na zaslonu. Poslije toga za vrijeme  $t_1$  koje je vrlo kratko i koje je konstantno, elektronski mlaz se vraća sa krajnjeg desnog položaja u početni položaj. Da se ovaj trag nebi vidio za ovo vrijeme na Veneltov cilindar se dovodi negativni napon takvog intenziteta da elektroni uopšte ne napuštaju izvor, te samim tim ne padaju na zaslon. Vrijeme  $t_2$  je varijabilno i njega definiše trigerski sistem. Naime, trigerski sistem se brine da se ispisivanje signala na zaslonu obavlja tako da poslije jednog prolaska zrake preko zaslona naredni prolazak ide po istoj putanji, u protivnom na zaslonu bismo vidjeli grupu ispepljenih linija i ne bismo mogli vršiti mjerenje.



Slika 4. Signal vremenske baze

Trigerski sistem radi tako što ispis signala (on upravlja startanjem linearnog dijela vremenske baze) počinje u tački čiju amplitudu i karakter (raste ili opada) mi biramo preko tipki na prednjoj ploči osciloskopa. Vrijeme  $t_2$  traje od isteka vremena  $t_1$  do nailaska vrijednosti na ulaznom signalu čiji parametri su postavljeni na triggerskom sistemu (slika 5). Kao što se sa slike 5 vidi, ulazni signal je periodičan i mi na zaslonu vidimo samo jedan njegov dio. Taj dio ne mora da bude period niti cio broj perioda. To zavisi od toga šta mjerimo. Dobro je na displeju imati više od jednog perioda signala, ali ne previše jer je tada očitavanje loše. Taj dio koji se vidi ispisuje se uzastopnim prolazcima elektronskog mlaza po istoj trajektoriji na zaslonu. Ako je broj ovih prolazaka veliki (veći od 25 u sekundi) tromost oka kao i fosforescencija učiniće da umjesto samo tačke koja u stvarnosti prelazi zaslonom mi vidimo trag u obliku linije na dvodimenzionalnoj ravni zaslona. Ovo pravi problema kod mjerenja osciloskopom sporopromjenjivih signala, čije su frekvencije manje od 25Hz. Za to se može koristiti osciloskop sa pamćenjem ili digitalni osciloskop koji je danas dosta u upotrebi. Kod posmatranja signala sa većim frekvencijama od 25Hz prikaz na osciloskopu je utoliko mirniji što je frekvencija veća. Postoji gornje ograničenje po frekvenciji mjerenja osciloskopom koje je posljedica njegove konstrukcije i proizvođači daju taj podatak. Osciloskop je utoliko kvalitetniji što je ova gornja granična frekvencija signala koji se može mjeriti veća. Danas su to uglavnom frekvencije: 20MHz, 30MHz, 50MHz ili 100MHz.

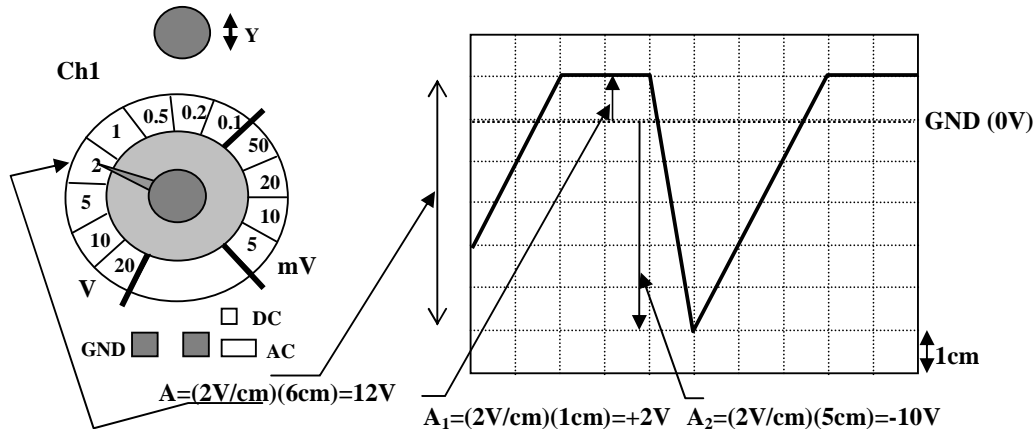


Slika 5. Princip djelovanja triggerskog sistema

Parametre trigera postavlja korisnik koristeći dugmad i potencioetre na prednjoj strani osciloskopa. Kod postavljanja parametara trigera postavljaju se: amplituda, karakter, izvor, mod. Za mod birajte '*normal*'. Za izvor birajte '*interni*' i to CH<sub>1</sub> ili CH<sub>2</sub>. Izabrani kanal mora imati prisutan signal na ulazu, različit od nule. Karakter može biti rastući ili opadajući. Amplituda se bira od  $+U_t$  do  $-U_t$  kontinualno, pri čemu je važno da odabrani ulazni kanal ima amplitudu signala veću od odabrane amplitude na trigeru. Odabrani kanal za trigerovanje mora imati spoenu svoju masu sa masom izvora signala, dok onaj drugi kanal ne mora.

## 1.3.1.2. Mjerenje amplitude osciloskopom

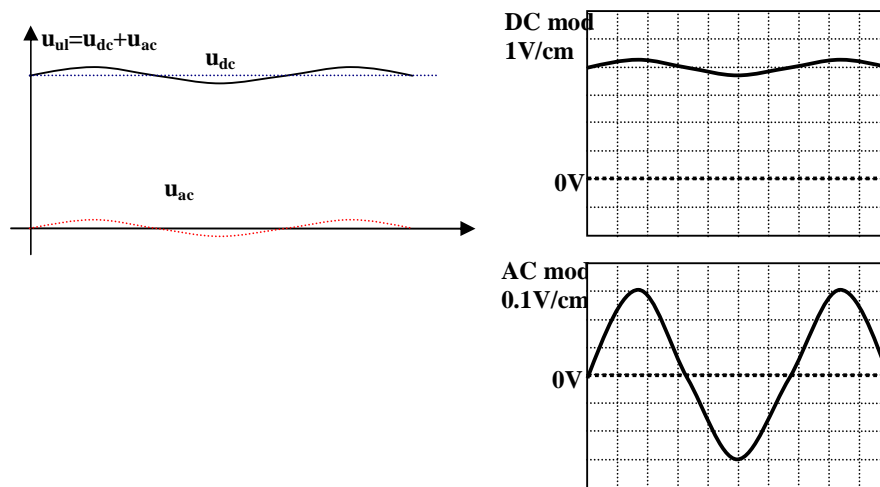
Osciloskop pokazuje trenutne vrijednosti naponskog signala dovedenog na ulaz (Y otklonski sistem) kao funkcije vremena. Sa dijagrama koji imamo na zaslonu vršimo očitavanje koristeći razmjeru koju smo odabrali po vertikalnoj osi. Ako je ulazni signal prevelik (te bi trajektorija izašla iz vidljive ravni zaslona) ili premalen (odnosno amplituda je tako mala da bi mjerenje bilo loše) imamo mogućnost da pojačavamo ili slabimo signal prije njegovog dovođenja na vertikalni otklonski sistem. Sa stanovišta mjerenja mi definiramo razmjeru prikaza na zaslonu u odnosu na stvarnu vrijednost signala. Razmjera se daje u V/cm. Sada se očitavanje amplitude svodi na mjerenje rastojanja na zaslonu izraženo u cm i množenjem aktivnom razmjerom.



Slika 6. Mjerenje amplitude osciloskopom

Signali koje mjerimo mogu biti istosmjerni, izmjenični, unipolarni, bipolarni, itd. Trebamo imati mogućnost mjerenja kako apsolutnih iznosa amplituda tako i njihovih vrijednosti u odnosu na neku referentnu vrijednost. Ta referentna vrijednost se, obično, uzima kao nula i zove se MASA (GND-ground). Iako engleski termin GND asocira na uzemljenje, termin MASA ima posebno značenje. Pod terminom masa podrazumjevamo referentnu tačku na električnoj šemi u odnosu na koju tretiramo ostale tačke po potencijalu. Potencijal mase se uzima kao nula, ali on ne mora da bude na potencijalu zemlje niti na bilo koji način uzemljen (iako može). Kod dovođenja signala na ulaz osciloskopa mjernom sondom, masu sonde spajamo na šemi ili izvoru signala na tačku koju tretiramo kao masu. Ovdje treba voditi računa da je preko instalacija 220V kojima se napaja osciloskop, masa sonde spojena na uzemljenje naponske mreže, to isto vrijedi za generator funkcija te sve mase ovih uređaja uvijek treba spajati na istu tačku na šemi. Pošto mi imamo mogućnost da potenciometrom za vertikalni otklon pomjeramo signal po vertikalnoj osi zaslona onda prije mjerenja uvijek treba prvo usvojiti liniju MASA na zaslonu. To radimo tako što aktiviramo GND dugme za dati kanal, čime kratko spajamo ulaze sonde osciloskopa za taj kanal. Na zaslonu osciloskopa ćemo dobiti ravnu liniju te sada potenciometrom za vertikalno pomjeranje postavimo masu na liniju koju želimo. Poslije toga deaktiviramo GND i aktiviramo DC i na zaslonu će se pojaviti ulazni signal. Sada su sve vrijednosti ulaznog signala smještene iznad usvojene linije MASA na plus potencijalu, a vrijednosti ispod ove linije su na minus potencijalu. Pored GND moda po ulaznom kanalu imamo mogućnost izbora DC ili AC. Ovo često unosi zabunu kod mjerenja jer termini asociraju na istosmjerne (DC) i izmjenične (AC) signale, pa studenti imaju prestavu da sa DC modom mjere istosmjerne, a sa AC mjere izmjenične signale. Ova interpretacija je pogrešna i zato ćemo to detaljno objasniti. Ulazni signal u opštem slučaju ima slijedeći analitički oblik:  $u_{ul} = u_{dc} + u_{ac}$ . Ovdje je  $u_{dc}$  istosmjerna komponenta ulaznog signala a  $u_{ac}$  izmjenična komponenta ulaznog signala (slika 7). Kako mjerimo ovakav signal? Prvo sa

DC modom pogledamo kompletan signal (znači, DC mod tretira cijeli signal, a ne samo istosmjerne signale ili istosmjernu komponentu signala). Vidi se da nemožemo dobro očitati amplitudu izmjenične komponente signala, jer je mala u odnosu na istosmjernu, te bi povećanje razmjere izbacilo prikaz signala izvan vidljivog dijela zaslona, tako da ovdje očitamo samo amplitudu istosmjerne komponente i snimamo oblik signala. Sada aktiviramo AC mod te povećanjem razmjere uvećamo izmjenični dio signala i očitamo amplitudu izmjenične komponente. Znači, AC mod prikazuje samo izmjenični dio signala. Kod snimanja dc i ac komponente masu na zaslonu postavljamo neovisno, cilj je dobiti što bolju razmjernu signala na zaslonu.



Slika 7. DC i AC mod rada

Iz razmatranog proizilazi zaključak da sa DC modom tretiramo kompletne signale, a sa AC modom gledamo samo izmjenični dio signala i to onda kada je amplituda izmjenične komponente signala  $u_{ac}$  znatno manja od istosmjerne komponente signala  $u_{dc}$ .

Osciloskopi obično imaju dva kanala (nekad i 4). Istovremeni prikaz oba kanala na jednom zaslonu može se obaviti korištenjem katodne cijevi sa dva neovisna elektronska mlaza ili korištenjem elektronskog komutatora. Pošto je varijanta sa elektronskim komutatorom jednostavnija i jeftinija pa samim time i prisutnija u praksi, objasniti ćemo ovaj princip. Dvokanalni osciloskop ima dva ulaza označena kao CH<sub>1</sub> i CH<sub>2</sub>. Ako se koristi XY mod onda je jedan od ovih ulaza signal koji upravlja Y otklonskim sistemom (CH<sub>1</sub>), a drugi upravlja X otklonskim sistemom (CH<sub>2</sub>). Na osciloskopu je prisutna jedna trajektorija koju opisuje kombinirano djelovanje ova dva ulazna kanala. Kada koristimo vremensko prikazivanje signala onda na jedan kanal dovodimo jedan signal koji gledamo a na drugi kanal drugi signal. Ova dva signala će biti predstavljena na zaslonu sa zajedničkom vremenskom bazom koju formira sam osciloskop, tako da je moguće vremensko poređenje dva signala (vremenska osa je ista). Za trigerovanje možemo odabrati jedan ili drugi kanal i u pravilu se bira onaj kanal na koji dovodimo poznati signal, recimo sa generatora funkcija. Izuzetak čini pojačavanje signala kada je zbog male amplitude ulaznog signala sa generatora funkcija za trigerovanje bolje odabrati izlaz iz pojačavača.

Princip elektronskog komutatora je vrlo jednostavan. Poseban elektronski sklop (elektronski komutator) vrši prebacivanje ulaza u Y otklonski sistem sa jednog na drugi kanal. Ovo se može izvoditi na dva načina:

- ALT modom, kada je na ulazu Y otklonskog sistema prisutan signal sa jednog kanala cijeli jedan prolaz zrake preko zaslona, a u sljedećem prolazu se pušta drugi kanal i tako naizmjenično.

- CHOP modom, kada se prebacivanje izvodi za vrijeme mnogo kraće od trajanja jednog perioda vremenske baze tako da se nekoliko hiljada puta za vrijeme jednog prolaza ispisuje naizmjenično jedan pa drugi signal.

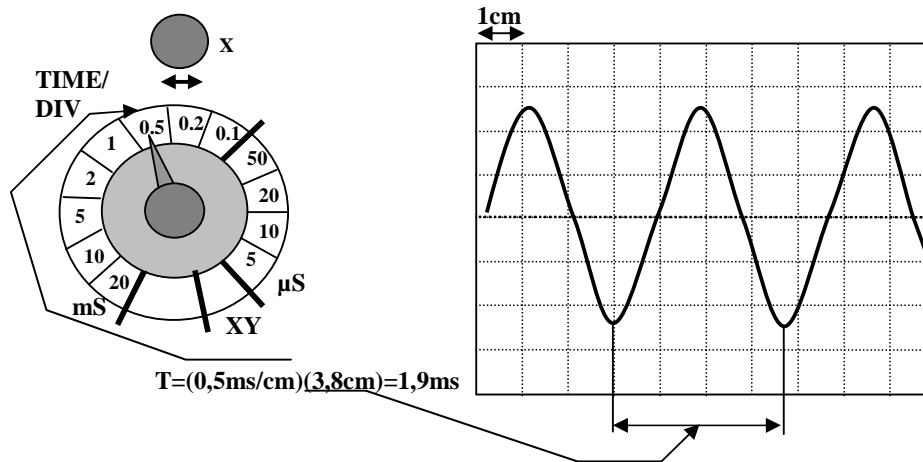
Izbor ALT ili CHOP mod vrši korisnik tipkama na prednjoj ploči osciloskopa. Zbog velike frekvencije prebacivanja oba moda daju mirnu sliku na zaslonu i osjećaj kontinuiteta.

### 1.3.1.3. Mjerenje frekvencije osciloskopom

Mjerenje frekvencije se svodi na mjerenje perioda signala i korištenje poznatog obrasca:

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

Za mjerenje perioda postavimo signal tako da neka referentna tačka na signalu bude na jednoj od vertikalnih linija (pomjeramo signal po horizontali sa X potencijetrom), zatim od te tačke mjerimo rastojanje izraženo u cm do kraja perioda signala. Poslije toga izmjereno rastojanje množimo sa odabranom razmjerom po vremenskoj skali (slika 8).



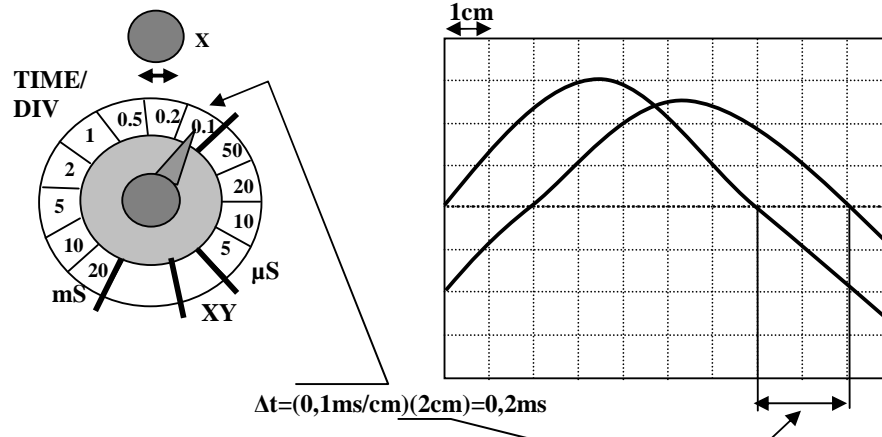
Slika 8. Mjerenje perioda signala

### 1.3.1.4. Mjerenje faznog pomaka osciloskopom

Mjerenje faznog pomaka osciloskopom se izvodi vrlo jednostavno. Signali, čiji se fazni pomak mjeri, se dovode na kanale 1 i 2. Mase na zaslonu oba kanala se postavje na istu liniju. (Napomena: kanale možemo neovisno jedan od drugog pomjerati po vertikalnoj liniji.) Zatim se odabere vremenska baza tako da očitavanje bude najbolje. Za ovo mjerenje možemo na zaslonu imati i manje od jednog perioda signala (slika 9). Na prvi kanal dovodimo referentni signal (uzimamo da je  $\varphi_1=0$ ), a na drugi kanal dovodimo signal čiji fazni pomak mjerimo. Na osciloskopu izmjerimo vrijeme koje protekne između prolaza referentnog signala kroz nulu i slijedećeg signala, pri čemu ti prolazi trebaju biti ili oba rastuća ili oba opadajuća. Iz ovog vremena možemo izračunati fazni pomak u stepenima prema izrazu:

$$\varphi = \frac{\Delta t}{T} \cdot 360^\circ = f \cdot \Delta t \cdot 360^\circ \quad (2)$$

U izrazu (2) T je period signala koji se može izmjeriti na način opisan u prethodnom dijelu.

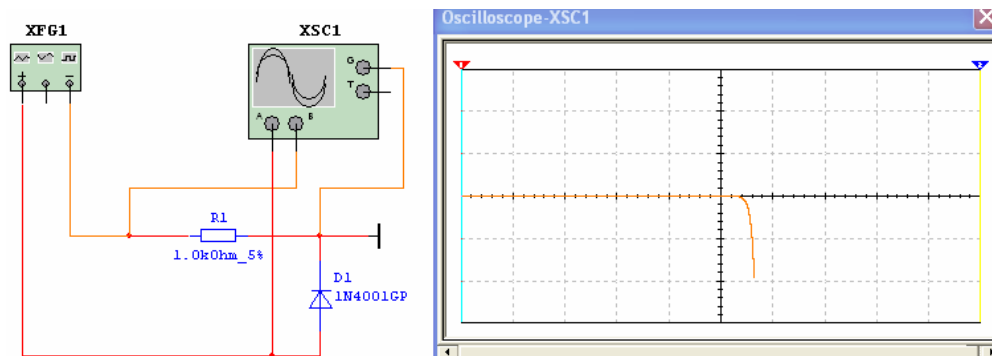


Slika 9. Mjerenje faznog pomaka

### 1.3.1.5. Mjerenje karakteristika poluprovodničkih komponenti osciloskopom

Korištenjem XY načina rada moguće je na zaslonu osciloskopa posmatrati prenosne karakteristike elektronskih komponenti ili sklopova. Na kanal CH<sub>1</sub> ili X dovodi se ulazni signal sklopa koji se posmatra, a na kanal CH<sub>2</sub> ili Y dovodi se izlazni signal. Oba ulazna kanala na osciloskopu na ulazu trebaju naponski signal. U slučaju da je jedna od komponenti karakteristike struja treba je pogodnom transformacijom prevesti u napon. Pošto oba kanala na osciloskopu imaju zajedničku masu to treba voditi računa da na sklopu imamo zajedničku tačku za ulazni napon i izlazni napon. Da bi se vidio efekat na osciloskopu na ulaz se dovodi signal oblika pile ili sinus koji se mijenja od neke minimalne vrijednosti do neke maksimalne vrijednosti.

Uzmimo za primjer da želimo snimiti karakteristiku poluprovodničke diode. Za ovu karakteristiku treba nam napon na diodi i struja kroz diodu. Struju ćemo puštanjem kroz otpor poznate vrijednosti prevesti u napon i imaćemo oba naponska signala. Šema mjerenja i karakteristika diode su dati na slici 9. Kao što se vidi na karakteristici struja je negativna jer smo spojnu tačku otpora i diode morali uzeti kao zajedničku odnosno masu. Ako bismo ovo htjeli probati sa realnim sistemom onda ne bismo uspjeli sa navedenom šemom, jer su mase osciloskopa i generatora funkcija kratko spojene preko uzemljenja napojne mreže 220V. Da bismo to postigli potrebno bi bilo ili generator funkcija ili osciloskop napajati preko transformatora 1:1 koji vrši galvansko razdvajanje mreže od uređaja. Vježbu bismo mogli uraditi i tako što bismo umjesto generatora funkcija koristili transformator koji sa 220V transformiše na recimo 20V. Na isti način možemo snimiti i prenosne karakteristike uobličivača impulsa na bazi otpora i dioda.

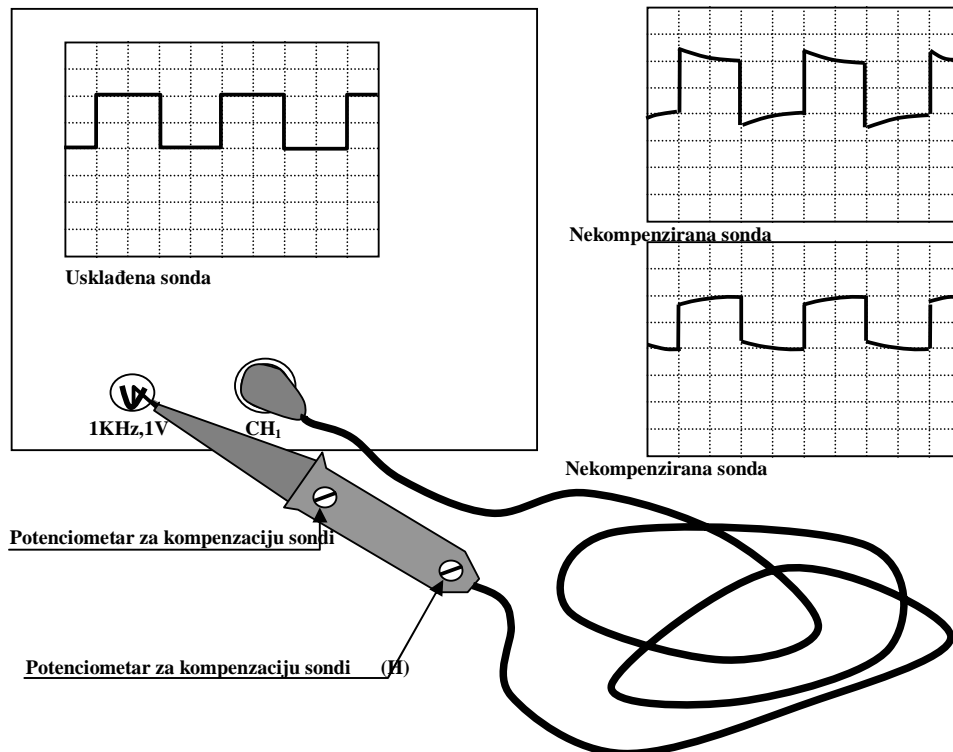


Slika 10. Snimanje karakteristike diode osciloskopom

## 1.3.1.6. Kalibracija osciloskopa

Vremenom, svaki osciloskop može da počinje praviti grešku u mjeranju. Greška se pojavljuje kao rezultat deformacije karakteristika internih pojačavačkih stepeni po X ili Y otklonskom sistemu. Zato većina osciloskopa ima mogućnost kontinualnog namještanja ovog pojačanja. Ono se izvodi preko potenciometra koji je centralni dio preklopnika za razmjernu po X i Y otklonskom sistemu. U normalnom radu ovaj potenciometar je u krajnjem desnom položaju. Da bismo mogli pravilno izvesti kalibraciju treba nam izvor signala poznatih i stabilnih parametara. Za te namjene može poslužiti izvor koji posjeduje sam osciloskop. To je signal četvrtke obično amplitude 0.2V i frekvencije 1kHz. Spojimo sonde ulaznih kanala na ovaj izvor i izvršimo provjeru. Ovo treba povremeno raditi i kada nemamo osjećaj da osciloskop pokazuje pogrešno.

Ovaj izvor može poslužiti i za kalibraciju sonde. Naime sonde za osciloskop nisu obična dva komada vodiča za dovod signala. One se rade sa posebnom pažnjom i njihova konstrukcija treba biti takva da im karakteristična impedansa odgovara ulaznoj impedansi osciloskopa. Ukoliko to nije slučaj doći će do deformacije signala. Za te namjene sve sonde su opremljene potenciometrima kojima možemo izvršiti prilagođenje karakteristične impedanse. Jednim potenciometrom vršimo kompenzaciju sonde za niske frekvencije (L), a drugim za visoke frekvencije (H). To se postiže tako što sonde spojimo na interni izvor signala četvrtke i pomjeramo potenciometar dok se signal ne izravna (slika 11). Za niske frekvencije koristimo interni signal 1kHz, a za visoke frekvencije koristimo signal 1MHz.



Slika 11. Kompenzacija sonde osciloskopa



### 1.3.1.7. Analogni osciloskop Tektronix TAS465 – kratko upustvo

Radi se o dvokanalnom 100MHz analognom osciloskopu sa AUTOSET funkcijom i ugrađenim kursorskim mjerenjem napona, vremena i frekvencije. Osciloskop ima dosta jasan i intuitivan način korištenja te ćemo ovdje dati samo neke specifičnosti koje određuju ovaj tip osciloskopa.

Startanje bilo kog mjerenja kada je prisutan ulazni signal na oba kanala izvodimo jednostavno pritiskom na AUTOSET dugme. Osciloskop će prema vlastitom algoritmu postaviti oba kanala u vidljivu ravan zaslona, tako da kanal jedan bude gornji, a kanal dva donji. Aktivna razmjera po jednom i drugom kanalu se bira prema amplitudama ulaznog signala i ispisana je u gornjem lijevom uglu zaslona.

Ukoliko imamo potrebu za promjenu ponuđenih razmjera to jednostavno izvodimo sa preklopnikom VOLTS/DIV u polju VERTICAL po kanalu 1 (CH<sub>1</sub>) i kanalu 2 (CH<sub>2</sub>). Pošto se istim preklopnikom mijenja i razmjera i po jednom i po drugom kanalu aktivan je onaj kanal kod koga odgovarajuća LED svijetli. Aktiviranje drugog kanala se izvodi pritiskom na dugme CH<sub>1</sub> ili CH<sub>2</sub>.

Aktivna vremenska baza je data u sredini zaslona i njena promjena se izvodi preklopnikom SEC/DIV u polju HORIZONTAL.

Kod korištenja kursorskog očitavanja pritisnemo tipku CURSOR i u donjem dijelu zaslona će se pojaviti opcije koje nam stoje na raspolaganju:

$\Delta$ VOLT	ABS V	<u><math>\Delta</math>TIME</u>	1/ $\Delta$ T
Off	Off	<u>On</u>	Off

Pritiskom na dugme koje se nalazi ispod svake ponuđene opcije biramo opciju korištenja kursora. Aktivna je ona opcija sa On tj. sa podvučenom linijom. Na zaslonu će nam se pojaviti dvije linije, jedna isprekidana i jedna puna, a u srednjem gornjem dijelu zaslona broj (sa jedinicom) koji pokazuje rezultat mjerenja. Rezultat se odnosi na aktivni kanal, i pokazuje mjeru koja je ovisna o rastojanju prisutnih linija. Ove linije možemo pomjerati sa potencijetrom TOGGLE i to onu punu liniju. Promjenu upravljanja linijom izvodimo sa dugmetom lijevo od potencijetra TOGGLE.

Ako želimo ukinuti prikaz jednog kanala onda aktiviramo taj kanal i pritiskom na dugme WAVEFORM OFF kanal će se isključiti. Vraćamo ga nazad na isti način.

Po svakom kanalu možemo birati način prikazivanja signala: DC, AC ili GND. To radimo na slijedeći način: aktiviramo kanal, pritisnemo dugme VERTICAL MENU na desnom kraju zaslona će se pojaviti meni (DC, AC, GND); pritiskom na odgovarajuće dugme desno aktiviramo mod koji želimo.

Ako nam treba XY mod onda pritisnemo HORIZONTAL MENU i izaberemo XY.

Ostale opcije ako je potrebno mogu se naći u uputstvu za korištenje (Instruction Manual) koje dolazi uz uređaj.

### 1.3.1.8. Analogni osciloskop Hameg HM-504 – kratko upustvo

Radi se o dvokanalnom 50MHz analognom osciloskopu sa AUTOSSET funkcijom i ugrađenim kursorskim mjerenjem napona, vremena i frekvencije. Osciloskop ima dosta jasan i intuitivan način korištenja te ćemo ovdje dati samo neke specifičnosti koje određuju ovaj tip osciloskopa.

Startanje bilo kog mjerenja kada je prisutan ulazni signal na oba kanala izvodimo jednostavno pritiskom na AUTOSSET dugme. Osciloskop će prema vlastitom algoritmu postaviti oba kanala u vidljivu ravan zaslona, tako da kanal jedan bude gornji a kanal dva donji. Aktivna razmjera po jednom i drugom kanalu se bira prema amplitudama ulaznog signala i ispisana je na donjem dijelu zaslona.

Ukoliko imamo potrebu za promjenu ponuđenih razmjera to jednostavno izvodimo sa preklopniciama VOLTS/DIV za svaki kanal posebno.

Aktivna vremenska baza je data na vrhu zaslona i njena promjena se izvodi preklopnikom SEC/DIV.

Kod korištenja kursorskog očitavanja pritisnemo tipku MEASURE i na zaslonu će se pojaviti opcije koje nam stoje na raspolaganju:

$\Delta t$   
1/  $\Delta t$   
Rise Time  
 $\Delta V$   
...

Na zaslonu će se pojaviti strijelice 'gore' i 'dole' ispod kojih su tipke kojima pomjeramo aktivnu opciju u datom smjeru. Aktivna je ona koja je svjetlija. Kada kursor postavimo na željenu opciju aktiviramo je sa SET. Na zaslonu će se pojaviti dvije linije i broj koji pokazuje vrijednost koju trenutno zauzimaju te linije (napon ili vrijeme). Pomjeranje svake linije izvodimo potenciometrima Y-POS/CURS I i Y-POS/CURS II. Pri tome treba aktivirati opciju pomjeranja kursora sa CURSOR POS (Svijetli).

Ako želimo ukinuti prikaz jednog kanala onda to radimo sa DUAL MENY. Vraćamo kanal sa istim dugmetom.

Po svakom kanalu možemo birati način prikazivanja signala: DC, AC ili GND. Desno od svakog ulaza nalazi se dugme x1/x10 i DC/AC/GND. Kratkim pritiskom na ovo dugme mijenjamo DC/AC/GND, aktivna je opcija koja je svjetlija. Dužim pritiskom na ovo dugme bizamo x1 jedinično pojačanje, x10 desetično pojačanje.

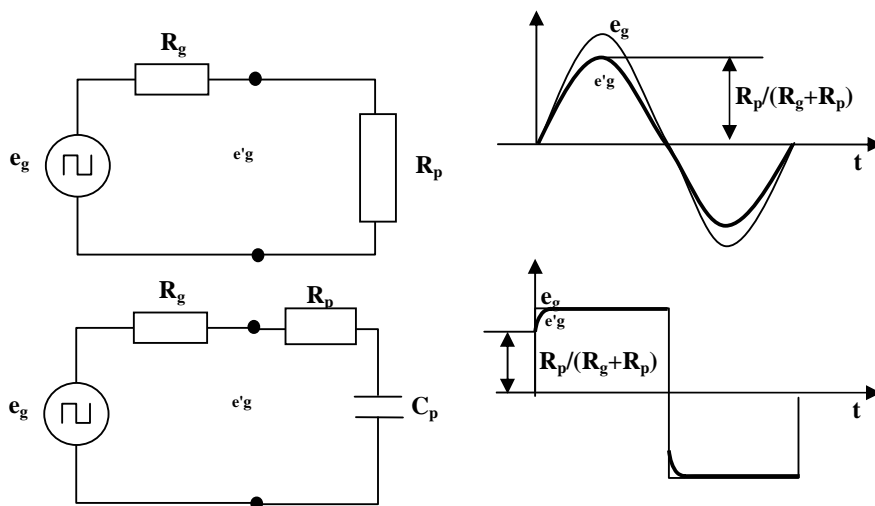
Ako nam treba XY mod onda pritisnemo TRIGGER SOURCE i izaberemo XY.

Posebna pogodnost ovih osciloskopa je testiranje komponenti CT (Component Tester). Ovu opciju aktiviramo sa CT, na banana konektor 4mm spajamo komponentu koju testiramo. Tom prilikom vremenska baza i ulazni kanali su neaktivni. Testirati možemo pn prelaze. Maksimalan napon koji se u proceduri testiranja pojavljuje ne prelazi 20V.

## 1.3.2. Generator funkcija

Iako je generator funkcija prvenstveno generator, odnosno naponski izvor, on spada u grupu elektroničke instrumentacije jer mu je namjena takva da se koristi u sklopu mjerenja, odnosno ispitivanja karakteristika pojedinih sklopova. Veliki broj elektronskih sklopova se može ispitati dovodenjem naponskog signala koji se mijenja u vremenu po sinusnom ili nekom drugom zakonu. To je u principu naponski izvor kojemu možemo mijenjati oblik, frekvenciju i amplitudu. Naziv funkcijski generator nastao je u vrijeme kada su korišteni ovakvi uređaji za zadavanje funkcijskih signala na ulazu analognih računara. Pošto su se ovakvi izvori počeli masovno koristiti i u druge namjene, ali sa istom funkcijom naziv je zadržan. Danas se ovi generatori prave sa mogućnošću promjene frekvencije od 1  $\mu$ Hz do 40 GHz. S obzirom da ovako širok frekventni opseg nije jedinstavno postići, to se jednom vrstom sklopova generišu niske frekvencije, a drugom vrstom visoke frekvencije, generatori se proizvode prema namjeni sa nekim opsegom frekvencija koje mogu generisati. Snaga ovih naponskih generatora je vrlo niska od 10 mW do 200 mW. O ovome treba voditi računa da sklop kojim opterećujemo generator ima što veći ulazni otpor, u protivnom doći će do izobličenja signala na izlazu generatora.

Ovo izobličenje nastaje zbog postojanja izlaznog otpora generatora koji nije zanemariv, te se ulazni otpor sklopa pojavljuje kao djelitelj sa unutrašnjim (izlaznim otporom) generatora (slika 12). Ovo je posebno uočljivo kada dovodimo signal četvrtke na sklop koji je neka RC kombinacija. Tada su izobličenja izlaznog signala jako vidljiva. Sa navedenih dijagrama jasno je da su izobličenja signala na izlazu generatora utoliko manja što je ulazni otpor sklopa veći. Za generatore koje mi koristimo treba nastojati da ulazni otpor sklopa ne bude manji od 1k $\Omega$ .

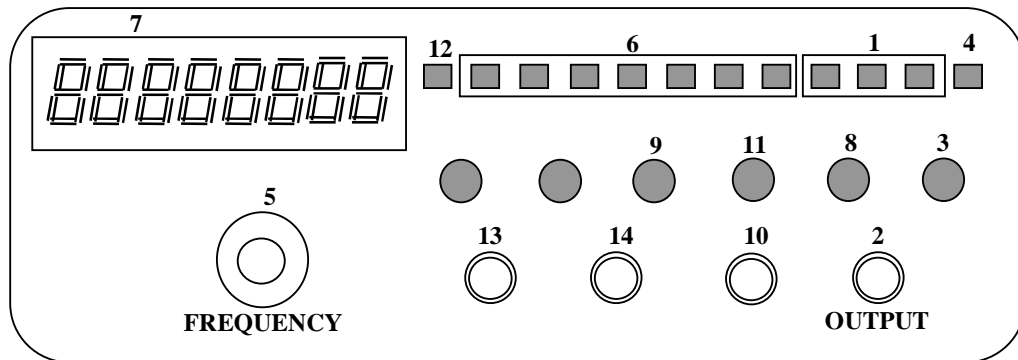


Slika 12. Izobličenja signala na izlazu funkcijskog generatora zbog postojanja unutrašnjeg otpora

Većina generatora ima prednju ploču dosta ujednačenu te je i sama upotreba jednostavna (slika 13). Ovdje ćemo dati samo neke napomene o kojima treba voditi računa. Tipkama (1) biramo tip signala. Izlaz uzimamo sondom sa BNC konektora sa natpisom OUTPUT. Sonda mora biti originalna za taj tip generatora ili sonda koju koristimo za osciloskop, ali jedinična. Za kontinualno namještanje amplitude koristi se potenciometar (3) koji omogućuje promjenu amplitude od 0V do  $V_{max}$  (LEVEL, AMPLITUDE).  $V_{max}$  obično iznosi 10V (20V<sub>pp</sub> peak-to-peak, tj. od vrha do vrha). Ukoliko nam treba signal male amplitude onda nam stoji na raspolaganju mogućnost umanjena amplitude izlaza za 20dB i tada tipkom (4) promijenimo opseg izlaza na 0V do 100mV. Trenutno aktivnu amplitudu mjerimo osciloskopom, a za orijentaciju nam može poslužiti pozicija potenciometra LEVEL. Frekvenciju kontinualno

namještamo potenciometrom (5) pri čemu mijenjamo frekvenciju od 0 do  $2F$ , gdje je  $F$  odabrani opseg. S obzirom na način generisanja signala potrebno je vanjskim preklopnikom mijenjati karakteristike komponenti (obično su to kapaciteti) za cijelu dekadu, te korisnik izborom frekventnog opsega (6) to uradi. Sada nam stoji na raspolaganju kontinualna promjena frekvencije potenciometrom, kao što je rečeno. Većina generatora ima digitalni displej (7) koji pokazuje trenutno namještenu frekvenciju, a ako to nije slučaj istu mjerimo osciloskopom.

U osnovnom modu izlaz iz generatora je bipolaran signal sa srednjom vrijednosti jednako nula. To znači da je pozitivna amplituda signala jednaka negativnoj, te da je trajanje pozitivnog dijela signala jednako trajanju negativnog dijela signala. Ukoliko nam treba istosmjernog nivoa signala, onda isti dodajemo sa DC offset (8). Potenciometar se izvuče iz svog osnovnog ležišta te se pomjeranjem namješta nivo istosmjerne komponente. Treba voditi računa da ukupna amplituda ovako dobivenog signala nemože preći 10V. Kada nam ne treba istosmjerna komponenta ovaj potenciometar se vrati u svoje prvobitno ležište. Isto tako imamo mogućnost promjene odnosa pozitivnog i negativnog dijela signala. Izvučemo potenciometar (9) (symmetry) iz svog osnovnog ležišta i pomjeranjem namještamo željeni odnos. Tom prilikom se aktivni frekventni opseg smanji za 10 puta. Za potrebe digitalnih sklopova koristimo drugi naponski izlaz TTL/CMOS OUTPUT (10). Ovaj izlaz daje signal TTL nivoa (četvrtka 0V i 5V) ili CMOS nivoa (niži naponski nivo 0V i viši naponski nivo koji se može namještati od 4 do 15V). Prema tome, signal je unipolaran konstantne amplitude 5V koja se nemože mijenjati kod TTL-a, i 4-15V kod CMOS-a. Izbor između TTL izlaza ili CMOS izlaza biramo sa dugmetom (11). Možemo mijenjati frekvenciju, te odnos jedinice i nule na već opisani način.



Slika 13. Prednja ploča generatora funkcija

Pored navedenih standardnih funkcija neki generatori posjeduju i napredne funkcije. Mogu se koristiti kao frekvenometri, tipkom (12) biramo prikaz frekvencije koju dovodimo iz vanjskog izvora. Dovodimo signal sa vanjskog izvora na BNC konektor (13) istom sondom kao za generator. Amplituda signala može iznositi od 100mV do 150V, a frekvencija do 2Hz do 10MHz. (Kod korištenja generatora kao frekvenmetra treba se ipak zadržati u opsegu nižih amplituda ulaznog signala, do 10V). Generator se može koristiti i kao FM modulator, odnosno generisanje signala čija je frekvencija naponski kontrolisana. Tada se naponski signal kojim se upravlja frekvencijom dovodi izvana na konektor VCF (Voltage Controlled Frequency) (14). Ovaj signal je unipolaran maksimalne amplitude 10V. To može biti napon konstantne amplitude ili promjenjivi napon.

Opisani generatori funkcija spadaju u grupu srednje klase gdje se analognim tehnikama generišu izlazni signali. Karakteristika ovih generatora je pristupačna cijena i frekventni opseg do 2MHz, sa prisutnim već opisanim opcijama. U novije vrijeme sve više su u upotrebi

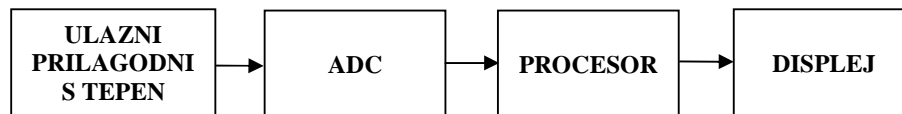
generatori funkcija na bazi procesora. Numeričko generisanje signala pruža niz pogodnosti, kao što su precizno kontroliran oblik, frekvencija i amplituda, numeričko zadavanje potrebnih parametara, te generisanje više tipova signala. Posebna pogodnost je generisanje moduliranih signala FM ili AM modulacijom, te već opisane napredne funkcije. Sa ovim tipovima generatora studenti će se sresti u nastavku studija, te ih ovdje nećemo detaljnije obrađivati.

### 1.3.3. Unimjer

Pod terminom unimjer podrazumjeva se instrument kojim je moguće mjeriti sve standardne električne veličine: napon, struju i otpor, tako da ovakav instrument mijenja sve nabrojene instrumente (ampermetar, voltmeter, ommetar). Neki od ovih instrumenata se pored navedenih mjerenja mogu koristiti i za mjerenje: kapaciteta, temperature,  $h_{fe}$ , itd. Uglavnom se rade kao digitalni dok postoje i analogni koji su sve manje u upotrebi.

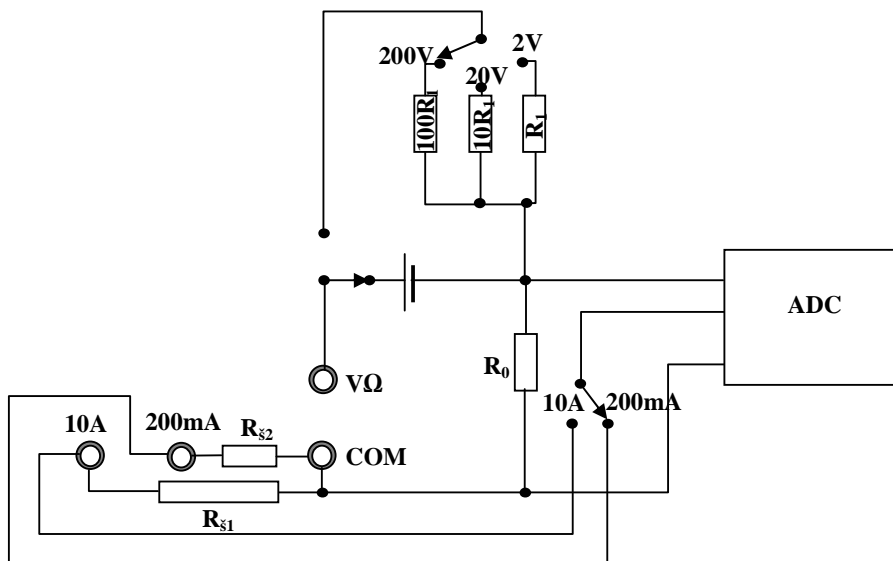
#### 1.3.3.1. Princip rada digitalnih instrumenata

U osnovama digitalnih instrumenata je analogno/digitalna konverzija (ADC) o čijim detaljima će studenti biti upoznati u nastavku studija pa ćemo u ovom dijelu to predstaviti maksimalno pojednostavljeno. Ulazna veličina, (struja, napon) posredstvom konvertora se prevodi u naponski signal, koji je po amplitudi prilagođen naponskom ulazu analogno/digitalnog konvertora (ADC). ADC prevodi ovaj analogni ulazni napon u digitalni podatak koji unutar procesorskog sistema biva prezentiran odgovarajućim značenjem. Zatim procesor posredstvom displeja prikaže mjerenu vrijednost.



Slika 14. Principijelna blok struktura digitalnih unimjera

Postupak analogno/digitalne konverzije zahtijeva određeno vrijeme koje sabrano sa procesorskim vremenom potrebnim za obradu konvertovanih podataka daje vrijeme kašnjenja koje nije zanemarivo, tako da u principu digitalni instrumenti sporije prikazuju mjerene vrijednosti od analognih. Poseban problem predstavlja kada se ulazne veličine mijenjaju. Kod analognih instrumenata ako se mjerena veličina sporo mijenja vidjet ćemo kretanje kazaljke i imati bar neku informaciju, dok kod digitalnih brojevi koji se mijenjaju na displeju nas zbunjuju, jer nikad ne znamo da li je neispravan instrument, loše povezan ili izabrano pogrešno područje itd. U tom smislu, još uvijek za neke primjene se preporučuje korištenje analognih instrumenata. Kod nas u laboratoriji su uglavnom na raspolaganju digitalni instrumenti te ćemo dati osnovne napomene za njihovo korištenje. Digitalni instrumenti uvijek trebaju baterijsko napajanje, ako nema baterije ili ako je napon baterije niži od potrebnog ne mogu se koristiti. Vrlo je važno ispravno povezati ulaze za mjerne tačke. Ulazni prilagodni stepen prilagođava napon po nivou, struju prevodi u napon na strujnom šentu, kod mjerenja otpora daje potreban napon na otpor koji se mjeri te padom napona na njemu dolazimo do informacije o vrijednosti itd. Slika 15 pokazuje principijelno kako djeluje ulazni prilagodni stepen.



Slika 15. Principijelna šema ulaznog prilagodnog stepena

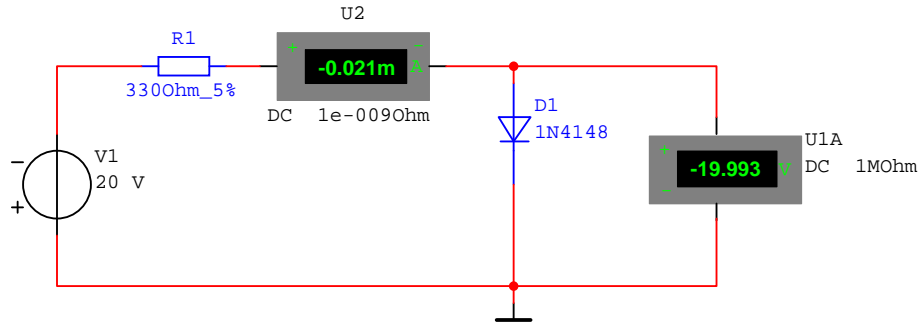
### 1.3.3.2. Mjerenje struje

Kod mjerenja struje treba znati da struja koju mjerimo prolazi kroz instrument. Pad napona na šentu se koristi kao ulaz u ADC, te se na osnovu poznatih vrijednosti otpora šenta računa se vrijednost struje. Vrijednost otpora šenta treba biti takva da se omogući, sa jedne strane pad napona dovoljan za korektno čitanje na ADC, a s druge strane što manji da ne unosi grešku u mjerenju. Vrijednosti ovi šentova su nekoliko  $m\Omega$ . Šentovi moraju biti precizno odabrani, odgovarajuće snage i tolerancije. Najčešći problemi koje studenti imaju u radu sa digitalnim instrumentima jeste upravo mjerenja struje. Puštanje struje veće od dozvoljenje dovešće do pregaranja ovih šentova i oštećenja instrumenta. Prekoračenje struje može nastupiti ako dovedimo struju veću od one napisane na samom instrumentu, pogriješimo pri izboru mjernog opsega, ili najčešća greška kad dovedemo naponski signal na strujne ulaze. Pošto je tada u naponskom krugu samo unutrašnji otpor naponskog izvora i otpor šenta koji su jako mali, onda je jasno da će poteći vrlo velika struja. Zato kod ovih mjerenja treba biti jako oprezan.

Mi ćemo uglavnom koristi indirektnu metodu za mjerenje struje. Struju računamo kao pad napona na poznatom otporu, a mjerimo napon. Dvije stvari nam tada idu u prilog, ne koristimo ampermetar i ne moramo prekidati strujni krug da bismo povezali instrument. Dovoljno je postaviti stezaljke instrumenta spojenog kao voltmetar na krajeve otpora i očitati vrijednost otpora.

### 1.3.3.3. Mjerenje napona

Mjerenje napona je jednostavno. Treba ispravno odabrati mjerno područje, vrstu ulaznog napona istosmjerni (DC) ili izmjenični (AC) i povezati ulazne stezaljke na mjerne tačke. Instrument će pokazati vrijednost sa predznakom. Ulazni otpor voltmetra je vrlo velik (reda  $M\Omega$ ) i za većinu mjerenja koje ćemo izvoditi neće praviti grešku vrijednu pažnje. Postoji jedno mjerenje koje bi zbog ove greške moglo dati pogrešnu interpretaciju rezultata te ćemo ilustracije radi dati njegovo objašnjenje. Kada snimamo karakteristiku pn prelaza (karakteristika diode, ulazna karakteristika tranzistora) onda je šema mjerenja data slikom 16.

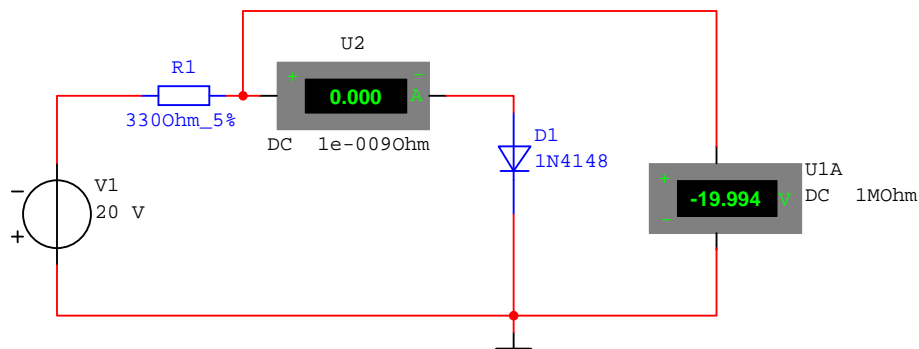


Slika 16. Greška mjerenja uzrokovana unutrašnjim otporom voltmetra

Kao što se na slici vidi inverzno polarisan pn spoj diode 1N4148 pri naponu od -20V ima struju od  $21\mu\text{A}$ , iako je nama jasno da je ta struja mnogo manja i da tu struju ampermetrima sa  $\mu\text{A}$  osjetljivosti nemožemo izmjeriti, ta je struja jednostavno mnogo manja. Uglavnom uzimamo da je ona nula. Kao što vidimo struja od  $21\mu\text{A}$  nije za zanemariti. Međutim, kada pogledamo šemu vidimo da je ta struja, struja koja prolazi kroz voltmetar, koja kada je izračunamo uzimajući u obzir vrijednost unutrašnjeg otpora voltmetra od  $1\text{M}\Omega$  iznosi:

$$I = \frac{20}{10^6 + 330} = 19,9\mu\text{A}.$$

Znači, ako neka struja i teče kroz inverzno polarisan pn prelaz onda je ona manja od  $1,1\mu\text{A}$ . Navedena greška se može izbjeći ako voltmetar spojimo prije ampermetra kao na slici 17.



Slika 17. Ispravno mjerenje karakteristike diode pri inverznoj polarizaciji

Na slici 17 je vidljivo, kao što smo i rekli, da se ta struja nemože izmjeriti ovim instrumentom te je korektno za većinu aplikacija uzeti da je ona nula.

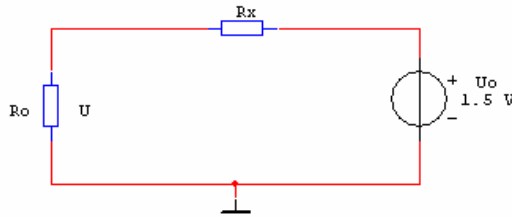
Kod mjerenja izmjeničnih veličina instrument VC220 (a vrijedi i za većinu ostalih digitalnih instrumenata) prikazuje efektivnu vrijednost ulaznog napona (rms, root-mean-square) pri čemu on na ulazu pretpostavlja sinusi valni oblik. Instrument je predviđen za mjerenje sinusnih napona i struja sa frekvencijom od 40Hz do 400Hz. Svako mjerenje izvan ovog opsega kao i mjerenje nesinusoidalnih oblika praviće grešku.

Iako je instrument prdviđen za mjerenja napona i do 1000V, (750V ac) kod mjerenja ovih napona priključenje instrumenta na navedene napone ne treba da traje dugo (ne duže od nekoliko sekundi). To isto vrijedi za velike struje.

## 1.3.3.4. Mjerenje otpora

Kod mjerenja otpora, instrument internim naponskim izvorom (9V ili 1.5V) napaja krug u kome su unutrašnji poznati otpor i vanjski nepoznati otpor. U krugu poteče struja proporcionalna vrijednosti vanjskog otpora koja na poznatom unutrašnjem otporu pravi pad napona (U) čijim mjerenjem se određuje vrijednost nepoznatog otpora slika 18.

$$R_x = R_0 \left( \frac{U_0}{U} - 1 \right) \quad (3)$$



Slika 18. Mjerenje otpora ommetrom

Kod praktičnih mjerenja otpora treba voditi računa o dvije stvari: istrošena baterija može dovesti do promjene internog napona  $U_0$ , a samim time i do greške u merenju i druga, mjerenje otpora posebno malih vrijednosti zbog struje koja tada teče intenzivno troši bateriju instrumenta.

## 1.3.4. LRC metar

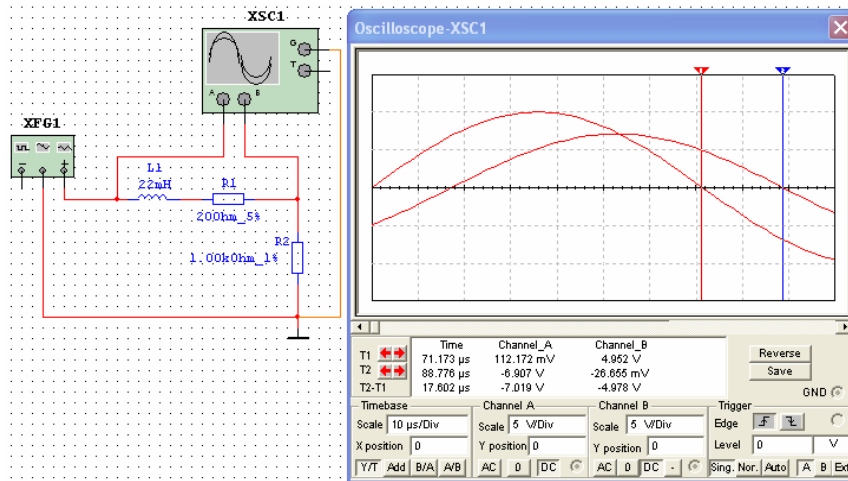
Mjerenje otpora običnim unimjerom daje dobre rezultate za 5% ili 1% otpore, mjerenje malih iznosa otpora ispod jednog  $\Omega$  postaje upitno običnim unimjerom. Zato se posebno prave instrumenti za mjerenje otpora, induktiviteta i kapaciteta, takozvani LRC metri. Njihova tačnost je puno bolja nego kod standardnih unimjera. Isto tako kada mjerimo otpor ili induktivitet namotaja i sl., važno je znati i Q faktor koji definira odnos L-R ili C-R što ovi instrumenti mogu mjeriti. Samo mjerenje je dosta jednostavno te ga nećemo posebno obrazlagati. Umjesto toga pokazat ćemo kako je moguće mjeriti induktivitet ili kapacitet kada nam ne stoji na raspolaganju LRC metar.

## 1.3.4.1. Mjerenje induktiviteta

Približno mjerenje induktiviteta sa tačnosti do 10% možemo izvesti osciloskopom na slijedeći način. Uzmemo otpor poznate vrijednosti spojimo u seriju sa nepoznatim induktivitetom i na ulaz dovedemo sinusni signal. Pratimo na osciloskopu fazni pomjeraj ulaznog i izlaznog signala te mijenjamo frekvenciju ulaznog signala dok taj pomjeraj ne bude mjerljiv (bar  $\pi/4$ ). Mjerenjem faznog pomaka, uz poznavanje vrijednosti otpora i otpora induktiviteta možemo odrediti vrijednost nepoznatog induktiviteta. Vrijednost otpora induktiviteta izmjerimo jednostavno ommetrom. Tada je iznos nepoznatog induktiviteta određen relacijom:

$$L = \frac{R_1 + R_2}{2 \cdot \pi \cdot f} \operatorname{tg}(\Delta t \cdot 360 \cdot f) \quad (4)$$





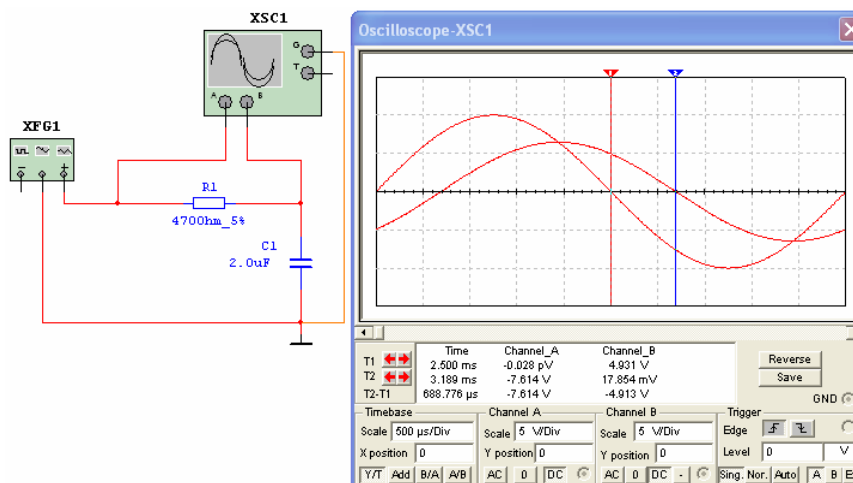
Slika 19. Mjerenje nepoznatog induktiviteta osciloskopom

Za povećanje tačnosti dobro je nastojati da korištena frekvencija bude u opsegu 200Hz do 10kHz i u tom kontekstu odabrati otpor. Najbolja tačnost se postiže ako uskladimo da ugao bude 45°. U primjeru sa slike korišten je induktivitet sa  $L=22\text{mH}$  otpora  $R_1=20\Omega$ , pri frekvenciji od 7kHz dobijen je ugao od  $44.352^\circ$  što uvrštavanjem u izraz 4 daje mjerenu induktivnost u iznosu od 22,67mH. Složićemo se da je navedena tačnost (3%) za većinu primjena sasvim zadovoljavajuća.

#### 1.3.4.2. Mjerenje kapaciteta

Približno mjerenje kapaciteta možemo izvesti osciloskopom na slijedeći način. Uzmemo otpor poznate vrijednosti spojimo u seriju sa nepoznatim kapacitetom i na ulaz dovedemo sinusni signal. Pratimo na osciloskopu fazni pomjeraj ulaznog i izlaznog signala te mijenjamo frekvenciju ulaznog signala dok taj pomjeraj ne bude mjerljiv (bar  $\pi/4$ ). Mjerenjem faznog pomaka, uz poznavanje vrijednosti otpora možemo odrediti vrijednost nepoznatog kapaciteta. Tada je iznos nepoznatog kapaciteta određen relacijom:

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot R_1 \cdot \text{tg}(360 \cdot \Delta t \cdot f)} \quad (5)$$



Slika 20. Mjerenje nepoznatog kapaciteta osciloskopom

Za povećanje tačnosti dobro je nastojati da korištena frekvencija bude u opsegu 100Hz do 10kHz i u tom kontekstu treba odabrati otpor. Najbolja tačnost se postiže ako uskladimo da ugao bude  $45^\circ$ . U primjeru sa slike korišten je kapacitet sa  $C=2\mu\text{F}$ , pri frekvenciji od 200Hz dobijen je ugao od  $49.59^\circ$  što uvrštavanjem u izraz 5 daje mjereni kapacitet u iznosu od  $1,44\mu\text{F}$ . Složićemo se da je dobijena greška (28%) velika, ali bar imamo informaciju o redu veličine korištenog kapaciteta što može nekada biti od koristi.

### 1.3.5. Laboratorijski naponski izvor (Laboratory Power Supply)

Naponski izvori predstavljaju neophodne uređaje za bilo kakve eksperimentalne aktivnosti u elektronici. Standardni laboratorijski naponski izvori sadrže dva promjenjiva naponska izvora i jedan konstantni. Svi izvori su opremljeni prekostrujnom zaštitom kao i zaštitom od kratkog spoja. Svi izvori su galvanski odvojeni od mreže 220V. Naša laboratorija je opremljen sa dva tipa ovih izvora te ćemo ih ukratko opisati.

Tektronix TS220 sadrži dva promjenjiva izvora A i B sa mogućnosti promjene napona od 0 do 20V i maksimalnom strujom od 0.5A. Treći izvor je sa fiksnim naponom od 5V i maksimalnom strujom od 2A. U gornjem desnom dijelu nalazi se preklopnik kojim se bira način rada: nezavisni (independent) serijski i paralelni. Kada se koristi nezavisni način rada, tada su sva tri izvora međusobno nezavisna i na šemi su moguća povezivanja u skladu sa elektrotehničkim pravilima. Kada koristimo serijski način izvori A i B su interno povezani te imamo jedan izvor sa ukupnim opsegom promjene napona. Kada koristimo paralelni način izvori A i B su povezani paralelno i tada je struja koju ovako dobiven izvor može dati udvostručena. Za sve naše vježbe mi ćemo koristiti nezavisni način rada. Naponski izvor je opremljen jednim ampermetrom i jednim voltmetrom koji pokazuju napon i struju za jedan izvor A ili B. Izbor pokazivanja ovih instrumenata izvora A ili B vrši se odgovarajućim preklopnikom smještenim između ovih instrumenata. Instrumenti su analogni i za sve vježbe kod namještanja napona pored ovog instrumenta treba koristiti i digitalni instrument, za fino namještanje potrebnog napona. Promjena napona na izvorima A i B vrši se odgovarajućim potenciometrima smještenim u desnom dijelu naponskog izvora. Ispod ovih potenciometara nalaze se još dva potenciometra kojima se namješta nivo prekostrujne zaštite. Prilikom rada treba procijeniti ukupnu struju koju treba sklop, te ovaj potenciometar namjestiti na nešto veću struju. Ako imamo grešku na šemi tako da sklop povuče veću struju interna prekostrujna zaštita će reagirati i oboriti napon izlaza na nulu. Time se štiti naponski izvor. Komponenta koja je povukla veću struju je već stradala, ako nije predviđena za takve struje. Prilikom prekoračenja struje na nekom od izvora svijetli odgovarajuća LED dioda smještena između izlaznih tačaka samog izvora. U slučaju da se to pojavi treba prvo isključiti naponsku jedinicu na mrežnom prekidaču pa tek onda pregledati šemu. Poslije otklanjanja greške na šemi ponovo uključujemo naponski izvor.

Naponska jedinica tip EA-PS 2316-050 posjeduje takođe tri naponska izvora. Dva su promjenjiva 0-16V, 5A maksimalno i jedan fiksni 3-6V, 2A. Fiksni izvor se posebnim potenciometrom postavi na potrebnu vrijednost 3-6V i sada je postavljen na 5V. Za razliku od gore opisane napojne jedinice ovdje oba izvora imaju ampermetar i voltmetar koji su digitalni.

## 1.4. Elektronske komponente

Rad sa elektroničkim komponentama i sklopovima zahtijeva poznavanje karakteristika elektroničkih komponenti. U ovom dijelu ćemo dati prikaz diskretnih komponenti predviđenih za korištenje u okviru nastave na ovom kursu, te dati primjer korištenja kataloga.

### 1.4.1. Tipovi i označavanje elektronskih komponenti

Elektronskih komponenti ima jako mnogo kako različitih grupa (otpori, diode, tranzistori ...) tako i različitih tipova unutar pojedinih grupa. Prezentiranje svih bi se svelo na izradu kataloga što nije namjena ove skripte. Zato ćemo dati samo opis označavanja komponenti koji je usvojen kao najviše prihvaćen standard, te ukazati na različite tipove, podtipove, pakovanja, itd.

Podjela elektroničkih elemenata se može svesti na linearne i nelinearne. Linearni elektronički elementi imaju parametre koji ne zavise od promjene napona i struja, odnosno njihova karakteristika  $I = f(U)$  je linearna. Karakteristika nelinearnih elektroničkih komponenti je nelinearna, odnosno njihovi parametri zavise od promjena napona i struja.

Od linearnih elektroničkih komponenti, u ovoj skripti biće obrađeni otpornici i kondenzatori, a od nelinearnih poluprovodničke diode, Zenerove diode, bipolarni tranzistori, MOSFET tranzistori. Kursom je predviđeno da se koriste i druge komponente kao što je linearno integrirano pojačalo 741, univerzalni tajmer NE555, integrirani regulatori napona 7805, 7812, itd. Opis ovih komponenti će biti prikazan u dijelu gdje se budu prvi put koristile.

### 1.4.2. Tipovi i označavanje otpora

Otpornici su električni elementi koji se u izvjesnoj mjeri suprotstavljaju proticanju električne struje, a mjera tog suprotstavljanja je otpornost. Otpornost predstavlja odnos napona dovedenog na krajeve otpornika i struje koja protiče kroz otpornik.

Osnovni parametri otpornika su:

- Nominalna vrijednost otpornosti je podrazumijevana vrijednost sa kojom koristimo otpore i nanešena je na tijelo otpornika.
- Tolerancija nominalne vrijednosti otpornosti je dozvoljeno odstupanje stvarne od nominalne vrijednosti otpornosti. Izražava se u procentima i odnosi se na ukupnu promjenu otpornosti u radnom temperaturnom području.
- Maksimalna dozvoljena snaga disipacije je maksimalna snaga koja se može razviti na otporniku, a da pri tome ne ugrozi parametre otpornika (pri određenoj temperaturi okoline). Izražava se u vatima (Watt, W).
- Temperaturni koeficijent predstavlja relativnu promjenu otpornosti na nekoj temperaturi u odnosu na otpornost pri nominalnoj temperaturi (20°C). Obično se izražava u %/°C ili ppm/°C (pars per million).
- Dozvoljeni maksimalni priključni napon je napon koji se smije trajno priključiti na krajeve otpornika a da pri tome ne dođe do prekoračenja dozvoljene struje, odnosno disipacije.

U procesu proizvodnje proizvode se samo otpornici sa nominalnim vrijednostima grupiranim u Renarove (Renard) nizove, zato prilikom formiranja sklopova o tome treba voditi računa. Znači, sklop treba projektovati tako da korišteni otpori budu sadržani u ovim nizovima. Bilo kakav izuzetak podrazumijeva da takav otpor formiramo kao paralalnu ili serijsku

kombinaciju drugih vrijednosti ili koristimo potenciometar, a to je skuplja varijanta i koristi se samo onda kada se mora. Oznaka Renarovih nizova je Ex gdje je x broj nominalnih vrijednosti u jednoj dekadi. Mi ćemo se koristiti nizom E12 čije su vrijednosti unutar najniže dekade: (12, 15, 18, 22, 27, 33, 39, 47, 56, 68, 82, 100) $\Omega$ . Veće vrijednosti se dobiju množenjem ovog niza sa 10, 100, 1000 i 10000.

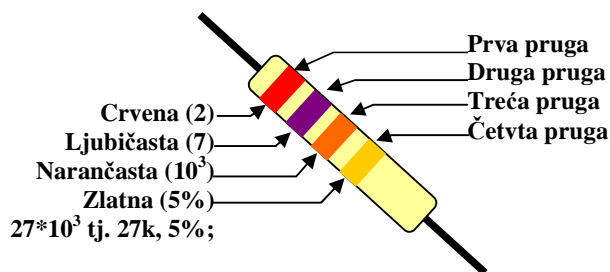
Otpornici se proizvode sa različitim tolerancijama: 20%, 10%, 5%, 2%, 1%, 0,5%, 0,2% i 0,1%. Za postizanje bolje tolerancije u procesu proizvodnje moraju se koristiti kvalitetniji materijali i bolje kontroliran proizvodni proces te su otpori sa boljom tolerancijom skuplji. Kod nas u laboratoriji koristit ćemo 5% i 1% otpore.

Razlikujemo stalne i promjenjive otpornike. Stalni otpornici se, prema vrsti izrade, dijele na slojne, metalizirane, žične i otpornike od specijalne mase. Promjenjivi otpornici nazivaju se i potenciometri.

Otpornici se označavaju bojama ili natpisom. Kod označavanja natpisom na tijelo otpornika se nanese vrijednosti koje označavaju parametre: nominalna vrijednost, tolerancija i disipacija. Na primjer: 4k7, 10%, 4W. Kod označavanja bojama prema njemačkim standardima (uglavnom ćemo koristiti otpore kupljene u Njemačkoj) koriste se 4 pruge ili 5 pruga. Smjer čitanja boja je od boje koja je bliža jednom kraju tijela otpora. Vrijednosti i značaj pojedinih pruga za oznaku sa 4 pruge date su u tabeli 2. Kod oznaka sa pet pruga prve tri su cifre, četvrta je faktor množenja a peta tolerancija.

Tabela 2. Označavanje otpornika bojama

BOJA	Prva cifra	Druga cifra	Faktor množenja	Tolerancija
	Prva pruga	Druga pruga	Treća pruga	Četvrta pruga
Srebrna				$\pm 10\%$
Zlatna				$\pm 5\%$
Crna		0	$10^0$	
Smeđa	1	1	$10^1$	
Crvena	2	2	$10^2$	
Narančasta	3	3	$10^3$	
Žuta	4	4	$10^4$	
Zelena	5	5	$10^5$	
Plava	6	6	$10^6$	
Ljubičasta	7	7	$10^7$	
Siva	8	8	$10^8$	
Bijela	9	9	$10^9$	



Slika 21. Primjer čitanja nominalne vrijednosti otpora prema bojama

### 1.4.3. Tipovi i označavanje kondenzatora

Kondenzatori su pasivni elektronički elementi sa sposobnošću akumuliranja naboja. Osnovni parametri kondenzatora su: kapacitivnost, nominalni napon i tolerancija.

Kapacitet (C) predstavlja mjeru uskladištenog naboja pri određenom naponu:  $Q=CU$ . U ovisnosti od tipa kondenzatora vrijednosti kapaciteta kondenzatora koji se koriste se kreću od nekoliko pF do nekoliko desetina hiljada  $\mu\text{F}$ .

Nominalni napon je maksimalni napon koji smijemo trajno dovesti na obloge kondenzatora, a da ne dođe do proboja dielektrika. Kondenzatori koji su standardno u upotrebi imaju ovaj napon od nekoliko volti do nekoliko stotina volti.

Postoji jako mnogo vrsta kondenzatora i sa stanovišta upotrebe treba spomenuti dvije grupe: elektrolitske i ostale. Elektrolitski kondenzatori za skladištenje napona koriste kemijske procese te je u tom smislu važan smjer električnog polja koje formira odgovarajuću hemijsku reakciju. Ako se smjer polja promijeni dolazi do trajnog oštećenja kondenzatora odnosno do njihovog proboja. Zato se na ovim kondenzatorima uvijek označava polaritet elektroda i prilikom priključenja napona o tome treba voditi računa. Kapacitet ovih kondenzatora je u pravilu visok (od 1  $\mu\text{F}$  do 10000  $\mu\text{F}$ ) i oni se koriste tamo gdje je neophodno imati velike kapacitivnosti. Za razliku od njih ostali tipovi kondenzatora imaju ravnopravne elektrode koje su obično metal između kojih je dielektrik, te ne razlikujemo polaritet. Kapacitet ovih kondenzatora je u pravilu niži (od 1pF do 10 $\mu\text{F}$ ).

Parametri kondenzatora se označavaju natpisom na tijelu. Natpis se sastoji od oznake vrijednosti kapacitivnosti i ako je to potrebno oznake vrijednosti maksimalnog radnog napona i oznake tolerancije.

U našoj laboratoriji uglavnom ćemo koristiti kondenzatore sa kapacitetima:

10nF, 22nF, 33nF, 47nF, 68nF, 100nF, 220nF, 330nF, 470nF, 680nF, 1 $\mu\text{F}$ , 2,2 $\mu\text{F}$ ; 3,3 $\mu\text{F}$ , 4,7 $\mu\text{F}$ ; 6,8 $\mu\text{F}$  i 10 $\mu\text{F}$  iz grupe ostalih i 1 $\mu\text{F}$ , 10 $\mu\text{F}$ , 22 $\mu\text{F}$ , 47 $\mu\text{F}$ , 100 $\mu\text{F}$ , 220 $\mu\text{F}$ , 470 $\mu\text{F}$ , 1000 $\mu\text{F}$ , 2200 $\mu\text{F}$ , 4700 $\mu\text{F}$  i 10000 $\mu\text{F}$ .

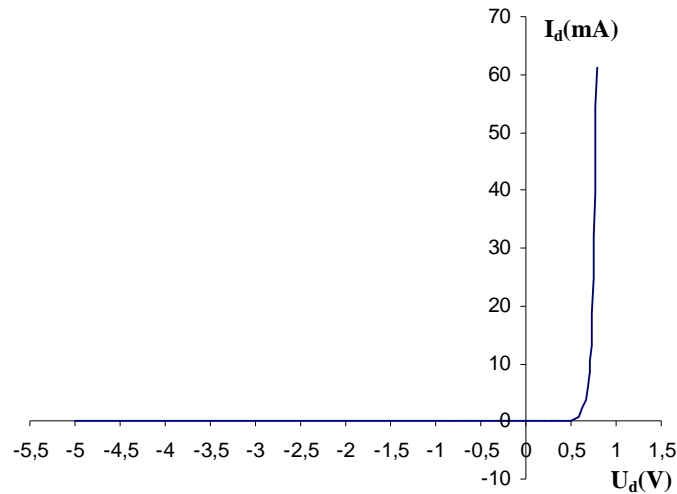
Elektrolitski i blok kondenzatori imaju na tijelu jasan natpis kapaciteta, gdje se, ako to nije naznačeno, broj odnosi na vrijednost izraženu u  $\mu\text{F}$ . Keramički kondenzatori imaju samo broj čije značenje je slijedeće: prva dva broja su cifre a treći broj je broj nula izraženo u pF. Na primjer: natpis 105 ima značenje 1000000pF odnosno 1 $\mu\text{F}$ , ili 223 ima značenje 22000pF ili 22nF.

Kod elektrolitskih kondenzatora treba obavezno obratiti pažnju pored polariteta i na nazivni napon. Iako to vrijedi za sve tipove kondenzatora elektrolitski kondenzatori su karakteristični zato što je taj napon često nizak (16V, 25V, 35V, 63V).

Ovdje treba napomenuti još jednu sitnicu – često na šemama možemo vidjeti paralelno spojena dva kondenzatora jedan elektrolitski većeg kapaciteta i drugi keramički manjeg kapaciteta. Iako račun ne pokazuje da su neophodna oba oni se stavljaju i svaki ima svoju funkciju. Kondenzator sa velikim kapacitetom je elektrolitski i ne reaguje na brze promjene napona, zato se njemu stavlja paralelno i keramički kondenzator koji se koristi za filtriranje visokofrekventnih smetnji. Još jedna napomena za elektrolitski kondenzator vezana je takođe uz elektrolit koji se koristi za akumulaciju naboja (jona). Naime ovaj elektrolit se nalazi u tečnom stanju te je vremenom podložan isušivanju, što karakteristike ovih kondenzatora čini vremenski ovisnim. Zato se ovi kondenzatori javljaju kao jedan od čestih uzroka pogrešnog rada uređaja.

#### 1.4.4. Tipovi i označavanje dioda

Diode se danas uglavnom formiraju kao pn spojevi i sva teorija rada dioda se zasniva na teoriji pn spojeva. U električnim krugovima dioda se ponaša kao nelinearni element čija struja zavisi od priključenog napona. Tipična karakteristika Si diode prikazana je na slici 22. a njena funkcionalna zavisnost struje i priključenog napona je data izrazom 6.



Slika 22. Tipična I/U karakteristika Si diode

$$I_d = I_s \left( e^{\frac{U_d}{mU_T}} - 1 \right) \quad (6)$$

Ovdje je  $I_s$  inverzna struja zasićenja,  $U_d$  napon na diodi,  $U_T$  naponski ekvivalent temperature i iznosi  $kT/q$ , gdje je  $k=1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K Boltzmanova konstanta,  $T$ -temperatura ambijenta u °K,  $q=1,6 \cdot 10^{-19}$  C naboj elektrona. Pri sobnoj temperaturi (20°C) ovaj napon iznosi  $U_T=25,6$  mV,  $m$  je koeficijent ovisan o iznosu struje kroz diodu i za Si pn prelaze kod malih i velikih struja  $m=2$ , a kod srednjih struja  $m=1$ . Karakteristiku na slici 22 dobili smo prema izrazu 6 pri čemu smo uzeli da je  $I_s=0,1 \mu\text{A}$ ,  $T=20$  °C,  $m=2$ .

#### **Ekspiriment 1**

Korištenjem izraza  $I_d = I_s \left( e^{\frac{U_d}{mU_T}} - 1 \right)$  izmjeriti struju  $I_s$  za nekoliko tipova dioda. Snimiti najmanje jednu karakteristiku Ge diode i karakteristike najmanje dvije Si diode različitih tipova. Vježbu izvesti pri sobnoj temperaturi.

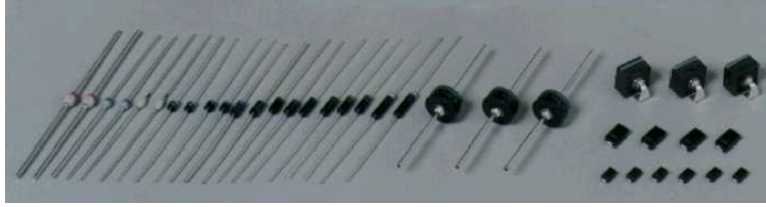
Parametri dioda su:

*Nominalna propusna (direktna) struja* –  $I_D$  je maksimalna dozvoljena trajna struja diode pri kojoj se ne prekorači dozvoljeno zagrijavanje pri nominalnim uslovima hlađenja.

*Nominalni propusni (direktni) napon* –  $U_D$  je pad napona na propusno polariziranoj diodi pri nominalnoj propusnoj struji.

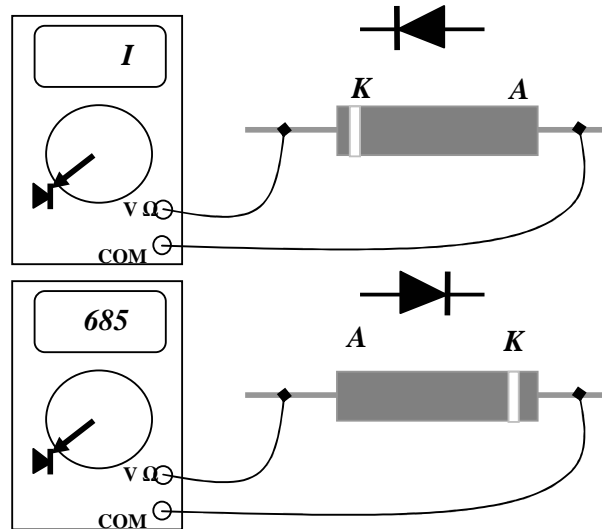
*Nominalni nepropusni (zaporni) napon* –  $U_R$  je maksimalna vrijednost napona kojeg nepropusno polarizirana dioda može podnijeti trajno bez opasnosti da će nastupiti proboj.

*Nominalna nepropusna (zaporna) struja* –  $I_S$  je struja koja teče kroz diodu pri nominalnom inverznom naponu  $U_R$ .



Slika 23. Različiti oblici poluprovodničkih dioda

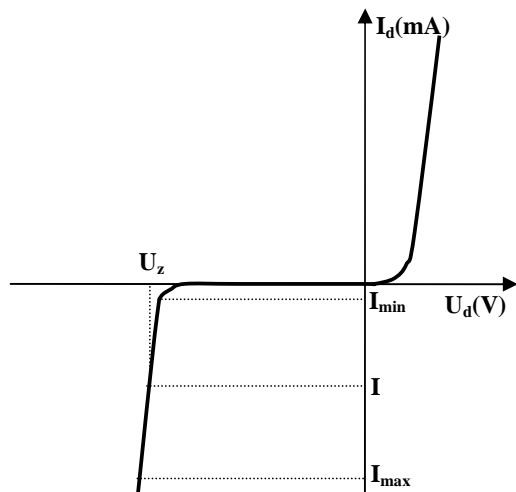
Većina dioda ima valjkast oblik i tada je katoda označena sa prstenom, ukoliko to nije slučaj na tijelu diode je oznaka elektroda. Ako nemožemo nikako identificirati elektrode po natpisu ili obliku onda možemo to pokušati instrumentom. Spojimo + kraj instrumenta na elektrodu za koju pretpostavljamo da je anoda, a – kraj na katodu. Koristimo područje na instrumentu označeno znakom diode. Instrument će pokazati napon direktno polarisanog pn spoja (za Si diode oko 0.7V). Ukoliko pretpostavljeni smjer nije dobar instrument će pokazivati da nemože izmjeriti ( $I$ ), tada okrenemo polaritet diode i ako je dioda ispravna dobićemo traženi napon (slika 24).



Slika 24. Mjerenje napona direktno polarisanog pn spoja

Pored standardnih dioda o kojima smo govorili postoje i mnoge specijalne diode kao što su: zener diode (Zenerove diode), LED diode, tunnel diode, varikap diode itd. Mi ćemo u toku rada koristiti zener diode i LED diode te ćemo ovdje dati osnovne karakteristike tih dioda.

Zener diode isto tako imaju nelinearnu strujno/naponsku karakteristiku, pri čemu je ona identična običnoj diodi za direktnu polarizaciju a razlikuje se u dijelu inverzne polarizacije. Ta razlika je osnovna odlika karakteristike zener diode i ona se koristi upravo u ovom dijelu. Na slici 25 data je tipična karakteristika zener diode i naznačeni osnovni parametri koji je određuju. Kao što vidimo bitan nam je Zenerov napon  $U_z$ , radna struja u oblasti Zenerovog napona  $I$ , minimalna  $I_{min}$  i maksimalna struja u oblasti Zenerovog napona  $I_{max}$ , dinamički otpor  $R_z$ . Pored navedenih karakteristika koje su opisane na samom dijagramu važna je još disipacija. Ovaj podatak se nalazi u katalogu i o njemu treba voditi računa kada formiramo električne krugove sa zener diodama. Jednostavno vodimo računa da radna struja bude na  $\frac{1}{2}$  maksimalne, a maksimalnu određujemo iz poznate disipacije prema obrascu:  $I_{max} = P/U_z$ .



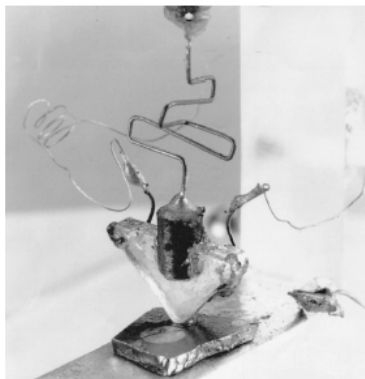
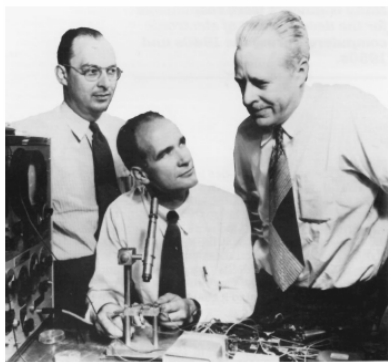
$$R_z = \Delta U / \Delta I$$

Slika 25. Karakteristika zener diode

Kod označavanja zener dioda važan je raspored elektroda i on se označava na isti način kao kod običnih dioda, i važan je Zenerov napon. Zenerov napon se obično ispisuje na tijelo diode u obliku 6V8 (6,8V), 12V (12V) itd. Kod nas u laboratoriju su na raspolaganju slijedeće zener diode: 3V9, 5V1, 6V8, 10V, 12V, 15V sve sa disipacijom od 1/4W.

Kod LED dioda karakteristika je po obliku ista kao kod obične diode pri čemu napon pn spoja u provodnom smjeru zavisi od tipa LED diode. On se kreće od 1.5V do 2V što zavisi od boje korištene diode. Kod LED dioda katoda se označava isječkom na tijelu. Mi ćemo uglavnom koristiti crvene, zelene i žute LED sa 5mm razmaka među izvodima elektroda i radnom strujom od 10mA.

#### 1.4.5. Tipovi i označavanje tranzistora



Slika 26. 1947. godine trojica naučnika John Bardeen, William Shockley i Wallter Brattain u Bell Laboratories u Americi su realizirali prvi bipolarni transistor (slika desno). Transistor je bio realiziran na bazi poluprovodnika germanijuma.

Tranzistori (transfer - resistor) su bez sumnje najviše korištene poluprovodničke elektroničke komponente. Rad tranzistora, kao i ostalih poluprovodničkih komponenti, baziran je na teoriji PN prelaza i detaljno obrađen u predmetu Elektroničke komponente i sklopovi, te ovdje nećemo ponavljati tu teoriju. Zato ćemo dati samo osnovne napomene vezane za rad na

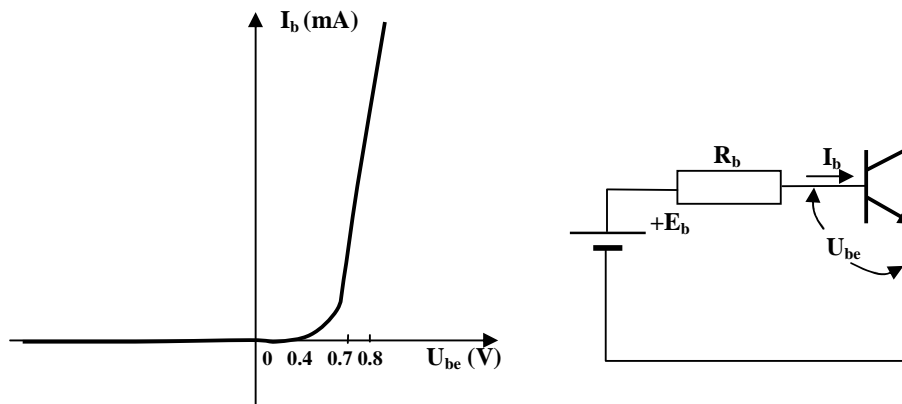


praktikumu dok će sve ostale potrebne detalje studenti moći pogledati u katalogima. Mi ćemo se koristiti sa dva tipa tranzistora: bipolarnim (BC107, BC141, BC177, BC161...) i unipolarnim (BS170...).

Da bismo osvježili ranije stečena znanja i jednostavnije shvatili rad sklopova na bazi tranzistora ovdje ćemo dati uporedne opise rada bipolarnih tranzistora (NPN tipa) i unipolarnih (MOSFET sa induciranim kanalom). Na bazi ovih analiza studenti će jednostavno moći razumjeti i korištenje ostalih tipova tranzistora.

Tranzistori se koriste kao pojačavači ili strujni izvori kada tranzistori rade u linearnom režimu rada i prekidački elementi kada tranzistori rade u prekidačkom režimu rada. I jedna i druga primjena dominantno koristi spoj sa zajedničkim emiterom (ZE) odnosno spoj sa zajedničkim sorsom (ZS) te ćemo zato dati opis samo ovih spojeva.

Ulazna karakteristika bipolarnih tranzistora je identična karakteristici diode jer se spoj BE (baza-emiter) ponaša kao pn spoj (dioda). Ova karakteristika vrlo malo zavisi od napona  $U_{ce}$  i za analizu možemo uzeti bilo koju iz familije ovih krivih slika 27.



Slika 27. Ulazna karakteristika bipolarnih tranzistora

Kako koristimo navedenu karakteristiku? Da bi tranzistor imao uslove za vođenje potrebno je da postoji struja baze  $I_b$ . Sa karakteristike vidimo da je ova struja jednaka nuli za  $U_{be} < 0$  te da se tek pri nekim naponima (oko 0,4V) pojavljuje struja  $I_b$ , zatim raste polagano do nekih 0,7 V napona  $U_{be}$ , da bi poslije dosta brzo rasla za male promjene napona  $U_{be}$ . Struja  $I_b$  je

dominantno određena naponom  $E_b$  i otporom  $R_b$  prema relaciji:  $I_b = \frac{E_b - U_{be}}{R_b}$ , iz koje se vidi

da ako je  $E_b > 0,7$  pri tome napon  $U_{be}$  ostaje uglavnom konstantan (prema karakteristici vrlo malo se mijenja), onda se struja  $I_b$  računa kao  $I_b = \frac{E_b - 0,7}{R_b}$ . Na osnovu ove karakteristike

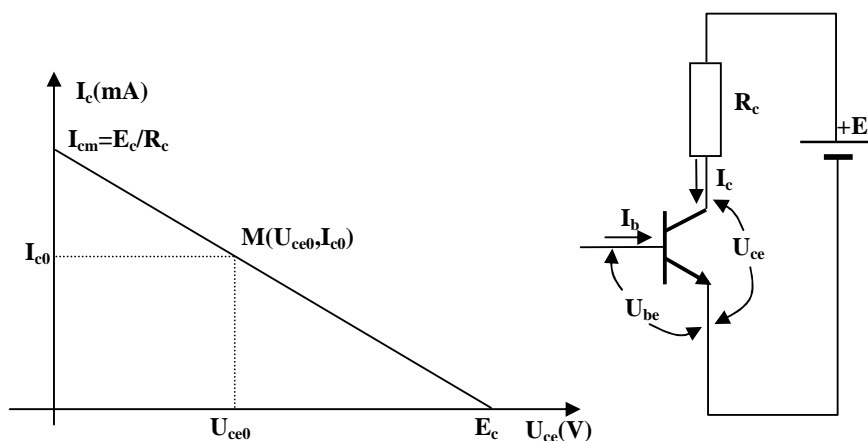
mjerenjem ili napona  $U_{be}$  ili struje  $I_b$  možemo odrediti da li tranzistor ima uslove da vodi ili ne. Ako je napon  $U_{be} > 0,4V$  tranzistor ima uslove da vodi, ako nije onda nema. Ovo sve vrijedi za Si tranzistore koje ćemo mi koristiti za vježbanje. Ovako stroga granica ipak se ne koristi u aplikacijama nego se uzima da ako je napon  $U_{be} < 0$  tranzistor je zakočen (ne vodi), a ako je  $U_{be}$  oko 0,7V onda vodi. Znači po osnovu napona  $U_{be}$  možemo odrediti da li tranzistor ima uslove da vodi ili ne. Ako tranzistor vodi onda može biti u linearnom režimu ili u zasićenju. Ovo se određuje iz uslova vezanih uz kolektorski krug tranzistora. Za to će nam poslužiti radna prava tranzistora data slikom 28. Sa slike je jasno da se kolektorski krug može opisati relacijom:  $E_c = I_c R_c + U_{ce}$ , koja za konstantno  $R_c$  i  $E_c$  predstavlja duž koja leži na pravcu:

$$I_c = \frac{E_c}{R_c} - \frac{U_{ce}}{R_c} \quad (7)$$

a čije su krajnje tačke dodirne tačke sa horizontalnom ( $I_c=0, U_{ce}=E_c$ ) i vertikalnom ( $I_c=I_{cm}, U_{ce}=0$ ) osom. Radna tačka tranzistora može ležati samo na pravcu definiranim ovim tačkama i to za sve vrijednosti koje se nalaze između navedenih tačaka. Tačka ( $I_c=0, U_{ce}=E_c$ ) predstavlja zakočen tranzistor. Tačka ( $I_c=I_{cm}, U_{ce}=0$ ) predstavlja tranzistor sa maksimalnom strujom koja za date  $R_c$  i  $E_c$  može teći u kolektorskom krugu i kažemo da je tranzistor u zasićenju. Ako se radna tačka nalazi negdje između ovih vrijednosti onda je tranzistor u linearnom režimu i tada vrijedi relacija:

$$I_c = \beta I_b, \quad (8)$$

gdje je  $\beta$  faktor strujnog pojačanja tranzistora u spoju sa zajedničkim emiterom. Ovaj faktor se daje kao kataloški podatak sa oznakom  $h_{fe}$  ( $h_{21}$ ) i može iznositi od nekoliko do nekoliko stotina.



Slika 28. Radna prava i kolektorski krug tranzistora

Kod realnih tranzistora kada tranzistor ode u zasićenje njegov napon  $U_{ce}$  ne padne potpuno na nulu. Mi uzimamo da ako je taj napon manji od 200mV tranzistor je u zasićenju. Za većinu proračuna može se uzimati da je napon  $U_{ce}=0$  kada je tranzistor u zasićenju. Isto tako napon  $U_{be}$  tada dostigne napon  $U_{be} \geq 0.7V$  i računom uzimamo da je on jednak 0.7V. Ako se napon  $U_{ce}$  nalazi između vrijednosti 200mV i  $E_c$  onda kažemo da je tranzistor u linearnom režimu, tada za račun možemo uzimati da je  $U_{be}=0.6V$ . Ako je napon  $U_{ce}=E_c$  onda tranzistor ne vodi i uzimamo da je  $I_c=0$  i  $U_{be} \leq 0$ . Iz ovih analiza je jasno da se mjerenjem samo napona  $U_{ce}$  može odrediti režim rada tranzistora:

$$U_{ce} = \begin{cases} \leq 200mV, & \text{zasićenje} \\ 200mV \leq U_{ce} < E_c, & \text{linearan režim} \\ = E_c, & \text{zakocen.} \end{cases} \quad (9)$$

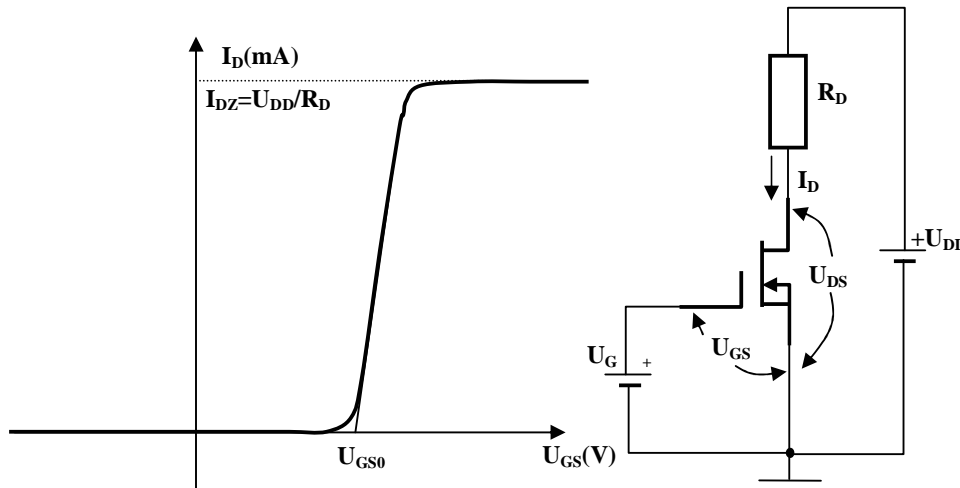
Iako gornja relacija pokazuje da je za režim rada tranzistora dovoljno mjeriti samo napon  $U_{ce}$  u praksi se uvijek mjeri i napon  $U_{be}$ . Razlog je vrlo jednostavan kada mjerimo ove napone mi istovremeno provjeravamo i ispravnost rada tranzistora. Mjerenje napona  $U_{ce}$  bilo bi dovoljno ako bismo bili unaprijed sigurni da je tranzistor ispravan i da je korektno povezan na šemi. Pošto je upravo to vrlo često dilema onda mjerimo oba ova napona. Slijedeća tabela pokazuje režime rada tranzistora, konkretne vrijednosti ovih napona te jednačine koje tada koristimo za

opis tranzistora. Vrijednosti se odnose za Si tranzistore malih snaga kao što je recimo BC107 i slični, ali orijentaciono mogu poslužiti i za sve druge silicijeve tranzistore.

Tabela 3. Režimi rada tranzistora

	$U_{be}$	$U_{ce}$	Jednačine
Tranzistor je zakočen	$U_{be} \leq 0.4V$	$U_{ce} = E_c$	$I_c = 0, I_b = 0, U_{ce} = E_c, U_{be} \leq 0$
Tranzistor je u linearnom režimu	$0.4V \leq U_{be} \leq 0.7V$	$200mV < U_{ce} < E_c$	$I_c = \beta I_b, U_{ce} = E_c - I_c R_c, U_{be} = 0.6$ $I_b = (E_b - 0.6)/R_b$
Tranzistor je u zasićenju	$U_{be} \geq 0.7V$	$\leq 200mV$	$I_c = E_c/R_c, U_{ce} = 0, U_{be} = 0.7$ $I_b = (E_b - 0.6)/R_b$

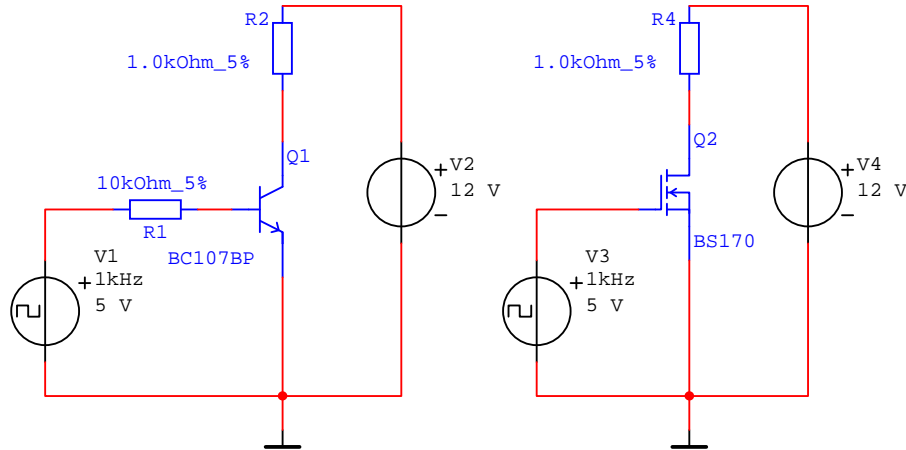
Unipolarni tranzistori za svoj rad koriste samo jednu vrstu naboja elektrone ili šupljine. Ima ih više vrsta, ali za praktičnu primjenu je najinteresantniji MOSFET. Ovi tranzistori imaju na ulazu (gate, G) metaliziranu elektrodu odvojenu oksidom od vodljivog kanala (Drain, D-Source, S), tako da je ulazni otpor ovih tranzistora vrlo visok, odnosno ulazna struja bliska nuli. Ulaz se ponaša kao kapacitet. Za statičke proračune uzimamo da je ulazna struja jednaka nuli. Za promjene ulaznog napona u vremenu ( $u_g(t)$ ) postojeće ulazna struja ( $i_g = f(du_g(t)/dt)$ ) na isti način kao što je to slučaj na kapacitetu. Ulazni napon svojim električnim poljem mijenja širinu provodnog kanala te time mijenja otpor između uvoda i odvoda odnosno mijenja struju drejna  $I_D$ . Tako da je za unipolarne tranzistore ključna karakteristika koja povezuje napon na gejtu i struju drejna tj.  $I_D = f(U_{GS})$ .



Slika 29. Prenosna karakteristika MOSFET-a

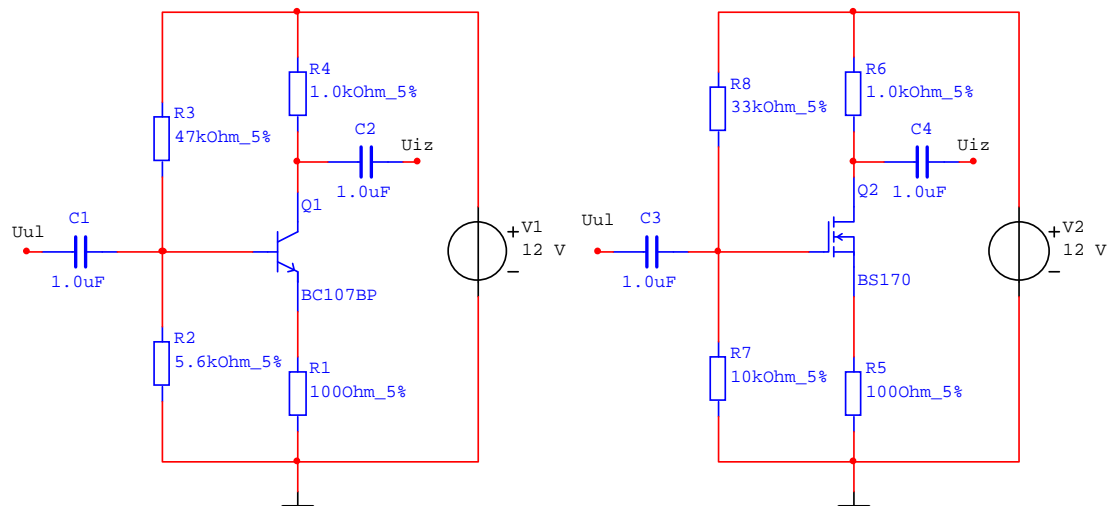
Na slici 29 pokazana je prenosna karakteristika MOSFET tranzistora pomoću koje je najjednostavnije objasniti rad ovih tranzistora. Za primjer je uzet tranzistor sa induciranim kanalom te je pri naponu  $U_{GS} = 0$  struja drejna  $I_D = 0$ . Struja  $I_D$  se pojavi tek pri dostizanju nekog ulaznog napona koji se zove napon praga ( $U_{GS0}$ ). Taj napon zavisi od geometrijskih karakteristika konkretnog tranzistora (debljina oksida), te od koncentracije primjesa u poluprovodniku. Fabričkom kontrolom geometrije tranzistora i koncentracije primjesa moguće je ovaj napon mijenjati u širim granicama. Ovaj napon se daje kao kataloški podatak i za tranzistor BS170 iznosi 2,2V. Pri dostizanju napona praga tranzistor će početi voditi, a struja  $I_D$  će zavisiti od ovog napona. Ta zavisnost je kvadratna i u dijelu gdje tranzistor izrazito vodi a nije dostignuta tačka zasićenja može se napraviti linearna aproksimacija ove zavisnosti. Kada struja  $I_D$  dostigne svoju maksimalnu vrijednost određenu sa  $U_{DD}$  i  $R_D$  onda tranzistor ulazi u područje zasićenja. Radna prava tranzistora ima isti oblik kao kod bipolarnih

tranzistora i s te strane ne postoji neka bitna razlika. Suštinska je razlika u ulaznoj karakteristici. Kod primjene ovih tranzistora kao prekidača ulazni napon postavljamo tako da u slučaju kada tranzistor vodi ulazni napon obezbijedi struju zasićenja, a kada ne vodi da sigurno ne teče nikakva struja. Za jedan i za drugi tip tranzistora kao prekidača šema je data na slici 30.



Slika 30. Bipolarni i MOSFET tranzistor kao prekidač

Kod korištenja tranzistora kao pojačavača koriste se šeme kao na slici 31. Na šemama se vide otporni djelitelji u krugu baze (gejta) čija je uloga da postavi mirnu struju baze odnosno napona gejta u tačku pri kojoj će kolektorski krug odnosno krug drejna biti na sredini aktivne oblasti. Eksperimentalno ta tačka se može postaviti tako da bude  $U_{ce}=E_c/2$  ( $U_{DS}=U_{DD}/2$ ). Zatim, postoji otpor u grani emitera odnosno sorsa čiji je zadatak da radnu tačku učini stabilnijom. Ako pogledamo strmine obiju karakteristika jasno je da pri vrlo malim promjenama napona  $U_{be}$  i napona  $U_{GS}$  kada tranzistori počinju da vode dolazi do velikih promjena struje  $I_c$  odnosno  $I_D$ . To dalje znači da ćemo imati veliko pojačanje i osjetljive spojeve na smetnje (šumove). Uvođenjem ovih otpora uvodi se negativna povratna sprega, ukupno pojačanje se smanji, ali zato imamo stabilniju radnu tačku i ono što je najvažnije strminu smanjimo što dovodi do proširenja opsega promjene ulaznih napona za koje će pojačalo raditi u linearnoj oblasti. Kapaciteti na ulazu i izlazu imaju zadatak da razdvoje istosmjernu nivoe izvora ulaznog signala i izlaza a da puštaju samo izmjenične komponente.



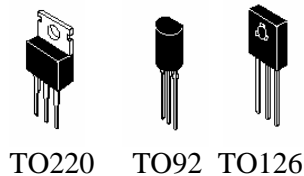
Slika 31. Spoj pojačavača sa bipolarnim i MOSFET tranzistorom

## Eksperiment 2

Eksperimentalno odrediti vrijednosti otpora u djelatlju baze, odnosno gejta pojačavača na bazi tranzistora: BC107, BC141, BS107, BS170 tako da radna tačka bude u sredini aktivne oblasti. Koristiti napon napajanja 12V. Ostale komponente uzeti kao u primjeru sa slike 31. Na ulaz tako realiziranih pojačavača dovesti sinusni signal frekvencije 1kHz i amplitude koja će na izlazu dati amplitudu  $8V_{pp}$ . Snimiti signale u svim karakterističnim tačkama. Upustvo za realizaciju: neka asistent pokaže kompletnu proceduru za jedan tranzistor, a onda svi studenti će pojedinačno to primijeniti na ostala tri tranzistora.

Pakovanje tranzistora

Tranzistori se pakuju u metalna ili plastična kućišta različitih oblika i veličina razvrstanih u nekoliko standardnih tipova: TO5, TO52, TO126, TO92, TO220 itd.

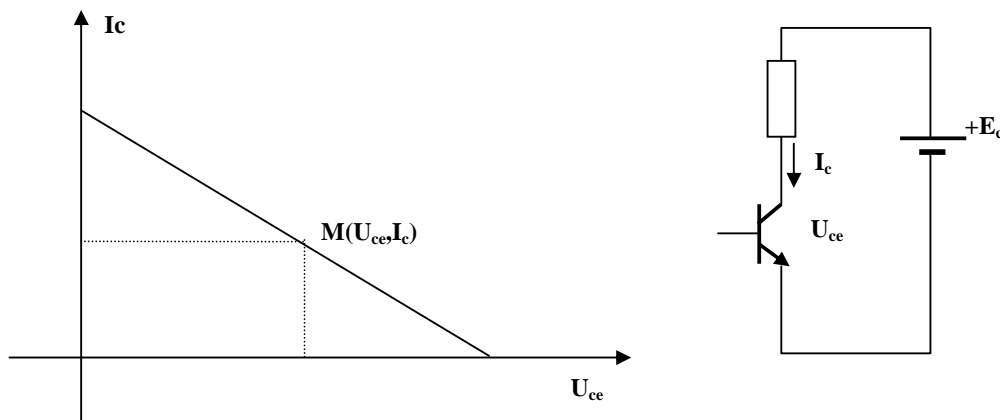


Slika 32. Standardna kućišta tranzistora

### 1.4.5.1. Hladnjaci

Radna tačka tranzistora definirana je strujom  $I_c$  ( $I_d$ ) i naponom  $U_{ce}$  ( $U_D$ ) određenih pravcem koji definira radna prava (slika 33). Snaga koja se oslobađa na tranzistoru definirana je proizvodom struje  $I_c$  i napona  $U_{ce}$ . Ako se u kolektorskom krugu nalazi otpor  $R_c$  i krug se napaja napajanjem  $E_c$  onda je snaga određena sa:

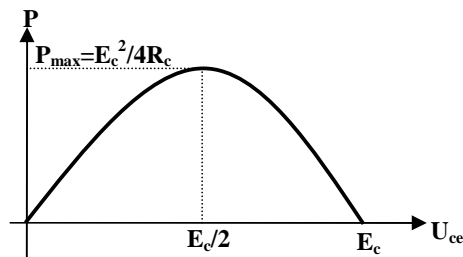
$$P = I_c U_{ce} = \frac{U_{ce}}{R_c} (E_c - U_{ce}) \quad (10)$$



Slika 33. Određivanje snage na tranzistoru

Jednačina 10 predstavlja parabolu koja u tačkama  $(0, E_c)$  presjeca osu  $U_{ce}$  i za  $U_{ce} = E_c/2$  dostiže svoj maksimum (slika 34) koji iznosi:

$$P_{\max} = \frac{E_c^2}{4 \cdot R_c} \quad (11)$$



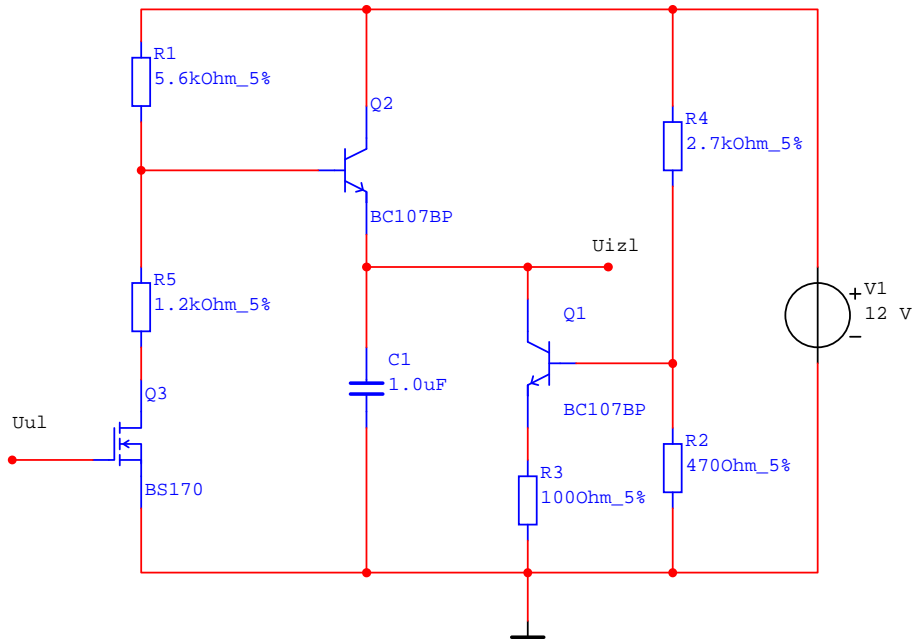
Slika 34. Dijagram snage na tranzistoru

Pošto snaga u vremenu predstavlja energiju, a navedena energija se na tranzistoru pretvara u toplotu onda je jasno da se ona nemože zanemariti. Nekoliko je važnih činjenica koje treba imati u vidu kada je ova energija u pitanju. Pretvaranje navedene energije u toplotu znači njeno trajno gubljenje što kod tranzistora snage nije zanemarivo, posebno ako se radi o velikom broju takvih jedinica. Treba stalno imati na umu da se broj kućanskih aparata koji u sebi imaju tranzistore koji se griju danas mjeri milijardama i da gotovo neprekidno rade, neka je na svakom od njih disipirana snaga samo 1W onda je jasno o kojim količinama energije se radi. Interesantan je podatak da je Japanska vlada 90-tih godina izdvojila milijarde dolara novca da se istraži mogućnost smanjenja potrošnje energije kućanskih aparata za samo nekoliko procenata. Drugi problem je veliki broj tranzistora u jednom integriranom krugu. Danas su mikroprocesori postali tako kompleksni da se grade na bazi desetina miliona tranzistora (zadnja informacija 120 miliona) integriranih na samo jedan čip. Neka svaki od tranzistora disipira snagu  $1 \mu\text{W}$  dobijemo 120W. Snaga tih čipova se kreće od nekoliko W do nekoliko desetina W. Temeljno pitanje daljeg razvoja mikroprocesora jeste kako se osloboditi ovakve toplote. Naime poznato je da ako se tijelo zagrijava, a mi ne odvodimo tu toplotu temperatura tijela će rasti. Rad poluprovodnika je jako ovisan o temperaturi i tu nastupaju problemi. Ovdje se problemi djelimično rješavaju izborom režima rada tranzistora. Naime ovdje tranzistori rade u prekidačkom režimu, te u svojim krajnjim vrijednostima imaju ili struju nula ili napon nula, međutim prelazak iz jednog stanja u drugo zahtjeva prolazak kroz aktivnu oblast a samim time i preko cijele krive snage, a ako se to izvodi milijardu puta u sekundi (procesori rade na GHz) onda je jasno o čemu se radi. Ovo su jako važna pitanja kojima se danas bavi mikroelektronika i o kojima će biti riječi na nekom od narednih kurseva. Za nas na ovom nivou od posebne su važnosti rad diskretnih tranzistora u linearnom režimu. Postoje mnoge primjene gdje je to prisutno. Ako se oslobađanje toplote nemože izbjeći onda je nužno napraviti efikasan sistem za njeno odvođenje. Za takvo nešto koriste se hladnjaci. Hladnjaci predstavljaju metalne (uglavnom aluminijumske) nastavke koje montiramo na tijelo tranzistora da bismo mu povećali kontaktnu površinu sa okolinom i time omogućili bržu razmjenu toplote (odvođenje toplote). Ovih hladnjaka ima jako mnogo vrsta. Razlikuju se po obliku, veličini itd. Montiranje hladnjaka na tranzistor se izvodi tako što se metalno tijelo tranzistora vezuje za tijelo hladnjaka. Treba znati da je metalno tijelo tranzistora na potencijalu kolektora te da će se isti napon pojaviti na hladnjaku. Ukoliko iz bilo kojih razloga ne smijemo dozvoliti pojavu napona kolektora na tijelu hladnjaka onda se prilikom montaže između tijela tranzistora i tijela hladnjaka stavlja izolacioni materijal. Izolacioni materijal treba biti takav da je dobar provodnik toplote. Inače treba znati da radna temperatura kućišta tranzistora može biti i blizu  $100^\circ\text{C}$ .

## 1.4.5.2. Primjer analize elektronskih sklopova na bazi tranzistora

Efikan rad sa kolima na bazi tranzistora zahtjeva dosta znanja i iskustva. Da bismo dostigli potreban nivo znanja, u relativno kratkom vremenu, vrlo je važno poštivati neke dobro poznate principe. Zato ćemo na samom početku detaljno objasniti kako analiziramo sklopove na bazi tranzistora realizirane u diskretnoj tehnici. Za primjer uzet ćemo sklop sa slike 35. Prvo pravilo jeste: *poznavati šta sklop radi*. Nagađati funkciju sklopa po osnovu signala koje dobijemo na ožičenom sklopu je neoprostiva greška, jer nikada nismo sigurni da li sklop ispravno radi, niti znamo šta će sklop raditi ako nešto promijenimo, na primjer ulazni signal ili opterećenje itd. Sva ova pitanja nemaju kvalitetan odgovor ako unaprijed ne poznajemo funkciju sklopa. Čak i kada se radi o 'našem' sklopu koji mi realiziramo prema svojoj zamisli i tada mi očekujemo neku funkciju sklopa i prema tom očekivanju vršimo analizu (mjerenja). Zato ćemo prvo objasniti šta sklop radi.

Sklop je generator pile. Sličnu verziju generatora pile studenti će detaljno raditi u predmetu 'Digitalna elektronika'. Sklop radi na slijedeći način. Kondenzator C se naizmjenično puni i prazni. Punjenje ide velikom strujom preko tranzistora  $Q_2$  (maksimalnom koju  $Q_2$  smije da vuče), a zatim se kondenzator prazni preko tranzistora  $Q_1$  konstantnom strujom koja se unaprijed zada. Upravljanje punjenjem i pražnjenjem kondenzatora se izvodi preko prekidača realiziranog sa MOSFET tranzistorom  $Q_3$ , pri čemu prekidačem upravljaju pravougaoni impulsi 0-5V. Za vrijeme dok je ulazni impuls na naponu 5V  $Q_3$  vodi (u zasićenju je) i baza tranzistora  $Q_2$  ide na niži napon (on se privremeno koči). Napon koji se formirao na kondenzatoru će pod djelovanjem strujnog izvora  $Q_1$  linearno opadati jer  $Q_1$  radi u linearnom režimu. Naime  $Q_1$  sve vrijeme vuče konstantnu struju odnosno ponaša se kao strujni izvor.



Slika 35. Šema sklopa za analizu

Promjena napona  $U_c$  se odvija po zakonu:

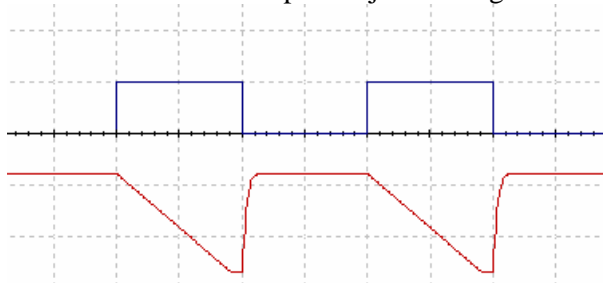
$$\Delta U_c = \frac{I}{C} \cdot \Delta T \quad (12)$$

pri čemu napon opada. Minimalna vrijednost ( $U_{cmin}$ ) do koje će biti ispražnjen kondenzator je određena djeliteljem  $R_1$ - $R_5$  jer će pri kraju napon  $U_c$  dostići vrijednost pri kojoj će se struje

kroz  $Q_1$  i  $Q_2$  izjednačiti. Kada ulazni napon padne na nulu  $Q_3$  se zakoči tada vodi  $Q_2$  sa strujom koja je približno jednaka:

$$I_{cQ2} = \beta \cdot I_{bQ2} = \beta \frac{E_c - U_{cmin} - U_{be}}{R_1}. \quad (13)$$

Ova struja ne smije biti veća od maksimalne kolektorske struje korištenog tranzistora. Ako imamo taj problem onda se u kolektorski krug tranzistora  $Q_2$  stavlja mali otpor (stotinjak oma). Iz ovoga slijedi da  $Q_2$  radi u linearnom režimu. Tranzistor  $Q_1$  takođe radi u linearnom režimu pri čemu je njegova struja mnogo manja. Odnos ovih struja određuje vremena punjenja i pražnjenja kondenzatora. Slika 36 pokazuje oblik signala na ulazu i izlazu.



Slika 36. Ulazni i izlazni signali generatora pile

Pošto smo dali opis rada sklopa, ako radimo proračun sklopa onda slijedi taj postupak, a ako je to već učinjeno kao što je ovdje slučaj daćemo samo neke podatke tog proračuna. Amplituda izlaznog signala je 10V, struja pražnjenja kondenzatora je 10mA, te je vrijeme trajanja impulsa prema (12) jednako 1ms. Sklop smo spojili i sada slijedi mjerenje. Drugo pravilo: *prije dovođenja ulaznih impulsa i mjerenja osciloskopom ako je to moguće izvršiti mjerenje istosmjernog režima voltmetrom*. Kod mjerenja voltmetrom dobro je, ako možemo obezbijediti da jednostavnom promjenom ulaza izmjerimo sve istosmjerne nivoe koji se mogu pojaviti u strukturi. Zato ćemo prvo ulaz kratko spojiti na masu ( $U_{ul}=0V$ ), izmjeriti sve napone na svim tranzistorima i napraviti analizu. Zatim ćemo ulaz dovesti na +5V i ponoviti postupak. Konkretno u ovom slučaju vrijednosti dobivene mjerenjem istosmjernih režima su date u tabeli 4.

Tabela 4. Rezultati mjerenja

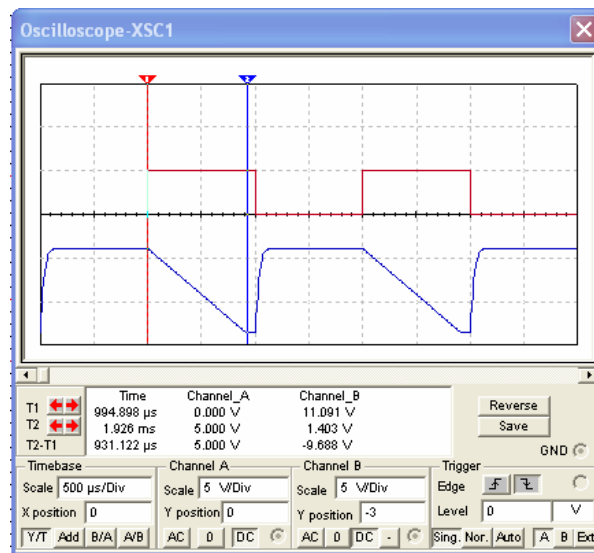
$U_{ul}=0V$			$U_{ul}=5V$		
$E_c$	12	V	$E_c$	12	V
$U_{bQ2}$	11,668	V	$U_{bQ2}$	2,09	V
$U_{DQ3}$	11,654	V	$U_{DQ3}$	6,6	mV
$U_{cQ1}$	10,961	V	$U_{cQ1}$	1,386	V
$U_{eQ1}$	1,061	V	$U_{eQ1}$	1,056	V
$U_{bQ1}$	1,766	V	$U_{bQ1}$	1,764	V

Kada je ulazni napon 0V tranzistor  $Q_3$  ne vodi ( $U_{DQ3}=11,654V$ ) kao što i treba,  $Q_2$  vodi pri tome je  $U_{beQ2}=0,707V$  i  $U_{ceQ2}=1,039V$  iz čega slijedi da radi u linearnom režimu. Struja  $I_{bQ2}=10,5\mu A$ . Kolektorska struja je za  $\beta$  veća, te ako je  $\beta=100$  ova struja je 10mA. Ustvari, ova struja će se izjednačiti sa strujom  $I_{cQ1}$  inače bi se napon  $U_c$  mijenjao, odnosno napon  $U_c$  će se zaustaviti kod izjednačenja ove dvije struje. Napon  $U_{beQ1}=0,705V$ , napon  $U_{ceQ1}=9,9V$ , struja  $I_{eQ1}=10,61mA$ . Znači tranzistor  $Q_2$  radi u linearnom režimu,  $Q_1$  takođe radi u linearnom režimu,  $I_{cQ1} \approx I_{eQ1}=10,61mA$ ,  $U_{cmax}=10,961V$ . Prema tome svi podaci su korektni, dobijeni režimi rada tranzistora kao i potrebne struje i naponi odgovaraju.



Kada je ulazni napon 5V tranzistor  $Q_3$  vodi ( $U_{DQ3}=6,6\text{mV}$ ) i u zasićenju je kao što i treba. Naponi  $U_{beQ2}=0,704\text{V}$  i  $U_{ceQ2}=10,614\text{V}$  pokazuju da  $Q_2$  vodi te da se nalazi u linearnom režimu. Njegove struje iznose  $I_b=I_1-I_D=26\mu\text{A}$  i struja kolektora  $I_{cQ2}\approx I_{eQ2}=I_{cQ1}=10,56\text{mA}$ . Naponi  $U_{beQ1}=0,708\text{V}$  i  $U_{ceQ1}=0,33\text{V}$  pokazuju da  $Q_1$  vodi te da se nalazi u linearnom režimu. Njegove struje iznose  $I_b=I_2-I_3=37,9\mu\text{A}$  i struja kolektora  $I_{cQ1}\approx I_{eQ1}=10,56\text{mA}$ . Navedeni račun pokazuje da su režimi tranzistora dobri te da su svi istosmjerni naponski nivoi korektni. Može malo zbuniti rasipanje struje  $I_b$  za tranzistore  $Q_1$  i  $Q_2$  iako oba rade u linearnom režimu i imaju iste kolektorske struje. Očekivali bismo da su im iste bazne struje, ali nisu. To je zato što tranzistori rade sa velikim strujama kolektora i imaju različite napone  $U_{ce}$  te se i  $\beta$  mijenja. Naime ovaj koeficijent nije konstantan i zavisi od struje i napona na kolektoru te može da se rasipa u širim granicama.

Treće pravilo: tek kada smo završili analizu istosmjernih režima rada i ustanovili da su vrijednosti korektno pristupamo snimanju ulaznih i izlaznih signala osciloskopom. Vidjeli smo da je trajanje fronta signala pile 1ms odnosno period 2ms te ćemo na ulaz dovesti signal četvrtke 500Hz. Osciloskop ćemo priključiti tako da je kanal 1 spojen na ulazni (poznati) signal a kanal 2 na izlazni signal. Rezultati koje ćemo dobiti su prikazani na slici 37.

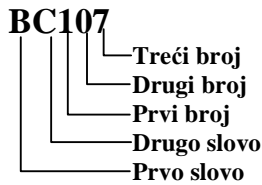


Slika 37. Signali na osciloskopu sa primjera

Slika pokazuje da je trajanje fronta signala 0,931ms a amplituda 9,6V što se malo razlikuje od očekivanog. Korekciju možemo napraviti smanjenjem otpora  $R_5$ . Međutim, to su detalji koje kod ovakvih sklopova uvijek naknadno regulišemo.

#### 1.4.6. Kataloške karakteristike komponenti

Iako poluvodičke strukture imaju dosta standardiziran način označavanja, tako da je iz oznake jasno o kojoj komponenti se radi s obzirom na veliki broj komponenti najbolji način da odgonetnemo o kojoj komponenti se radi i sa kojim karakteristikama, je korištenje kataloških podataka. Na primjer evropski način označavanja poluvodičkih komponenti ima slijedeći format: dva slova i tri broja sa značenjem opisanim u nastavku.



Prvo slovo u oznaci označava materijal izrade poluvodičke komponente, i to:

**A** - germanijum;

**B** - silicijum;

**C** - ostali poluvodički materijali.

Drugo slovo u oznaci označava vrstu poluvodičke komponente, odnosno njenu primjenu, i to:

**A** - dioda kao detektor i varikap dioda;

**C** - niskofrekventni tranzistor ;

**D** - niskofrekventni tranzistor snage;

**E** - tunnel-dioda;

**F** - visokofrekventni tranzistor;

**H** - magnetno osjetljiva dioda;

**L** - visokofrekventni tranzistor snage;

**N** - optokapler;

**P** - foto-poluprovodnik (foto-dioda ili fototranzistor);

**S** - tranzistor - prekidač (za rad u impulsnim kolima);

**U** - tranzistor - prekidač snage;

**T** - tiristor;

**Y** - dioda kao ispravljač;

**Z** - zener dioda;.

Brojevi imaju različita značenja u ovisnosti o tipu komponente o kojoj se radi i ovdje nećemo navoditi te detalje.

Način označavanja poluvodičkih elemenata tipičan za Američko područje se razlikuje od Evropskog i ovdje ćemo dati samo par napomena koje mogu pomoći pri razlikovanju komponenti. Format njihove oznake je broj- slovo- broj.

Prvi broj označava vrstu poluvodičkog elementa, i to:

**1** - dioda;

**2** - bipolarni i unipolarni tranzistori i druge višeslojne strukture.

Slova oznaka je slovo **N** za sve poluvodičke elemente.

Drugi broj predstavlja redni broj konstrukcije poluvodičkog elementa u dotičnoj tvornici i nema značenje vezano za vrstu, strukturu ili način izrade poluvodičkog elementa. Naravno, drugi broj u oznaci može se sastojati iz više cifara.

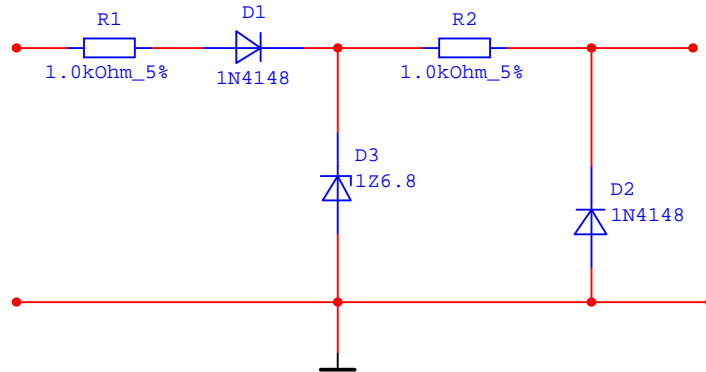
Kao što se vidi iako je označavanje poluprovodničkih komponenti dosta standardizirano s obzirom na veliki broj tih komponenti najbolji način je ipak korištenje kataloga. Na kraju ove skripte daćemo kataloške podatke za neke komponente koje budemo koristili, a studentima se savjetuje da za svaku komponentu koju budu prvi puta koristili pronađu njene kataloške podatke na internetu te ih prilože kao dodatak ovoj skripti.

### **Eksperiment 3**

Proračunati prenosnu karakteristiku sklopa sa slike 38. Na ulaz sklopa dovoditi naponski signal sa promjenjivog naponskog izvora. Mijenjati ulazni napon sa korakom od 0,5V u rasponu od -20 do +20V. Mjeriti izlaz. Nacrtati prenosnu karakteristiku.

Zatim korištenjem XY moda rada snimiti prenosnu karakteristiku sklopa datog sa šemom na slici 38. (Napomena: sklop napajati sa transformatorom 220V:20V).

Poslije snimanja prenosne karakteristike snimiti vremenske oblike signala na ulazu i izlazu.



Slika 38. Diodni uobličavač impulsa

## 2. CAD (Computer Aided Design)

Razvoj računara omogućio je projektovanje uz pomoć računara u svim tehničkim disciplinama: arhitekturi, mašinstvu, elektrotehnici, elektronici, automatici itd. Za svaku od navedenih oblasti postoje namjenski razvijeni alati ili više njih i oni se stalno razvijaju i unapređuju. U oblasti elektronike najpoznatiji softverski paketi ove namjene su: ACCEL EDA, PROTEL, OrCAD, MULTISIM, SPICE, itd.

U procesu projektovanja elektroničkih struktura i sistema naredne četiri važne operacije možemo izvesti krištenjem ovih paketa:

- izrada elektroničkih šema i projektne dokumentacije,
- simulacija elektroničkih krugova,
- izrada maski za štampane ploče,
- priprema za proizvodnju.

Neki softveski paketi sadrže module za sve četiri navedene operacije, dok su neki specijalizirani samo za pojedine operacije.

### 2.1. Izrada elektroničkih šema i projektne dokumentacije

Softverski moduli koji se koriste za crtanje šema (Schematic) su opremljeni bibliotekama simbola komponenata, alatima za editiranje šema, alatima za editiranje simbola novih komponenti, alatima za formiranje izlaznih dokumenata. Kao izlaz iz ovih modula može biti printana verzija šeme sklopa (dokumentacija), spisak korištenih komponenti (Bill of Materijal), polazna šema za simulaciju (ulaz za modul za simulaciju), polazna šema za izradu štampanih veza (Netlist), itd. Pošto se stalno proizvode novi tipovi komponenti proizvođači ovih programa kreiraju potrebne biblioteke koje sadrže podatke o komponentama i omogućuju licenciranim korisnicima njihovu upotrebu. Biblioteke komponenti sadrže informacije kao što su: simbol, ekvivalentni model za simulaciju, fizičke dimenzije i raspored izvoda za štampane veze itd. Bez korektnih navedenih informacija odgovarajući moduli u postupku projektovanja neće korektno raditi. Ako samostalno kreiramo simbol onda isti možemo koristiti samo za crtanje šema i nizašta više. Zato je vrlo važno imati originalne biblioteke komponenata.

### 2.2. Simulacija elektroničkih krugova

Modul za simulaciju vrši simulaciju rada elektroničkog sklopa koji smo dizajnirali. Ovaj modul može biti ugrađen u modul za crtanje šema ili realiziran kao zasebna komponenta. U svakom slučaju postupku simulacije prethodi crtanje šeme. Prilikom simulacije na ulaze sklopa dovodimo potrebne naponske signale te odgovarajućim instrumentarijem testiramo vrijednosti u pojedinim tačkama sklopa. Neki programi kao što je MULTISIM ili SPICE su namjenski kreirani za simulaciju i to perfektno rade. Drugi programi simulaciju podržavaju kao dopunsku mogućnost. Prilikom simulacije treba voditi računa da koristimo modele realnih komponenti ili njihove ekvivalente. Na šemi obavezno trebamo naznačiti masu koja za simulaciju znači potencijal nula i prema njemu se ravnaju ostali potencijali. Treba razlikovati simulaciju analognih i digitalnih sklopova. Neki proizvođači su svoj softver optimizirali za analogne ili za digitalne sklopove jer je pristup ovim simulacijama različit. U principu sa stanovišta razvoja programa i korektnosti rezultata simulacija digitalnih struktura je jednostavnija i rezultati simulacije su potpuno isti kao oni koje dobijemo na realnom sistemu.

Problem digitalne simulacije uvode komponente kao što su procesori, ali i takvi simulacioni programi se razvijaju i to vrlo uspješno. O tome će više biti riječi u 'Praktikumu elektronike' koji se sluša na trećoj godini. Analogni sklopovi koji uglavnom koriste nelinearne elemente kao što su tranzistori i diode mogu imati nepouzdanu rezultate ukoliko model korištene komponente nije dobar. Iako se ovi modeli stalno usavršavaju treba imati na umu da dobijene rezultate treba provjeriti i na fizičkom sistemu. Mi ćemo uglavnom koristiti simulaciju analognih krugova i trebamo dobiti osjećaj u kojoj mjeri smijemo rezultate dobijene simulacijom uzimati bez provjere na fizičkom sistemu. Bez obzira na ove probleme simulacija se obavezno preporučuje i sigurno će značajno skratiti vrijeme projektovanja.

### 2.3. Izrada maski za štampane ploče PCB (Print Circuit Board)

Elektronske komponente se montiraju na ploče od izolacionih materijala kao što je: staklo, pertinaks, vitroplast i keramika. Ove ploče su presvučene tankim slojem provodnog materijala najčešće bakra. Pomoću ovog bakarnog sloja vrši se povezivanje izvoda komponenti međusobno. Sam postupak izrade ovih vodova se svodi na fotopostupak i opisan je na kraju ovog poglavlja. U tom postupku najteži dio jeste izrada fotomaski koje se koriste za selektivno nagrizanje bakarnog sloja. Sve veća složenost elektroničkih sklopova, primjena procesora i memorijskih komponenti čini veze među komponentama jako gustim, što s jedne strane zahtijeva tanje vodove, a s druge strane povećava probleme izoliranja vodova na mjestu ukrštanja. Ovi problemi se rješavaju oslojavanjem ploča sa obje strane (dvostrana štampa) ili u više slojeva. Na primjer štampana ploča za matične ploče na računarima se radi u više od 4 sloja. Mi ćemo koristiti jednostrane i dvostrane štampane ploče i prilagoditi naše sklopove tim mogućnostima. Softveri koji se koriste za izradu maski za štampane veze polaze od Netliste koju formira modul za crtanje šema. Netlista treba da sadrži sve tipove podnožja korištenih komponenti, zatim sve veze među komponentama, zatim vrijednosti struja i napona koji se mogu pojaviti na vodovima itd. Korisnik bira veličinu ploče, broj slojeva i način povezivanja komponenti, ima mogućnost da prepusti programu da sve odradi sam (Autoplacement, Autorouting), da korisnik postavi raspored komponenti, a program izvrši povezivanje ili da korisnik uradi sve sam. Iako opcija ručnog dizajniranja može izgledati prevaziđena sve dobre štampe su najvećim dijelom urađene ručno. Naime iako su ovi softveri stvarno kvalitetni i stalno se usavršavaju iskustva u dizajniranju koja imaju dobri projektanti nude u pravilu bolja rješenja od onih koja će ponuditi računar. Tako da se u praksi koristi hibridna opcija, pusti se programu da izvrši dizajniranje, a onda projektant ručno prepravi neke veze za koje smatra da je potrebno ili obrnuto, korisnik postavi komponente koje smatra da je nužno fiksirati (konektori, releji, elementi koji se griju itd), zatim prepusti softveru da postavi ostatak komponenti. Poslije toga korisnik definiše vodove koje smatra da je neophodno, a ostatak prepusti softveru. Na kraju, ako je potrebno izvrši prepravke. Postupak dizajniranja štampanih veza je sa stanovišta upotrebe dosta usko specijalizovan i za uspješno kreiranje štampe treba dosta iskustva i rutine. Proizvođači softvera redovno održavaju kontakte sa svojim korisnicima, organizuju seminare, upoznaju ih sa mogućnostima novih opcija u njihovom softveru itd. Za naše potebe biće dovoljno da naučimo osnovne tehnike dizajniranja jednostranih i dvostranih štampanih veza i to za ploče ne veće od Evropa formata (16x10cm). Sve detalje i specifičnosti ovih aktivnosti studenti će moći naći u literaturi navedenoj pod (19,20).

### 2.4. Priprema za proizvodnju

Proizvodnja elektroničkih sklopova se sastoji iz tri osnovne operacije: izrada štampane ploče, postavljanje komponenti i lemljenje. Sve tri ove operacije kod serijske proizvodnje se izvode

automatski, vođene računarima ili računarski upravljivim mašinama. Prilikom izrade štampanih ploča pored skidanja viška bakra i formiranja električnih veza, treba uočiti da imamo postupak bušenja rupica, njihovu metalizaciju, zaštitu od oksidacije lakiranjem, itd. Postavljanje komponenti izvode posebne mašine. Postupak lemljenja, takođe se izvodi prosecorski kontroliranim postupkom koji je u principu termičkog karaktera. Za sve ove postupke kao ulazi mogu poslužiti izlazni dokumenti iz prethodnih faza (crtanje šema i izrada fotomaski). Većina proizvođača CAD softvera u elektronici nastoji obezbijediti izlazni format svojih dokumenata kompatibilan sa mašinama koje se koriste u proizvodnji. Detalje mašinske proizvodnje ćemo objasniti kasnije, dok ćemo mi u okviru laboratorijskog rada praviti prototipne verzije te ćemo sve operacije izvoditi ručno.

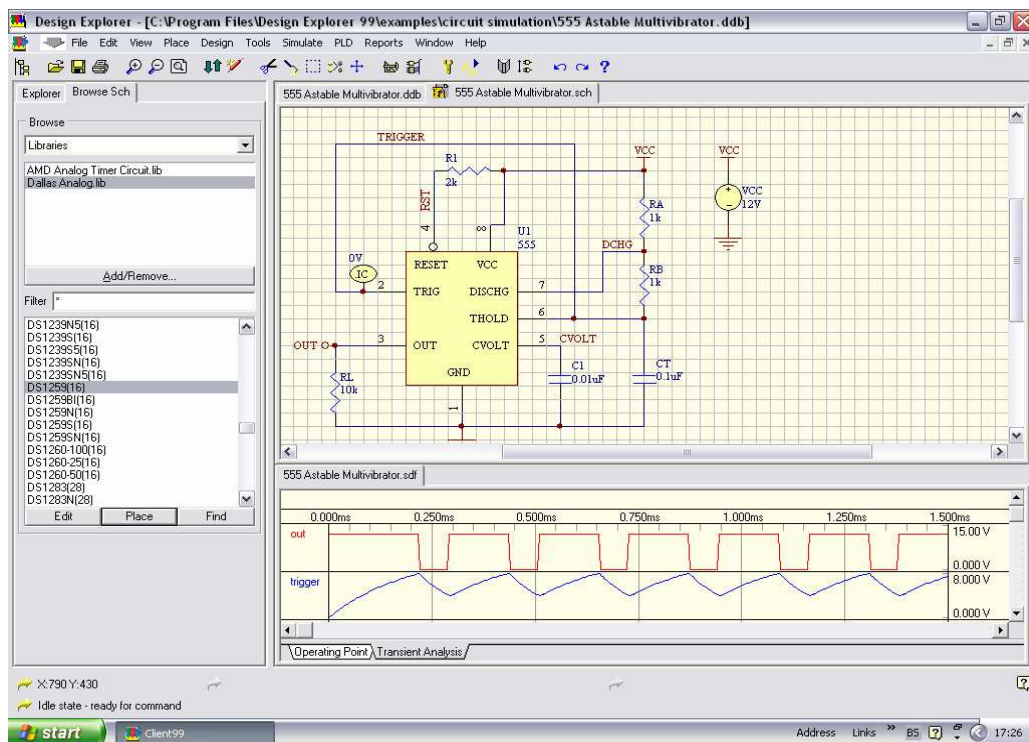
U nastavku ćemo dati samo kratak osvrt na korišteni softver u elektronici

## 2.5. ACCEL EDA

ACCEL EDA je proizvod američke firme ACCEL Technologies INC. namijenjen za projektiranje štampanih ploča. Sastoji se iz tri paketa: ACCEL Schematic, namijenjen za crtanje šema, ACCEL P-CAD namjenjen za izradu štampanih veza, ACCEL Library Manager alat za rad sa komponentama, simbolima i sl. Pošto se radi o vrlo zahtjevnom programu detalje njegovog korištenja studenti mogu naći u priručniku navedenim pod 19.

## 2.6. PROTEL

Protel je integrirani paket za dizajniranje štampanih veza. Proizvodi ga firma Protel International Limited iz Australije. Program podržava sve napredne opcije potrebne za dizajniranje i proizvodnju štampanih ploča kao što su: crtanje šema, simulacija, izrada štampanih veza, provjera korektnosti veza, podrška mašinama za bušenje rupica, itd. Detalji jedne malo starije verzije Protela su dati u literaturi 20.

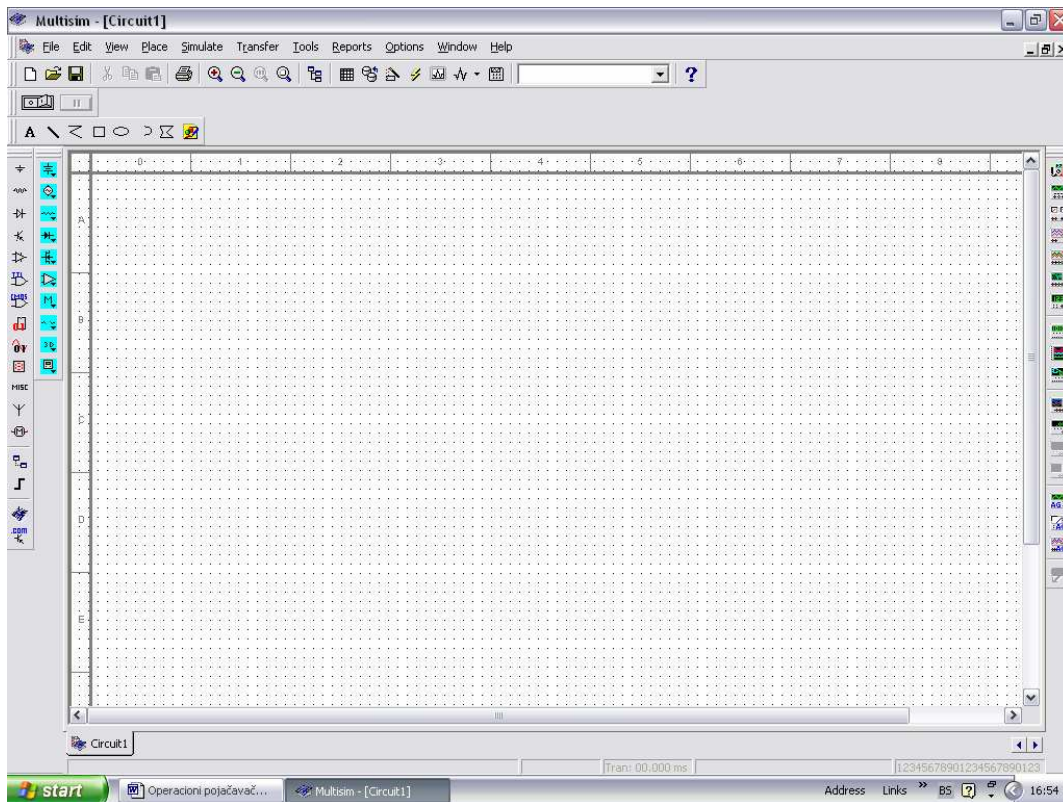


Slika 39. Radni prostor Protela; lijevo je izbornik sa bibliotekama komponentata; desno gore je radni prostor za crtanje; desno dole su rezultati simulacije koja se starta direktno iz programa za crtanje.

## 2.7. MULTISIM

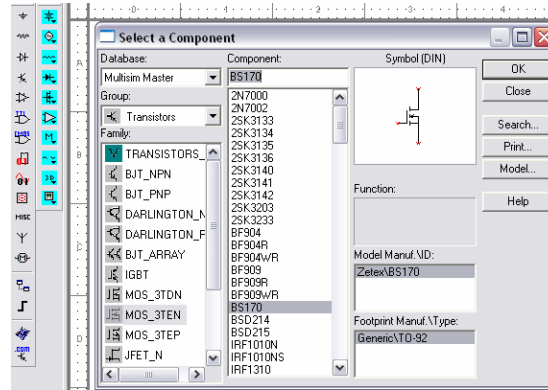
MULTISIM predstavlja vrlo upotrebljiv alat za simulaciju elektroničkih struktura i sistema. Sam program posjeduje dosta mogućnosti i ovdje ih nećemo detaljno obrađivati, nego ćemo dati samo osnovna uputstva potrebna za upotrebu. Iako je program prvenstveno namijenjen za simulaciju njegovi izlazni dokumenti su prilagođeni nekim formatima programa za izradu štampe. Mi ćemo MULTISIM prvenstveno koristiti kao program za simulaciju, te će dalje izlaganje biti u tom kontekstu. Program je vrlo intuitivan sa stanovišta korištenja te nije nužno provesti dosta vremena za njegovo učenje. Opremljen je dosta bogatom bibliotekom komponenata čiji su modeli napravljeni tako dobro da rezultati dobijeni u postupku simulacije u najvećem broju slučajeva odgovaraju onim dobivenim na fizičkom modelu. Osnovno radno okruženje je dato slikom 40. Lijevo su postavljene trake sa komponentama razvrstane prema tipovima a desno je instrumentarij. Tipova komponenti kao i instrumentarija ima jako mnogo te ih ovdje nećemo sve pojedinačno objašnjavati. Radije ćemo uzeti jedan konkretan primjer i na njemu objasniti način korištenja programa.

Neka imamo zadatak realizirati jednostepeni pojačavač sa MOSFET tranzistorom. Potrebno je odrediti sve vrijednosti korištenih elemenata, snimiti sve karakteristične signale, te odrediti pojačanje sklopa.



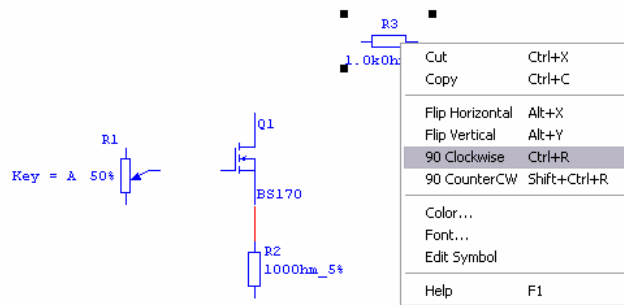
Slika 40. Izgled radnog prostora MULTISIM-a

Komponente uzimamo tako što lijevom tipkom miša kliknemo na ikonu koja pokazuje grupu gdje treba da je smještena komponenta (Transistor), odaberemo podgrupu (MOS\_3TDN) te iz ponuđenog spiska odaberemo konkretnu komponentu (BS170). Sa OK komponenta će se pojaviti u radnom prozoru.



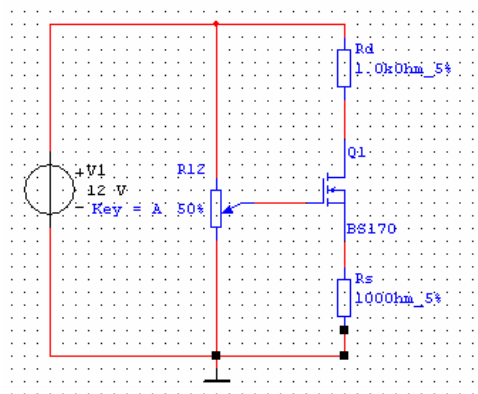
Slika 41. Uzimanje komponente

Na isti način uzmemo i ostale komponente. U našem slučaju odabraćemo  $R_D=1k$ ,  $R_S=100\Omega$ , a  $R_1$  i  $R_2$  ćemo odrediti eksperimentalno. Koristit ćemo napon napajanja  $12V$ , a radnu tačku tranzistora postaviti na sredinu aktivne oblasti pravilnim izborom  $R_1$  i  $R_2$ . Po pozivu komponente su okrenute horizontalno, ako ih na šemi treba rotirati onda kliknemo desnom tipkom miša na komponentu i izborom odgovarajućeg alata to uradimo (90 Clockwise). Ovdje se nalaze i drugi alati čije korištenje je samo po sebi jasno, jednostavno probajte.



Slika 42. Rotiranje komponente

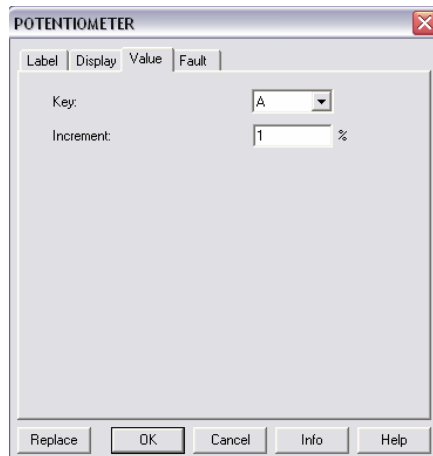
Kada smo uvezli sve komponente slijedi njihovo povezivanje: postavimo vrh pokazivača miša na izvod komponente, kliknemo lijevom tipkom miša i vodimo liniju do slijedeće tačke, kliknemo lijevom tipkom miša i tako dalje, na krajnjoj tački kliknemo na izvod druge komponente ili neku drugu liniju i linija se završava. Za poravnanje linija možemo koristiti prisutnu mrežu (Grid).



Slika 43. Prva verzija šeme iz primjera



Sada spojimo instrumente, za određivanje radne tačke nam treba voltmetar. Postavimo voltmetar između S i D te mijenjamo poziciju potencijometra dok napon na voltmetru ne postane približno jednak pola napona napajanja. Polazna pozicija klizača potencijometra je 50%, sa tipkom koja je napisana na potencijometru (Key=A) vršimo pomjeranje vrijednosti potencijometra naviše, a sa (Shift + tipka) vrijednost pomjeramo naniže. Inkrement je 5%, a ako nam treba manja vrijednost inkrementa to jednostavno promijenimo. Kliknemo dva puta na komponentu, pojavi se izbornik gdje mijenjamo postavljena, možemo promijeniti i tipku kojom mijenjamo poziciju klizača. Na isti način mijenjamo parametre i ostalih komponenti.

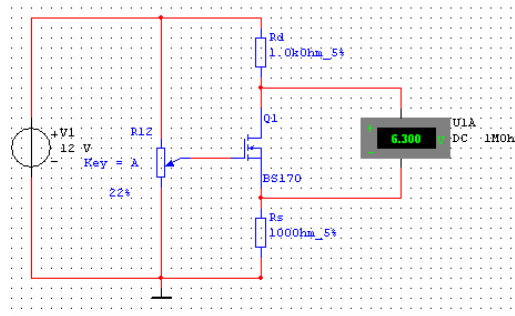


Slika 44. Promjena parametara komponenti

Kada smo sve završili startamo simulaciju.



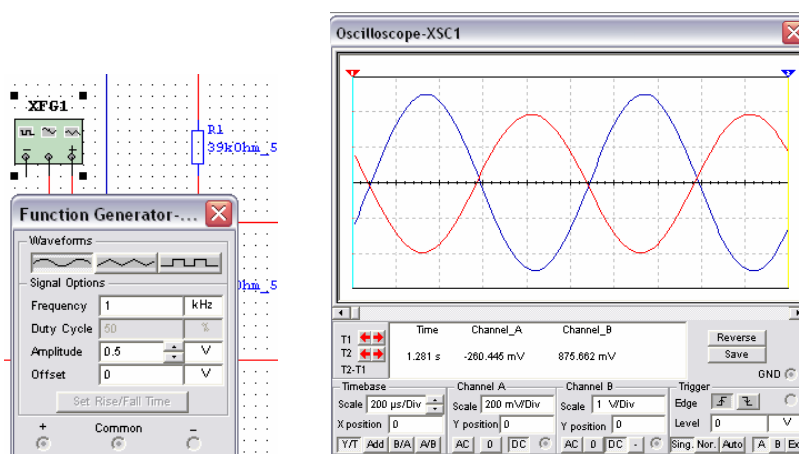
Na instrumentima će se pojaviti mjerene vrijednosti.



Slika 45. Rezultati na voltmetru

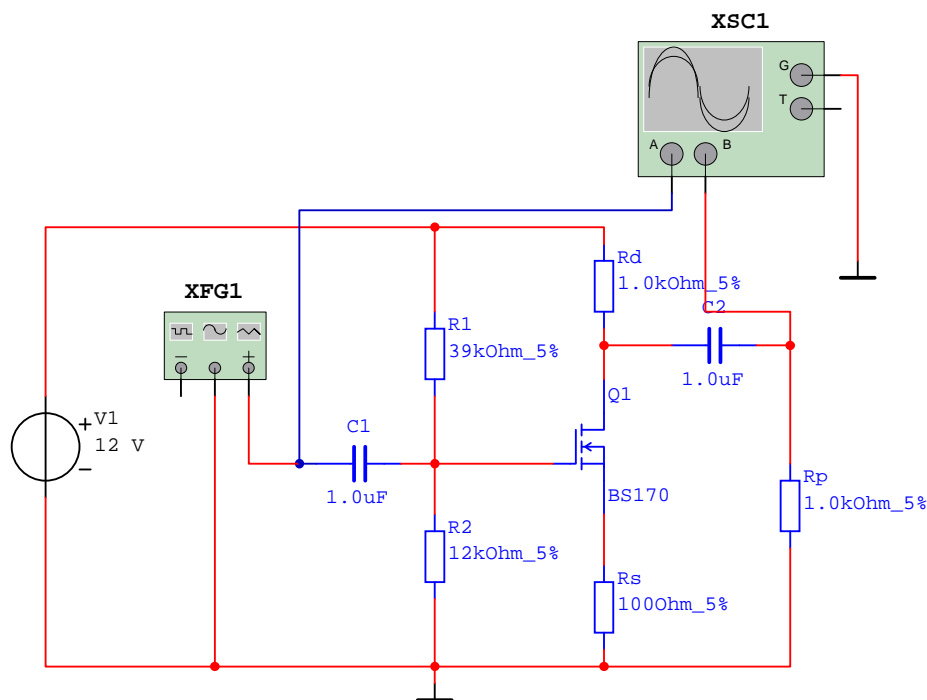
### Rezultati simulacije

Kao što vidimo na 22% imamo vrijednost od 6.3V napona  $U_{DS}$ , ako povećamo klizač potencijometra na 23% dobijemo 5.2V tako da je rezultat negdje na 22.5%. Pošto smo koristili potencijometar od 50k onda su to vrijednosti: 11.25k i 38.75k. Pošto ćemo koristiti vrijednosti niza E12 onda ćemo odabrati  $R_2=12k$  i  $R_1=39k$ . Sada potencijometar mijenjamo sa odabranim otporima, provjeravamo napon  $U_{DS}$ , (dobili smo 4.7V, nije baš na sredini ali ovaj put ćemo ostaviti tako) dodajemo kapacitete i spajamo ulaz sa generatora funkcija, sinusni signal 1kHz, amplitude 0.5V te na osciloskopu gledamo signale.



Slika 46. Podešavanje generatora funkcija i osciloskopa

Sa slike 46 je vidljivo da je postavljanje parametara na generatoru funkcija kao i na osciloskopu vrlo jednostavno. Sve je grafičkim izgledom podređeno jednostavnosti korištenja tako da su opcije iste kao kod stvarnih instrumenata. Da bismo na osciloskopu razlikovali ulazni i izlazni signal možemo postaviti boju. Klikom na liniju dobijemo izbornik unutar koga možemo birati boju, izabrana boja će se pojaviti na toj liniji kao i na signalu na osciloskopu. Ne treba zaboraviti osciloskop konektovati na masu. Kod generatora koristiti + izlaz i srednju tačku koju spajamo prema masi. Ako dovodimo signal između + i - izlaza generatora onda je amplituda signala duplo veća. Sa dijagrama na osciloskopu (dijagram se pojavi kada kliknemo dvaput na instrument) očitamo vrijednosti signala te vidimo da je pojačanje 4. Na isti način snimamo signale i u ostalim tačkama. Krajnja šema pojačavača zajedno sa instrumentarijem je prikazana na slici 47.



Slika 47. Krajnja šema u postupku simulacije iz primjera

## 2.8. Izrada štampane ploče

Za realiziranje pojedinačnih štampanih ploča može se koristiti jednostavna tehnika za čiju realizaciju laboratorija na ETF raspolaže opremom. Kada se formira film korištenjem nekog od programa za PCB dizajn on se nanese na foliju (ako vodovi nisu suviše tanki može poslužiti dobar kopir aparat ili laserski štampač). Za ploče je najbolje koristiti već fotooslojene ploče. Skine se zaštitni sloj sa ploče, ista se postavi u UV lampu preko folije sa filmom vodova i osvijetli. Osvjetljavanje traje 1 minut. Poslije toga osvijetljena pločica se razvije u fotorezistu. Ovaj postupak traje nekoliko minuta, za sve vrijeme rastvor se lagano miješa i prati proces. Kada se vodovi jasno ocrtaju postupak je gotov. Poslije se ploča ispere hladnom vodom bez trljanja. Zatim se osuši. U slijedećoj fazi vršimo skidanje nezaštićenih površina bakra. To možemo izvesti korištenjem ferihlorida. Napravimo rastvor ferihlorida u vodi zagrijanoj do 50 °C. Stavimo ploču u rastvor i miješamo nekih desetak minuta koliko proces traje. Kada se sav bakar koji nije zaštićen ukloni postupak je gotov i možemo izvršiti ispiranje ploče. Prvo operemo ploču hladnom vodom, a poslije toga vimom i spužvicom se izvrši ispiranje ploče da se skine nerazvijeni fotorezist sa vodova. Poslije toga pristupa se bušenju rupica. Kada se ovaj postupak završi pristupa se montiranju i lemljenju komponenti. Na kraju se pločica premaže lakom za zaštitu od oksidacije. Korišteni lak treba da omogući lemljenje u slučaju da naknadno vršimo intervencije. Sve korištene komponente su otrovne te cio postupak treba izvoditi pod strogom kontrolom asistenta. Isto tako treba voditi računa o odlaganju rastvora koji nastaju u toku postupka te njihovo odlaganje vršiti na za to predviđena mjesta.

## 2.9. Lemljenje

Lemljenje je proces kojim se ostvaruju električni kontakti između komponenti i vodova na štampanoj ploči ili montažnim postoljima. Lemljenje se ostvaruje tehnikom mekih lemova koja se zasniva na otapanju usljed zagrijavanja lemne žice ili lemne paste na temperaturu oko 190°C. Poslije hlađenja formira se čvrst kontakt. Koristi se ručno i mašinsko lemljenje.

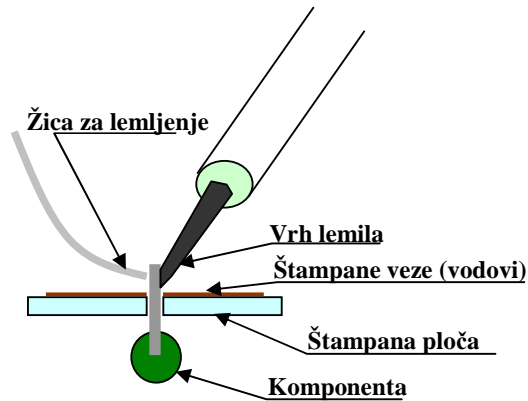
### 2.9.1. Ručno lemljenje

Za ručno lemljenje koristi se lemna žica (Solder wire) koja je sastavljena od kalaja (Sn) i olova (Pb) obično u omjeru 60:40 sa unutrašnjom šupljinom unutar koje se nalazi pasta za lemljenje. Neke lemne žice pored kalaja i olova sadrže 2 % bakra (Cu) ili srebra (Ag). Promjeri žice za lemljenje mogu biti različiti i prizvode se od 0,6 mm do 2mm.

Za ispravno lemljenje važno se pridržavati slijedećih napomena:

1. Komponente i vodovi treba da budu čisti, bez prašine i neoksidirani. Prašina se da odstraniti prije lemljenja, a oksidni sloj je najbolje ne dozvoliti da se formira. To se postiže nanošenjem posebnog laka na štampanu ploču odmah poslije razvijanja i sušenja ili se lemljenje realizuje odmah. (Da bi se formirao oksidni sloj na suhoj bakarnoj ploči potrebno je nekoliko dana).
2. Dobro zagrijan i čist vrh lemila. Prije lemljenja zagrijati lemilo (postaviti regulator na lemilu na 350°C). Prije i poslije svakog lemljenja očistiti vrh lemila u vlažnoj spužvici.
3. Ispravno nanošenje kalaja. Lemna žica se postavlja na suprotnu stranu komponente u odnosu na vrh lemila. Na ovaj način toplota potrebna da se otopi kalaj se prenosi preko izvoda komponente koja se lemi, tako da se lem formira na zagrijanom izvodu. Isto tako na ovaj način pasta koja se nalazi u unutrašnjosti lemne žice se ne ispari nego se razlije po lemnom mjestu i time ga očisti. Treba voditi računa da količina kalaja koja se istopi ne bude ni prevelika ni premala. Prevelika količina kalaja može stvoriti

nepotrebne kontakte sa susjednim komponentama, a premala može ostvariti slab kontakt. Kada se otopi dovoljno kalaja lemna žica se odmakne, a vrh lemila se zadrži još nekoliko trenutaka dok se kalaj ne razlije ravnomjerno. Ova vremena se vrlo brzo iskustveno formiraju, orijentacije radi, radi se o par sekundi.



Slika 48. Ispravno lemljenje

### 2.9.2. Mašinsko lemljenje

Proizvodnja elektroničkih sklopova i elektronskih uređaja široke potrošnje danas je usavršena do maksimuma. Pored automobilske industrije elektronska industrija je danas jedna od onih koja je najvećim dijelom automatizirana. Namjenske mašine vođene računarima izvode izradu štampanih ploča, postavljanje elektronskih komponenti, lemljenje itd. S obzirom na način montaže elektronskih komponenti prisutne su dvije tehnologije: montiranje komponenti bušenim rupicama THT (Through Hole Technology) i površinska montaža komponenti SMT (Surface Mount Technology). SMT ima niz prednosti i ona se danas dominantno izvodi sem u slučajevima kada su komponente takve (releji, konektori) da je neophodno montiranje u bušene rupice. Prednosti SMT tehnologije su višestruke: koriste se komponente koje su temperaturno neosjetljivije, komponente su manjih dimenzija, spojevi su kraći i cijeli sklopovi su kompaktniji. Time dobivamo pouzdanije sisteme. Sam proces proizvodnje je jednostavniji i jeftiniji. Ova tehnologija je prvenstveno namijenjena za proizvode sa velikim serijama jer zahtijeva posebne mašine i posebnu pripremu proizvodnog procesa. Za male serije te za pojedinačne proizvode (protipni dizajn) koristi se THT tehnologija. Za proizvode kod kojih se moraju neke komponente montirati sa rupicama, a ostatak se može površinski montirati koristi se kombinacija ove dvije tehnologije. Prvo se namontiraju komponente SMT tehnologijom, a zatim se dodaju ostale komponente. Lemljenje može da se izvodi istovremeno ili pojedinačno. Ukoliko se izvodi istovremeno lemljenje onda se prethodno pripreme obe vrste komponenti te se lemljenje izvodi u jednom prolazu. Ukoliko se lemljenje izvodi posebno onda se prvo završi kompletan proces SMT a ostatak se uradi ručno. SMT komponente mogu podnijeti temperaturu i do 240°C.

### 2.10. SMT

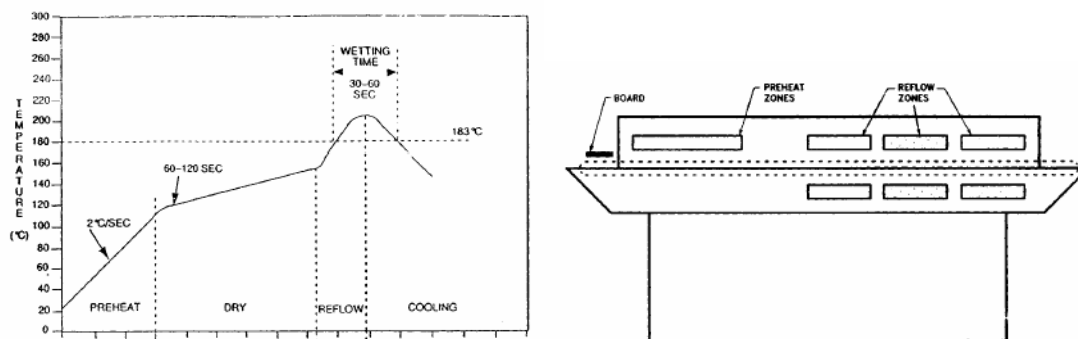
SMT se sastoji iz tri procesa:

- Nanošenje paste za lemljenje,
- Nanošenje komponenti, i
- Lemljenja.

Na štampanu ploču postupkom sitotiska nanosi se pasta za lemljenje. Prethodno pripremljeni podložak koji ima otvore na mjestima na kojima treba pasta da prodre do ploče se postavi na ploču. Zatim se horizontalnim ravnalom nanosi lemljena pasta preko cijele ploče. Prelaskom ravnala sa jednog kraja na drugi višak paste se pomjera, a na mjestima gdje je to potrebno pasta prodire na ploču. Ovaj postupak se mora izvoditi u precizno kontrolisanim uslovima: temperatura 22°C, vlažnost vazduha 40% do 50%, bez strujanja vazduha.

Na ploču sa nanešenom pastom za lemljenje postavljaju se komponente. To se izvodi posebnim mašinama kojima se upravlja ručno ili računaram. Ove mašine sadrže hvataljku koja ima vakuum pumpu kojom se usisava komponenta prilikom preuzimanja iz spremnika i njeno ispuštanje na ploču pod pritiskom na prethodno nanesenu pastu. Razlika između ručno upravljive i računarski upravljive mašine za postavljanje komponenti je u načinu upravljanja ovom hvataljkom. Kod mašina kod kojih ovom hvataljkom upravlja računar cijeli proces se izvodi pod upravljanjem prethodno unesenog programa. Program sadrži unesene informacije o tipovima komponenti i njihovim pozicijama. U spremnicima koji su realizirani u obliku bubnjeva nalaze se sve komponente za pojedini sklop. Kada se proces starta računar upravlja hvataljkom i vrši potpuno automatiziran proces montiranja komponenti. Brzina kojom on to izvodi danas se mjeri i hiljadama komponenti na sat. Kod ručnog postavljanja ulogu računara preuzima čovjek. Ručne mašine se koriste za male serije, prototipove, popravke i sl.

Postupak lemljenja se izvodi u pećima sa transportnom trakom. Štampane ploče sa prethodno nanesenom pastom za lemljenje i postavljenim komponentama se preko transporterata pomjeraju kroz peć. U peći se kontrolirano formira temperatura prema dijagramu koji zavisi od korištenih komponenti i prethodno se zadaje (slika 49).



Slika 49. Dijagram temperatura pri mašinskom lemljenju SMD i peć sa transporterom

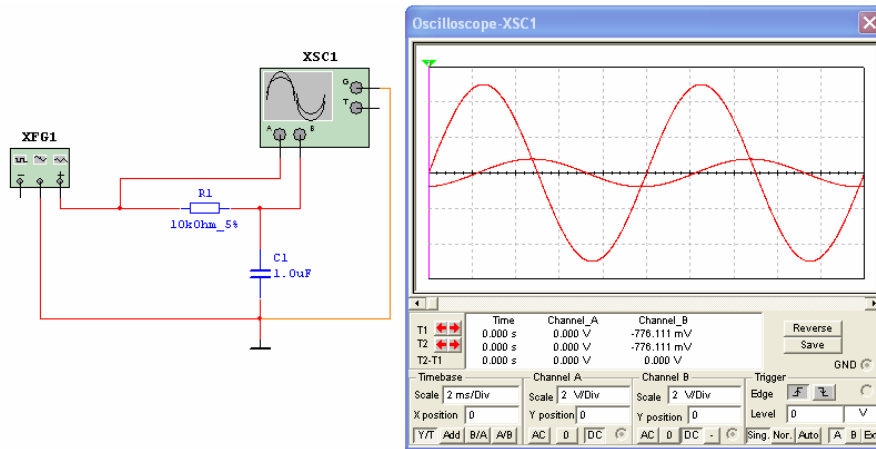
Dizajniranje elektroničkih struktura se izvodi prema slijedećim fazama:

1. Sinteza idejne blok šeme
2. Proračun elemenata pojedinih blokova
3. Računarska simulacija pojedinih blokova
4. Korekcije proračuna
5. Računarska simulacija cijelog zadatka
6. Korekcija uočenih nedostataka
7. Crtanje izvedbene elektroničke šeme
8. Izrada elektroničkog prototipa
9. Mjerenja na realiziranom prototipu
10. Izrada zadnje elektroničke šeme
11. Izrada štampe
12. Montiranje i funkcionalno testiranje modela
13. Izrada tehničke dokumentacije

### 3. AMPLITUDNO-FREKVENTNE I FAZNO-FREKVENTNE KARAKTERISTIKE

Elektronske sklopove možemo tretirati kao četveropole. Kada na ulaz dovodimo neki signal recimo da je to naponski signal koji je funkcija vremena  $U_{ul}(t)$ , na izlazu se pojavljuje izlazni signal koji se takođe može tretirati kao naponski i koji će takođe biti funkcija vremena, označimo ga sa  $U_{iz}(t)$ . Ono što nas u principu zanima jeste, u kakvoj vezi su struktura četveropola, ulazni signal i izlazni signal. Postoji više načina kako da to saznamo. Jedan od načina jeste da na ulaz četveropola dovedemo sinusni signal. Ovaj način polazi od Furijeovih redova koji kažu da se proizvoljni periodički signal može razložiti na zbir sinusnih signala, odgovarajućih amplituda, frekvencija i faza. Pošto tretiramo linearne sklopove onda će izlaz biti zbir parcijalnih izlaza gdje je parcijalni izlaz dobiven za pojedinačnu komponentu ulaza. Na ovaj način, ako mijenjamo frekvenciju ulaznog signala, a pratimo izlaz za promjene frekvencije od 0 do  $+\infty$  dobićemo karakteristiku, koja određuje strukturu četveropola i funkcija je frekvencije. Pošto su u strukturi četveropola pored ostalih komponenti (otpori, pojačavači) prisutni induktiviteti i kondenzatori to će veza između ulaza i izlaza biti kompleksna funkcija.

Mehanizam tretiranja četveropola frekventnim karakteristikama objasniti ćemo na primjeru RC člana. Neka je data redna RC ( $R=10k$ ,  $C=1\mu F$ ) kombinacija na čiji ulaz dovodimo sinusni signal amplitude  $A=5V$  i frekvencije  $f=100Hz$ . Neka izlaz uzimamo sa kondenzatora C (slika 50).



Slika 50. RC par kao četveropol

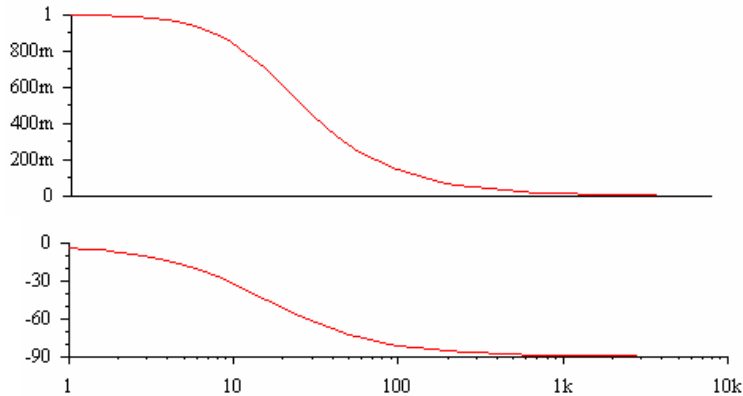
Kao što slika pokazuje izlaz se promijenio, amplituda je manja i izlazni signal kasni za ulaznim signalom tj. došlo je do faznog pomaka. Kolika je amplituda izlaza i koliki je fazni pomak? To jednostavno možemo izračunati. Pošto je ulaz sinusni primijenit ćemo simbolički metod tj. vrijedi:

$$\underline{U}_{iz} = I \cdot \underline{Z}_2, \quad I = \frac{\underline{U}_{ul}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}, \quad \underline{Z}_1 = R, \quad \underline{Z}_2 = \frac{1}{j\omega C}.$$

Odakle se dobije:

$$\underline{U}_{iz} = \frac{1}{1 + j\omega RC} \cdot \underline{U}_{ul}. \quad (14)$$

Kada se uvrste zadate vrijednosti dobije se:  $\underline{U}_{iz} = 0,786 \cdot e^{-j81^\circ}$ . Znači, amplituda ulaznog signala se promjenila sa 5V na 0,786V uz kašnjenje pri frekvenciji od 100 Hz za 2,39ms ili u stepenima za  $81^\circ$ . (U kakvoj su vezi fazni pomak izražen u stepenima i fazni pomak izražen u vremenu kako to očitajemo na osciloskopu?) Šta će se desiti ako sada promijenimo frekvenciju ulaznog signala uz zadržavanje amplitude na ulazu? Vrlo jednostavnim računom na nekoliko numeričkih primjera ustanovit ćemo da se amplituda mijenja sa promjenom ulazne frekvencije kao i fazni pomak. To je i očekivano jer u izrazu 14 izlaz zavisi od  $\omega$  ( $\omega=2\pi f$ ). Ako sada mijenjamo frekvenciju ulaza od 0 do  $\infty$  i pri tome mjerimo amplitudu izlaza i fazni pomak izlaza, te to prestavimo grafički kao  $A(f)$  i  $\varphi(f)$  dobit ćemo slijedeće dijagrame:

Slika 51.  $A(f)$  i  $\varphi(f)$  karakteristike RC člana

Slika 51 pokazuje da pri niskim frekvencijama ( $f=0$ ) izlazna amplituda ne slabi (dijagram je normiran na jediničnu amplitudu ulaza) dok je fazni pomak nula. To je samo po sebi jasno, za istosmjernan signal na ulazu ( $f=0$ ) kondenzator je prekid, struja u kolu je nula, pa je izlaz jednak ulazu. Kako se frekvencija ulaza povećava, to se amplituda izlaza smanjuje, tako da već pri  $f > 1$  kHz ona padne na vrijednost blisku nuli, istovremeno se fazni pomak kreće od  $0^\circ$  do  $-90^\circ$ . To znači da ovakva kombinacija RC člana propušta niske frekvencije, a slabi visoke frekvencije, pa ovakav RC član predstavlja niskofrekventni (NF) filter. Analitički izrazi za  $A(f)$  i  $\varphi(f)$  karakteristiku se dobiju iz izraza 14 na slijedeći način. Ako je amplituda ulaza 1 i nulti fazni pomak onda je izlaz dat sa:

$$\underline{U}_{izl} = \frac{1}{1 + j\omega RC} (1 + j0) = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

Kao što se vidi izlaz je kompleksan broj čija je amplituda:

$$|A(j\omega)| = \sqrt{R^2 e^{\{U_{iz}\}} + I^2 m\{U_{iz}\}},$$

i argument

$$\varphi = \text{artg} \frac{\text{Im}\{U_{iz}\}}{\text{Re}\{U_{iz}\}},$$

što poslije izračunavanja daje:

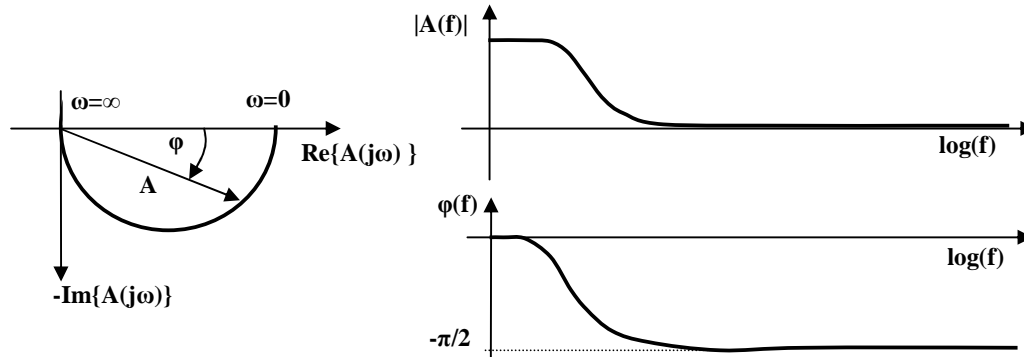
$$|A(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}}, \quad \varphi = \text{arctg}(-\omega RC). \quad (15)$$

Ako u izrazu 14 podijelimo jednačinu sa  $U_{ul}$  dobićemo  $A(j\omega)$  koje ima isti blik kao izlaz pri jediničnom sinusnom ulazu  $(1+j0)$ .  $A(j\omega)$  se naziva prenosna funkcija sistema, i kao što se vidi ona zavisi od parametara četveropola i u principu je kompleksan broj.

$$A(j\omega) = \frac{U_{iz}}{U_{ul}} = \frac{1}{1 + j\omega RC} \quad (16)$$

Na osnovu izraza 16 možemo uvesti generalno pravilo za prenosnu funkciju linearnih sistema predstavljenim četveropolom. To je količnik izlaznog i ulaznog signala i obilježava se sa  $A(j\omega)$ . Funkcija sistema je kompleksna funkcija i u sebi sadrži amplitudno-frekventnu i fazno-frekventnu karakteristiku. Može se crtati u kompleksnoj ravni kao  $A(j\omega)$  ili kao  $A(f)$  i  $\varphi(f)$ . Za navedeni primjer rednog RC kola analitički i grafički prikaz prenosne funkcije sistema, amplitudno-frekventne i fazno frekventne karakteristike dat je slikom 52.

$$A(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC}, \quad |A(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}}, \quad \varphi = \arctg(-\omega RC)$$



52. Analitičko i grafičko predstavljenje funkcije sistema, amplitudno-frekventnih i fazno-frekventnih karakteristika

Ukoliko se sistem kojeg razmatramo može opisati analitički, to jest ukoliko je opisiv onda je moguće nacrtati njegovu karakteristiku, ali ako nije, što je vrlo često slučaj onda jedino mjerenjem možemo odrediti navedene dijagrame. Mjerenje se izvodi tako što se na ulaz četveropola, sa generatora funkcija, dovodi sinusni signal konstantne amplitude i frekvencije, koju mijenjamo od minimalne koju možemo zadati do maksimalne koju generator funkcija može dati. Na izlazu četveropola osciloskopom očitavamo amplitudu i fazni pomak. Na osnovu očitanih vremenskih pomaka prema slijedećem izrazu računamo pomak u stepenima:

$$\varphi = f \cdot 360 \cdot \Delta t$$

Tabela 5. Snimanje  $A(f)$  i  $\varphi(f)$  karakteristika četveropola

R.b.	f (Hz)	$U_{ul}$	$U_{izl}$	$A= U_{izl} / U_{ul} $	$\Delta t$	$\varphi=360f \Delta t$
1	10					
2	20					
3	30					
4	40					
5	50					
6	60					
7	70					
...	...					
k	$f_{max}$					

Rezultate upisujemo u tabelu u kolone: 3,4 i 6, do kolone 5 i 7 računamo. Po osnovu dobivenih rezultata crtamo dijagrame.



#### **Eksperiment 4.1.**

Realizirati jednostepeni pojačavač sa bipolarnim tranzistorom (BC141). Koristiti napajanje sklopa od 12V. Proračunati vrijednosti elemenata tako da radna tačka bude u sredini aktivne oblasti. Snimiti amplitudno frekventnu karakteristiku i fazno frekventnu karakteristiku i nacrtati dijagrame  $A(j\omega)$ ,  $A(f)$  i  $\varphi(f)$ .

#### **Eksperiment 4.2.**

Realizirati jednostepeni pojačavač sa bipolarnim tranzistorom (BC141). Otpornik  $R_e$  prespojiti kondenzatorom  $100\mu\text{F}$ . Koristiti napajanje sklopa od 12V. Proračunati vrijednosti elemenata tako da radna tačka bude u sredini aktivne oblasti. Snimiti amplitudno frekventnu karakteristiku i fazno frekventnu karakteristiku i nacrtati dijagrame  $A(j\omega)$ ,  $A(f)$  i  $\varphi(f)$ .

#### **Eksperiment 4.3.**

Realizirati jednostepeni pojačavač sa MOSFET tranzistorom (BS170). Koristiti napajanje sklopa od 12V. Proračunati vrijednosti elemenata tako da radna tačka bude u sredini aktivne oblasti. Snimiti amplitudno frekventnu karakteristiku i fazno frekventnu karakteristiku i nacrtati dijagrame  $A(j\omega)$ ,  $A(f)$  i  $\varphi(f)$ .

#### **Eksperiment 4.4.**

Realizirati jednostepeni pojačavač sa MOSFET tranzistorom (BS170). Otpornik  $R_S$  prespojiti kondenzatorom  $100\mu\text{F}$ . Koristiti napajanje sklopa od 12V. Proračunati vrijednosti elemenata tako da radna tačka bude u sredini aktivne oblasti. Snimiti amplitudno frekventnu karakteristiku i fazno frekventnu karakteristiku i nacrtati dijagrame  $A(j\omega)$ ,  $A(f)$  i  $\varphi(f)$ .

#### **Eksperiment 4.5.**

Realizirati dvostepeni pojačavač sa bipolarnim tranzistorima (BC141). Koristiti napajanje sklopa od 12V. Proračunati vrijednosti elemenata tako da radna tačka bude u sredini aktivne oblasti. Snimiti amplitudno frekventnu karakteristiku i fazno frekventnu karakteristiku i nacrtati dijagrame  $A(j\omega)$ ,  $A(f)$  i  $\varphi(f)$ .

#### **Eksperiment 4.6**

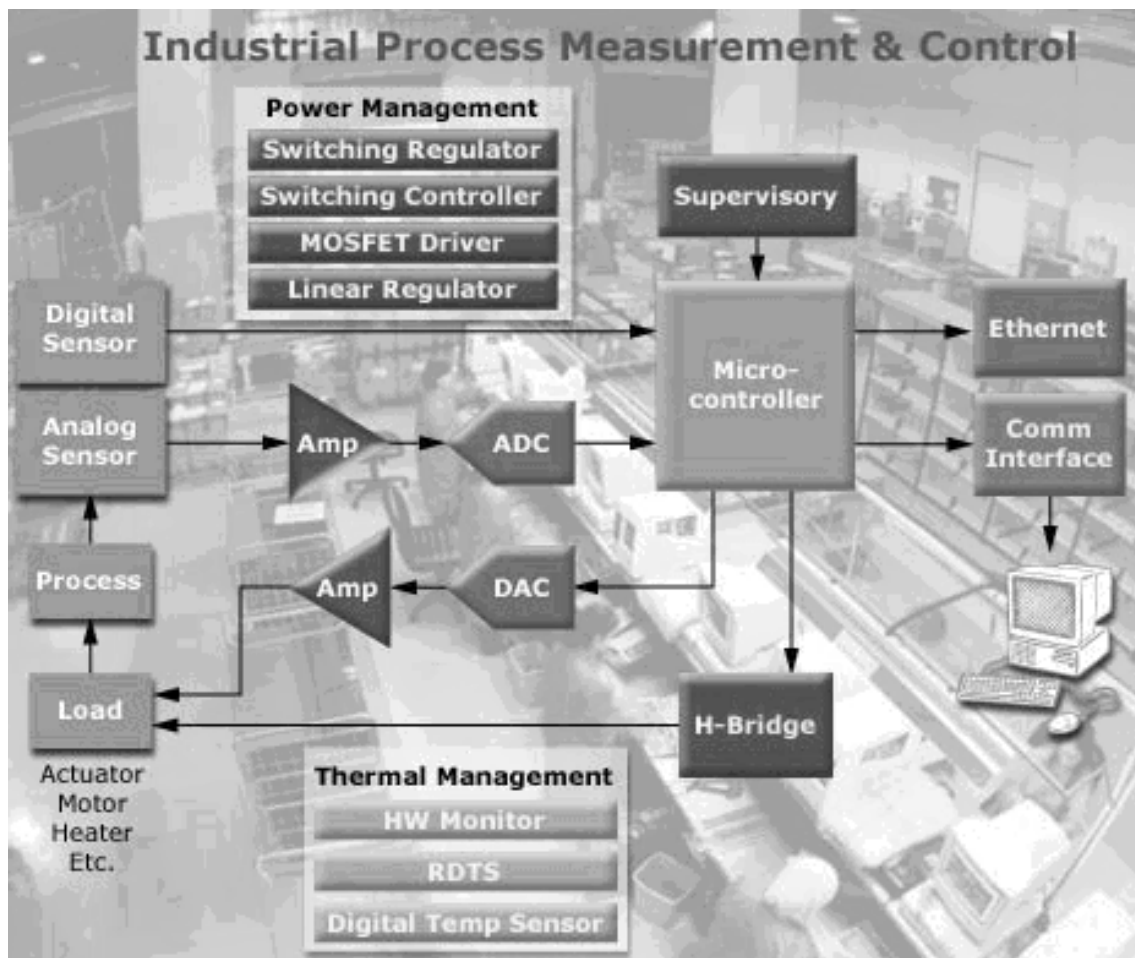
Realizirati pojasno nepropusni LC filter. Snimiti amplitudno frekventnu karakteristiku i fazno frekventnu karakteristiku i nacrtati dijagrame  $A(j\omega)$ ,  $A(f)$  i  $\varphi(f)$ .

#### **Eksperiment 4.7**

Realizirati pojasno propusni LC filter. Snimiti amplitudno frekventnu karakteristiku i fazno frekventnu karakteristiku i nacrtati dijagrame  $A(j\omega)$ ,  $A(f)$  i  $\varphi(f)$ .

## 4. OPERACIONI POJAČAVAČ (OP, Operational Amplifiers)

Integrirani krug u osnovi realiziran kao diferencijalno pojačalo sa visokim ulaznim otporom, velikim naponskim pojačanjem i malim izlaznim otporom poznat je kao operacioni pojačavač (OP). Naziv dolazi zbog prvobitno namjene, jer je njime moguće realizirati operacije nad analognim signalima kao što su: sabiranja, oduzimanja, množenja, diferenciranja, integriranja itd. Isto tako koristeći matematske opise određenih fizikalnih sistema (diferencijalne jednačine) moguće je na bazi spojeva sa OP napraviti strukturu koja simulira navedeni sistem. Izlaz iz ovako formiranog sistema ima isti oblik kao opisani fizički sistem što je omogućilo realiziranje analognih računara. Danas se OP koristi kao standardna komponenta u analognoj obradi signala. Vrlo je veliki broj različitih spojeva koje možemo realizirati na bazi OP, ali ono što je vrlo važno, jeste da je procedura sinteze željenih spojeva dosta formalizirana, te da su realni rezultati koje tako dobijemo vrlo kvalitetno opisani polaznim jednačinama. U ovome dijelu daćemo opis idealnog OP, parametre realnog OP, te pregled standardnih sklopova na bazi OP. Ovo će biti dovoljno da se savladaju osnovne tehnike primjene OP, sagledaju njegove mogućnosti i ograničenja te omogućiti studentima da samostalno rješavaju postavljene zadatke u okviru ovog kursa, kao i da realiziraju složene projekte na bazi OP.



Slika 53. Mjesto OP u savremenim industrijskim sistemima

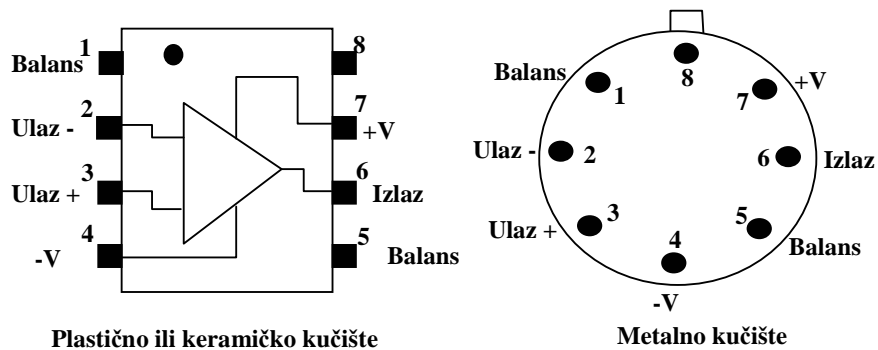
OP u današnjem obliku se relativno rano pojavio (60-tih) i to je jedan od prvih integriranih krugova (IC) koji je postao standardna komponenta. U međuvremenu njegove karakteristike su značajno popravljene, nastalo je mnoštvo tipova koji se međusobno razlikuju po naponima napajanja, frekventnom području, ulaznom otporu, pojačanju itd.

U okviru ovoga kursa uglavnom ćemo koristiti OP741 koji je postao industrijski standard, ali treba znati da postoje i drugi tipovi. Ono što treba spomenuti jeste činjenica da sveopšta digitalizacija sve manje ostavlja prostora diskretnim komponentama i spojevima na bazi diskretnih komponenti, tako da se danas sve manje sreću spojevi na bazi tranzistora i sve se manje koristi analogna obrada signala. S druge strane spojevi na bazi OP ne gube na značaju. U području mjerne tehnike, analognog pretprocesiranja signala, te regulaciji, još uvijek se intenzivno koristi OP. Interesantno je napomenuti da se danas koriste hibridni integrirani krugovi (IC) koji sadrže procesore, analognu/digitalne (A/D) i digitalno/analogne (D/A) konvertore, memoriju, te polja sa OP. Korištenjem posebnih tehnika programiranja takvi IC se mogu konfigurirati tako da se formiraju interna ožičenja što omogućuje realizaciju zahtjevnih upravljačkih aplikacija na jednom čipu. U ovakvim primjenama OP se uglavnom koriste za pretprocesiranje signala prije njegove AD konverzije (slika 53).

Isto tako značajan broj namjenskih integriranih krugova kao što su A/D konvertori, D/A konvertori, kola za uzorkovanje (S/H) kola, regulatori napona, filtri, komparatori, generatori valnih oblika, itd. u svojoj strukturi sadrže OP. S obzirom na njegov značaj, i opšti razvoj integrirane elektronike koja se sve brže razvija ka krugovima vrlo visokog stepena integracije (VLSI), iako je OP integrirani krug, mi ćemo ga tretirati kao diskretnu komponentu i sve spojeve koje budemo realizirali na bazi njega svrstavaćemo u grupu diskretnih spojeva.

#### 4.1. Pakovanje i napajanje OP

OP se pakuje u metalno, keramičko ili plastično kućište sa 8 ili 14 nožica. Pakovanje sa 8 nožica ima raspored izvoda dat na slici 54.



Slika 54. Raspored izvoda kod OP sa 8 nožica

Neki proizvođači proizvode 2 ili 4 OP u jednom kućištu sa 14 nožica. U takvim pakovanjima napajanje je zajedničko za sve OP u jednom kućištu, a kod 4 OP u jednom kućištu ne postoji mogućnost balansa. OP se napaja sa dvostranim napajanjem u opsegu od  $\pm 5$  do  $\pm 18$ . U novije vrijeme prave se OP sa nižim napajanjima kao i OP sa jednostranim napajanjem. Standardno OP se takođe može koristiti sa jednostranim napajanjem kada se masa spaja na nožicu 4, a +V na nožicu 7.

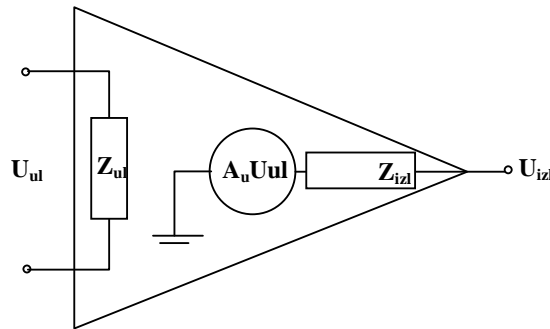
## 4.2. Model OP

Za matematički opis sklopova na bazi OP, OP definiraju tri parametra:

1. ulazna impedansa  $Z_{ul}$  (input impedance),
2. izlazna impedansa  $Z_{izl}$  (output impedance),
3. naponsko pojačanje u otvorenom  $A_u$  (voltage gain).

Za najveći broj slučajeva mogu se koristiti idealne vrijednosti ovih parametara koje iznose:

$$Z_{ul}=\infty, Z_{izl}=0, A_u=\infty.$$



Slika 55. Model OP

Pored navedenih parametara u praksi treba voditi računa i o:

- frekventnom opsegu OP,
- strujnom i naponskom razdešenju (Offset),
- potrošnji,
- temperaturnom području.

### 4.2.1. Parametri realnih OP

#### 4.2.1.1. Ulazna impedansa $Z_{ul}$

$Z_{ul}$  predstavlja impedansu između ulaznih nožica pojačavača (+ i -) i za većinu realnih OP ova vrijednost je veća od  $2M\Omega$ , vrijednost  $Z_{ul+}$  i  $Z_{ul-}$  (impedansa između svakog ulaza i mase) iznosi nekoliko stotina  $M\Omega$ . Kao posljedica vrijednosti ovog parametra dobiva se da je struja u pojačalo ( $i_p$ ) jednaka nuli.

$$Z_{ul} \rightarrow \infty \Rightarrow i_p = 0 \quad (17)$$

#### 4.2.1.2. Naponsko pojačanje pojačala u otvorenom $A_u$

$A_u$  predstavlja naponsko pojačanje pojačala u otvorenom i ono se računa kao:

$$A_u = \frac{U_{izl}}{U_{ul}} = \frac{U_{izl}}{U_{ul+} - U_{ul-}} = \frac{U_{izl}}{\epsilon} \quad (18)$$

gdje  $U_{izl}$  predstavlja izlazni napon koji se mjeri od izlaza prema masi,  $U_{ul}$  napon doveden na ulaz koji se može računati kao razlika napona  $U_{ul+}$  i  $U_{ul-}$ , gdje su  $U_{ul+}$  i  $U_{ul-}$  naponi dovedeni na ulaze + i - u odnosu na masu (ovaj napon se obično označava kao  $\epsilon$ ).

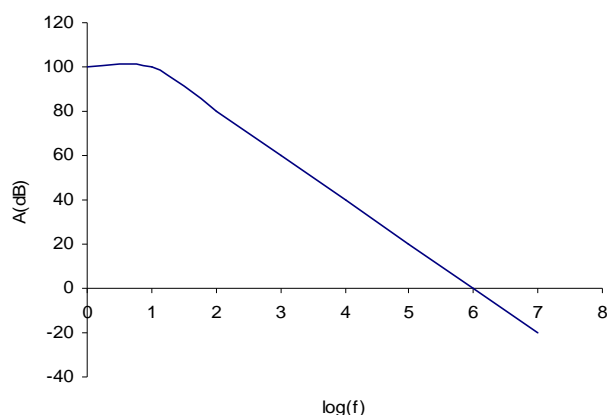
Kod realnih pojačavača ovo pojačanje je reda 200000 i više.

#### 4.2.1.3. Izlazni otpor pojačavača

Izlazni otpor pojačavača predstavlja unutrašnji otpor generatora kada se izlaz pojačala posmatra kao naponski izvor. Takav otpor će uticati na promjenu izlaza u ovisnosti od opterećenja i ograničiti struju kada je izlaz OP u kratkom spoju. Taj otpor iznosi  $75 \Omega$  kod većine operacionih pojačavača.

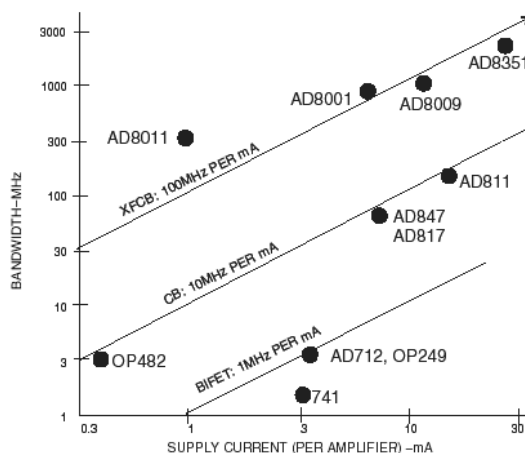
#### 4.2.1.4. Frekventni opseg operacionog pojačavača

Kod modela idealnog OP uzima se da je frekventni opseg pojačala beskonačno širok. U realnosti to je daleko od toga. Zato se proračun pojačala na bazi idealnih parametara smatra korektnim samo u dijelu frekventnog opsega gdje ne postoji slabljenje pojačanja. Proizvođači ne daju ovaj parametar nego daju frekventni opseg pojačala u otvorenom koji izgleda kao na slici 56.



Slika 56. Frekventni opseg pojačala u otvorenom (OP741)

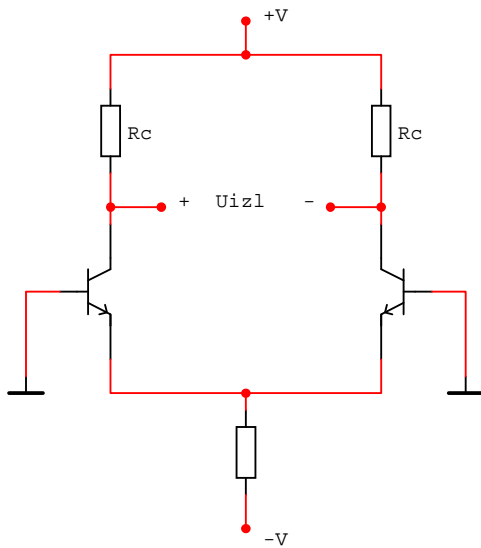
Sa slike 56 se vidi da je slabljenje pojačanja 20 dB po dekadu te da počinje već pri 10 Hz. Ovo slabljenje je posljedica vremena potrebnog da pojačalo iz napona  $-U_z$  pređe u  $+U_z$  ili obrnuto, za koje proizvođači daju kataloški podatak koji zovu Transient Response (odziv na step na ulazu) i on obično iznosi  $0,5 \text{ V}/\mu\text{s}$ . Sa dijagrama se stiče utisak da je frekventni opseg pojačala veoma uzak, ali treba znati da se on može proširiti smanjenjem pojačanja što se u praksi i radi. Dijagram prikazuje OP741, ali treba znati da postoje i mnogi drugi tipovi koji se mogu koristiti i u GHz području (slika 57).



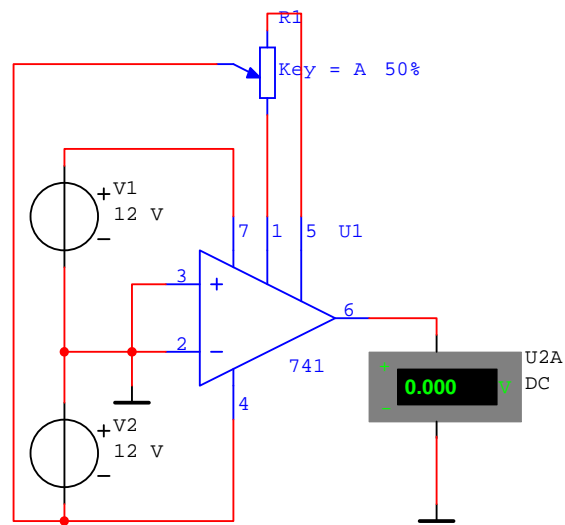
Slika 57. Dijagram frekventnog opsega i potrošnje za neke od OP

#### 4.2.1.5. Strujno i naponsko razdešenje

Operacioni pojačavač predstavlja u osnovi diferencijalno pojačalo (slika 58). Kod diferencijalnog pojačala ulazi su baze dva tranzistora čiji emiteri su spojeni preko zajedničkog otpora na minus kraj napajanja. Ako se ova dva ulaza nalaze na istom potencijalu onda teku iste kolektorske struje i razlika napona u kolektorima tranzistora je jednaka nuli. To dalje znači da će i izlazni napon biti jednak nuli. To je tako samo teorijski. Spojevi baza emiter korištenih tranzistora nisu identični, iako se to u procesu proizvodnje nastoji postići. Ta razlika će proizvesti izlazni napon različit od nule iako su ulazni naponi isti. Ova pojava je poznata kao naponsko razdešenje (input offset voltage) i kod preciznih primjena potrebno je vršiti kompenzaciju ovog napona. To se postiže tako što se između nožica 5 i 1 postavi potencijometar (10k), a njegov klizač se vezuje na minus napajanje. Na oba ulaza se dovede isti napon (vežu se na masu), i potencijetrom se izlaz postavlja na nulu (slika 59). Tipična vrijednost naponskog razdešenja iznosi nekoliko mV.

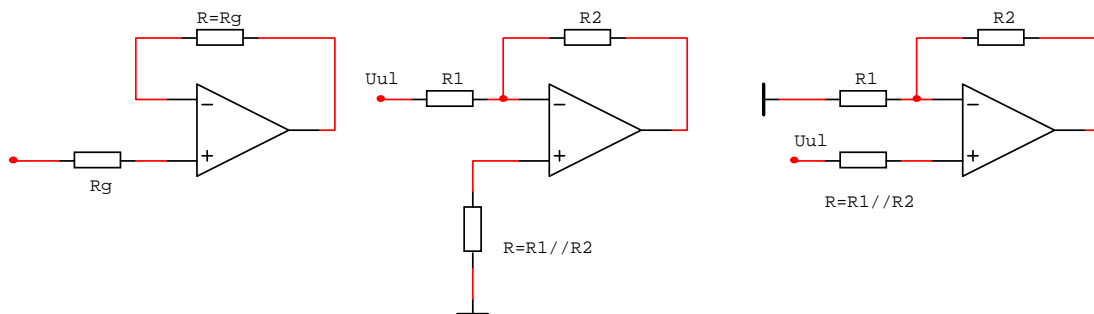


Slika 58. Napon razdešenja



Slika 59. Kompenzacija napona razdešenja

Strujno razdešenje je posljedica tečenja različitih struja u pojačalo na plus ulazu i minus ulazu. Iako su ove struje male (svoga nekoliko nA) one mogu praviti grešku na izlazu. Zato se vrši kompenzacija ovog uticaja dodavanjem otpora prema slici 60.  $R_g$  je otpor naponskog izvora.

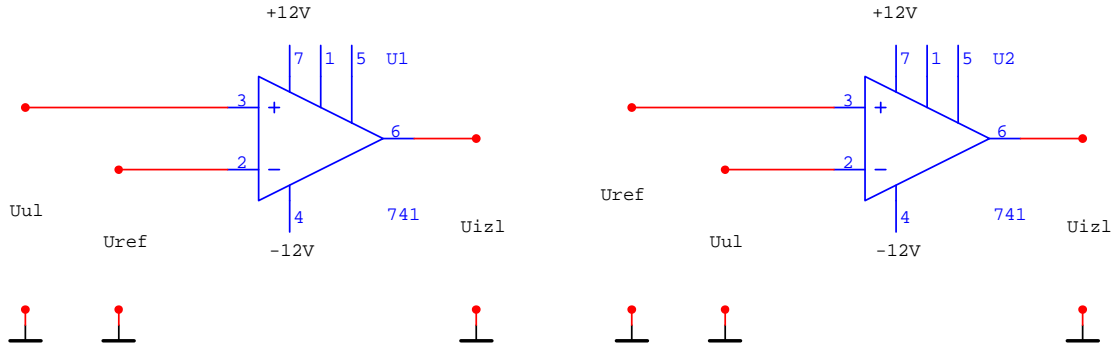


Slika 60. Kompenzacija strujnog razdešenja

### 4.3. Karakteristični spojevi na bazi OP

#### 4.3.1. Komparator

Kada se OP koristi kao komparator onda se na jedan od ulaza dovodi ulazni signal, a na drugi ulaz se dovodi referentni napon.



Slika 61. Spoj OP kao komparatora

Ako je pojačanje pojačala veliko (kod idealnog pojačala ono teži beskonačnosti) onda i pri vrlo malim  $\varepsilon$  ( $\varepsilon = U_{ul+} - U_{ul-}$ ) izlaz postaje vrlo velik (teži beskonačnosti). Jasno nam je da izlaz ne može biti beskonačno velik i on je uvijek manji od napona napajanja. OP se uglavnom napaja dvostranim napajanjem koje može da varira od  $\pm 5$  do  $\pm 18$ V, (u industriji se uglavnom koristi  $\pm 15$  ili  $\pm 12$ V), tako da će izlaz kod  $\varepsilon > 0$  biti  $+U_z$  a za  $\varepsilon < 0$  biti  $-U_z$ . Ovdje su  $U_z$  naponi zasićenja OP, tj. najveći napon koji se za dato napajanje može pojaviti na izlazu OP. Ovi naponi su otprilike za 1V manji od napona napajanja.

Prenosna funkcija komparatora data je jednačinama 19 i 20.

Slučaj da se  $U_{ul}$  dovodi na + ulaz:

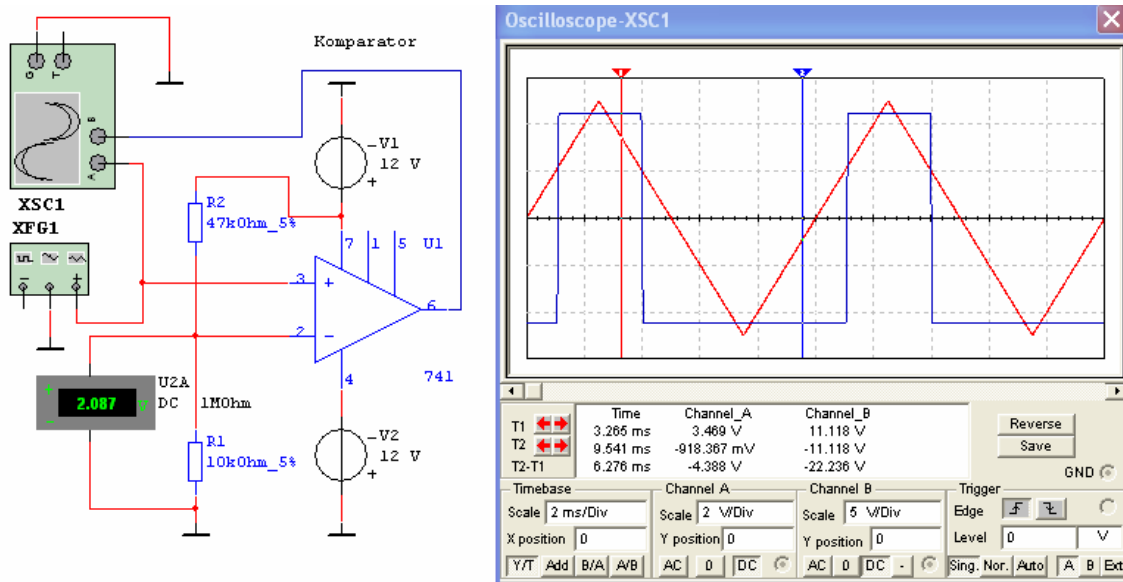
$$U_{izl} = \begin{cases} +U_z, & \varepsilon > 0 \text{ tj. } U_{ul} > U_{ref} \\ -U_z, & \varepsilon < 0 \text{ tj. } U_{ul} < U_{ref} \end{cases} \quad (19)$$

Slučaj da se  $U_{ul}$  dovodi na – ulaz:

$$U_{izl} = \begin{cases} -U_z, & \varepsilon < 0 \text{ tj. } U_{ul} > U_{ref} \\ +U_z, & \varepsilon > 0 \text{ tj. } U_{ul} < U_{ref} \end{cases} \quad (20)$$

### **Eksperiment 5**

Spojiti u MULTISIM-u šemu prema uzorku datom na slici 62. Odabrati  $R_1$  i  $R_2$  tako da bude  $U_{ref} = -1,5$ V. Realizirati navedeni spoj na matadoru, te snimiti rezultate. Porediti dobivene rezultate sa onim dobivenim simulacijom i računski. Ako se na ulaz dovodi sinusni signal amplitude 5V, eksperimentalno odrediti gornju frekvenciju ulaznog sinusnog signala pri kojoj će komparator prebacivati izlaz sa jednog nivoa na drugi za vrijeme kraće od 5% trajanja prethodnog naponskog nivoa na izlazu. Za razmišljanje: kako možemo realizirati komparator ako imamo unipolarno napajanje?



Slika 62. Demonstracija rada OP kao komparatora

#### 4.3.2. Negativna povratna sprega

Zbog vrlo velikog pojačanja ( $>200\ 000$  za većinu realnih OP) kada na ulaze pojačala dovedemo naponski signal od svega nekoliko  $\mu\text{V}$  izlaz otvorenog pojačala će biti u zasićenju ( $+U_z$  ili  $-U_z$ ), zato se uvođenjem negativne povratne sprega smanjuje pojačanje sklopa da bi se izlaz sveo u vrijednosti manje od napona zasićenja. Negativna povratna sprega se izvodi vraćanjem dijela signala sa izlaza preko impedansi  $Z_1$  i  $Z_2$  na  $-$  ulaz. Kod određivanja prenosne funkcije sklopova na bazi OP koji posjeduju negativnu povratnu spregu uzimamo da se izlaz kreće u granicama  $+U_z$  i  $-U_z$  odnosno da je razlika napona na  $+$  ulazu OP i  $-$  ulazu OP jednaka nuli, odnosno  $\varepsilon = U_{ul+} - U_{ul-} = 0$ . Ovakvo razmatanje dolazi iz činjenice da je pojačanje pojačala veliko, a izlaz konačan (zbog postojanja negativne povratne sprega izlaz je manji od  $U_z$ ), jer je  $U_{izl} = A_u U_{ul-}$ . Pretpostavimo da je  $U_{izl} = 5\text{V}$  i neka je  $A_u = 100000$ , tada je  $U_{ul-} = 50\mu\text{V}$ , što znači da sa velikim  $A_u$  ovaj napon teži nuli. Uopšteno se uzima da je  $\varepsilon = 0$ . Kada se jedan od ovih napona fiksira onda ga drugi prati, odnosno  $U_{ul+} = U_{ul-}$ . Ova pojava se zove *virtuelni kratki spoj*. Na bazi negativne povratne sprega može se realizirati vrlo veliki broj različitih spojeva: invertovani pojačavač, neinvertovani pojačavač, naponsko sljedilo, sumator, sklop za oduzimanje, diferencijator, integrator, itd. Kombinovanjem ovih sklopova moguće je realizirati vrlo različite sklopove.

Negativna povratna sprega proširuje frekventni opseg spoja prema obrascu:

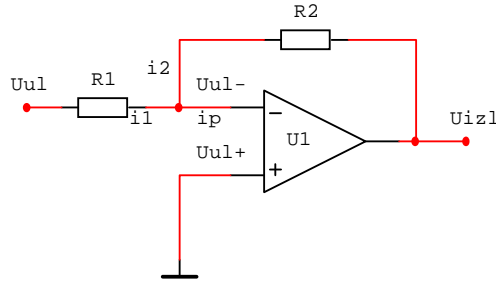
$$f_g = f_o (1 + \beta \cdot A_u) \quad (21)$$

gdje je  $f_o$  granična frekvencija pojačala u otvorenom,  $\beta$  relativna vrijednost izlaznog signala koji vraćamo na ulaz, a  $A_u$  naponsko pojačanje sklopa u otvorenom.

#### 4.3.3. Invertorski spoj

Na primjeru invertorskog spoja daćemo proceduru izračunavanja prenosne funkcije, a za sve ostale sklopove daćemo samo polazne jednačine i krajnji rezultat. Invertorski spoj se realizira prema slijedećoj šemi:





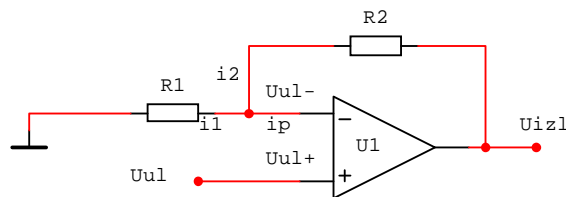
Slika 63. Invertorski spoj

Pošto je ostvarena negativna povratna sprega onda je napon na ulaznim stezaljkama OP jednak nuli tj.  $\varepsilon = U_{ul+} - U_{ul-} = 0$ , odakle slijedi da je  $U_{ul+} = U_{ul-} = 0$  jer je  $U_{ul+}$  spojen na masu (0 V). Jednačina po strujama za čvor (-) glasi:  $i_1 = i_2 + i_p$ . Pošto je  $i_p = 0$  (velika ulazna impedansa) onda su struje  $i_1$  i  $i_2$  jednake, odnosno vrijedi:  $\frac{U_{ul}}{R_1} = \frac{-U_{izl}}{R_2}$  odakle slijedi prenosna funkcija sklopa:

$$U_{izl} = -\frac{R_2}{R_1} U_{ul}. \quad (22)$$

#### 4.3.4. Neinvertorski spoj

Kod neinvertorskog spoja ulazni signal se dovodi na + ulaz dok se  $R_1$  spaja na masu prema slici:



Slika 64. Neinvertorski spoj OP

Sklop je opisan slijedećim jednačinama:

$$\varepsilon = U_{ul+} - U_{ul-} = 0, \quad U_{ul+} = U_{ul}, \quad U_{ul-} = U_{ul}$$

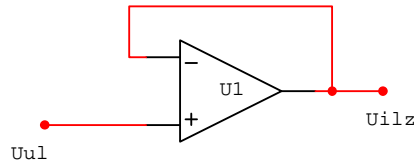
$$i_1 = i_2 + i_p, \quad i_p = 0$$

$$\frac{0 - U_{ul}}{R_1} = \frac{U_{ul} - U_{izl}}{R_2}.$$

odakle slijedi

$$U_{izl} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) U_{ul}. \quad (23)$$

## 4.3.5. Naponsko sljedilo



Slika 65. Naponsko sljedilo

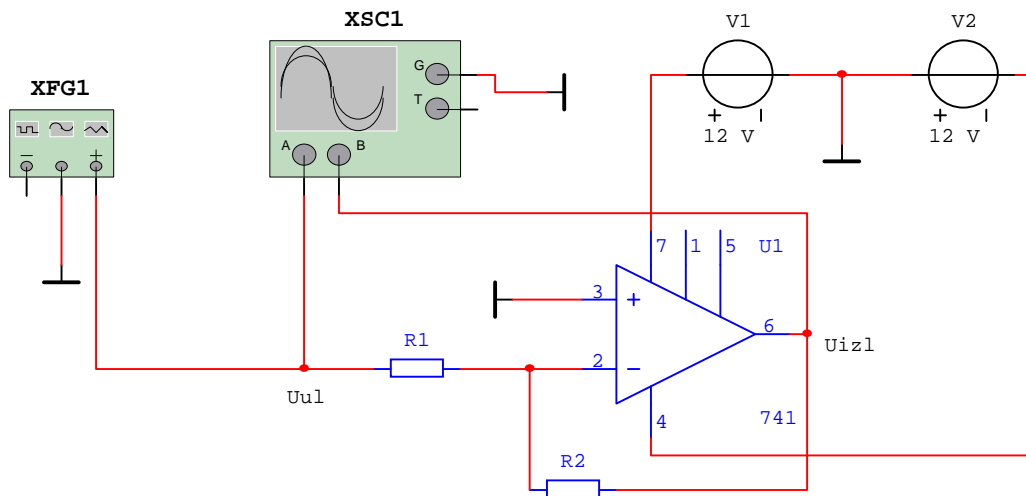
Kod naponskog sljedila izlaz kratko spojamo sa - ulazom, čime ostvarujemo negativnu povratnu spregu. Sada je napon na - ulazu jednak ulaznom naponu zbog  $\varepsilon=0$ , a i izlaznom naponu jer smo ostvarili kratku vezu izlaza i - ulaza. Odavde slijedi prenosna funkcija sklopa:

$$U_{izl} = U_{ul} \quad (24)$$

Naponsko sljedilo na svom izlazu daje isti napon kao napon na ulazu. Koristi se za impedantno razdvajanje dva sklopa, posebno u mjernoj tehnici.

**Eksperiment 6**

Zadatak eksperimenta je provjera izraza 21,22,23 i 24. Za primjer poslužit ćemo se slikom 66. Ovdje je prikazan invertorski spoj sa pojačanjem 2. Na isti način promjenom  $R_2$  mijenjati pojačanje sklopa prema vrijednostima datim u tabeli. Isto to uraditi za sklop neinvertovanog pojačavača. Na ulaz dovesti sinusni signal amplitude 100 mV (od vrha do vrha) i mijenjati frekvenciju prema vrijednostima u tabeli. Mjeriti amplitudu izlaza i upisivati u tabelu. Nacrtati na jednom dijagramu sve A-f karakteristike. Za f koristiti logaritamsku razmjernu (log f). Provjeriti izraze 21,22,23 i 24. Dati komentar. Porediti računске rezultate sa onim dobivenim eksperimentom i simulacijom. Uzeti da je  $A_u=200000$ ,  $f_0=10\text{Hz}$ .



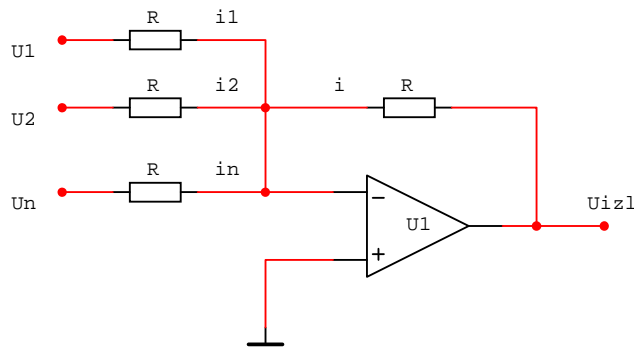
Slika 66. Primjer uz eksperiment 6

Tabela mjerenja

A	Invertorski spoj					Neinvertorski spoj					NS
	1	2	20	100	200	1	2	20	100	200	
f											1
10											
20											
...											
100											
200											
...											
1k											
2k											
...											
10k											
20k											
...											
100k											
200k											
...											
1M											
2M											

Napomena: U tabeli su date samo prve dvije vijednosti unutar jedne dekade i tri tačke, što znači da se mjerenje izvodi i za ostale vijednosti. NS – naponsko sljedilo.

#### 4.3.6. Spoj za sabiranje



Slika 67. Sumator

Jednačine koje opisuju sumator:

$$i_1 + i_2 + \dots + i_n = i$$

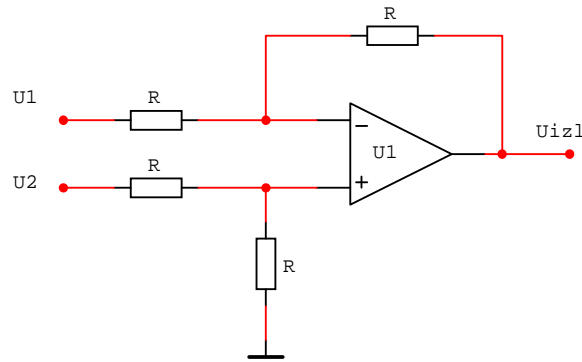
$$U_{izl} = -R \cdot i$$

$$i_1 = \frac{U_1}{R}, i_2 = \frac{U_2}{R}, \dots, i_n = \frac{U_n}{R}.$$

Iz kojih se dobije prenosna funkcija sklopa:

$$U_{izl} = -(U_1 + U_2 + \dots + U_n). \quad (25)$$

#### 4.3.7. Spoj za oduzimanje



Slika 68. Spoj za oduzimanje

Spoj za oduzimanje je opisan slijedećim jednačinama:

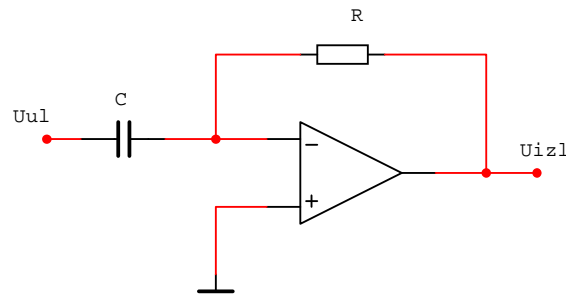
$$u_{ul+} = \frac{U_2}{2}, \quad u_{ul-} = \frac{U_2}{2}, \quad i_1 = i, \quad i_1 = \frac{U_1 - u_{ul-}}{R}, \quad i = \frac{u_{ul-} - U_{izl}}{R},$$

iz kojih se dobije prenosna funkcija sklopa za oduzimanje:

$$U_{izl} = U_2 - U_1. \quad (26)$$

#### 4.3.8. Diferencijator

Šema diferencijatora je data na slici 69.



Slika 69. Diferencijator

Ako primijenimo isti proračun kao na ostale krugove uz izraz za struju na C koji glasi:

$$i_c = C \frac{du_c}{dt}. \quad (27)$$

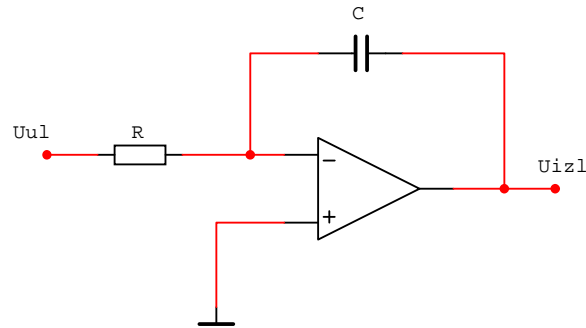
Pošto je jedna strana kapaciteta na ulaznom naponu, a druga na masi onda je  $u_c = U_{ul}$  te je izlaz dat sa:

$$U_{izl} = -RC \frac{dU_{ul}}{dt}. \quad (28)$$

Ako odaberemo da je  $RC=1$  na izlazu dobijamo izvod ulaznog signala.

## 4.3.9. Integrator

Šema integratora je data na slici 70.



Slika 70. Integrator

R i C su zamijenili mjesta pa je sistem opisan jednačinom:

$$-RC \frac{dU_{izl}}{dt} = U_{ul},$$

iz koje se jednostavno dobija:

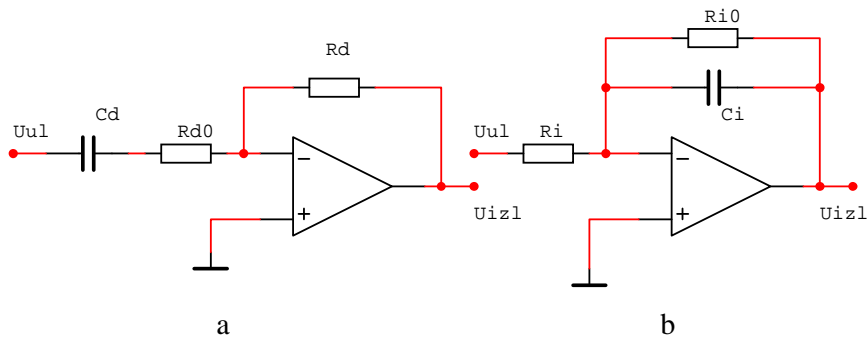
$$U_{izl} = -\frac{1}{RC} \int U_{ul} dt. \quad (29)$$

Ako odaberemo  $RC=1$  na izlazu dobijemo integral ulaznog signala.

**Eksperiment 7**

Potrebno je proračunati elemente R i C diferencijatora i integratora tako da amplituda izlaznog signala bude u opsegu (1;10)V. Na ulaz diferencijatora dovodi se sinusni signal amplitude 5 V i frekvencije 1kHz. Na ulaz integratora dovodi se signal četvrtke i pile amplitude 5V i frekvencije 1kHz. Napraviti računski proračun, izvršiti simulaciju u MULTISIM-u, te izvršiti mjerenje na fizičkom modelu. Provjeriti rezultate. Posebno obratiti pažnju na oblik izlaznog signala.

Zatim fizički model modificirati prema slici 71.

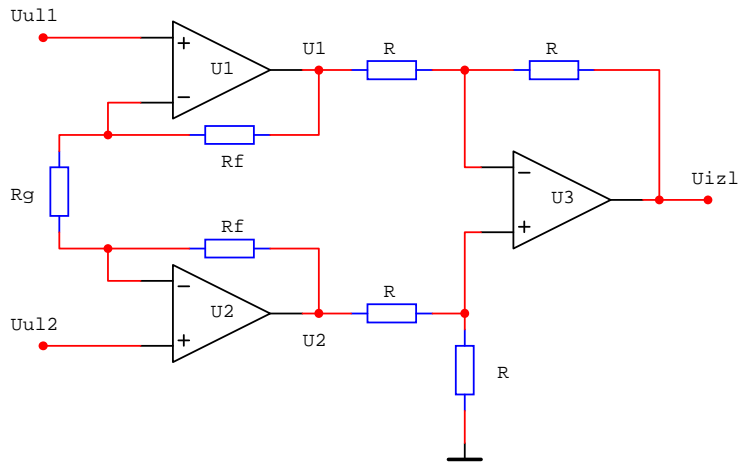


Slika 71. Realni diferencijator (a) i realni integrator (b)

Za  $R_{d0}$  uzeti vrijednost 10 puta manju od  $R_d$ , a za  $R_{i0}$  uzeti vrijednost 30 puta veću od  $R_i$ . Snimiti rezultate te porediti sa onima dobivenim bez otpora  $R_{d0}$  i  $R_{i0}$ . Dati komentar.

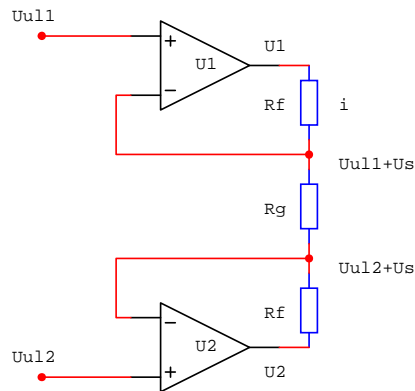
#### 4.3.10. Instrumentaciono pojačalo

Jedan od osnovnih problema u mjerenju jeste prisustvo šuma u korisnom signalu. Izvori šuma su različiti i oni se nemogu u potpunosti eliminirati. Jedan od načina kako možemo minimizirati uticaj šuma jeste korištenje instrumentacionih pojačala. Instrumentaciono pojačalo se sastoji od tri pojačala spojena prema slici 72.



Slika 72. Osnovna šema instrumentacionog pojačala

Pojačala  $U_1$  i  $U_2$  su spojena kao sklop za oduzimanje čija prenosna funkcija se može odrediti prema šemi sa slike 73.



Slika 73. Određivanje napona  $U_1$  i  $U_2$

Pojačala su sa negativnom povratnom spregom tako da će naponi na  $-$  ulazima pojačala odgovarati ulaznim naponima. Pošto je na ulazu prisutan šum koji istovremeno djeluje i na jedan ulaz i na drugi ulaz onda će se napon šuma superponirati sa ulaznim naponom tako da smo te napone označili sa  $U_{u11}+U_s$  i  $U_{u12}+U_s$ . Struja u pojačalo je jednaka nuli tako da kroz otpore  $R_f$  i  $R_g$  teče ista struja  $i$  i ona iznosi  $i = \frac{U_{u11} - U_{u12}}{R_g}$ . Sada se naponi  $U_1$  i  $U_2$  mogu

izračunati i oni iznose:  $U_1 = U_{u11} + U_s + i \cdot R_f$ ,  $U_2 = U_{u12} + U_s - i \cdot R_f$ .

Poslije uvrštavanja izraza za struju  $i$  sređivanja dobijemo da su ti naponi:

$$U_1 = \left(1 + \frac{R_f}{R_g}\right) \cdot U_{ul1} - \frac{R_f}{R_g} \cdot U_{ul2} + U_s$$

$$U_2 = \left(1 + \frac{R_f}{R_g}\right) \cdot U_{ul2} - \frac{R_f}{R_g} \cdot U_{ul1} + U_s$$
(30)

Pojačalo  $U_3$  je spojeno kao diferencijalno (sklop za oduzimanje) te je izlaz dat sa:

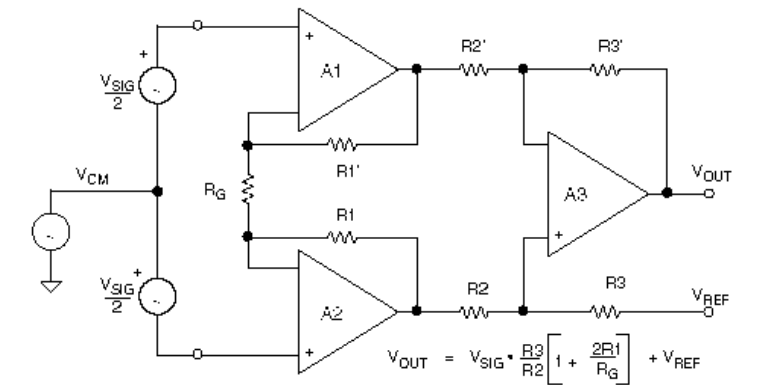
$$U_{izl} = U_2 - U_1 = \left(1 + \frac{R_f}{R_g} + \frac{R_f}{R_g}\right)U_{ul2} - \left(1 + \frac{R_f}{R_g} + \frac{R_f}{R_g}\right)U_{ul1} + U_s - U_s$$

$$U_{izl} = \left(1 + \frac{2 \cdot R_f}{R_g}\right)(U_{ul2} - U_{ul1})$$
(31)

Ako ulazni napon  $U_{ul1}$  spojimo na masu, a na  $U_{ul2}$  spojimo izvor ulaznog signala onda ćemo dobiti na izlazu pojačan ulazni signal bez uticaja šuma. Pojačanje takvog sklopa iznosi:

$$A = 1 + \frac{2R_f}{R_g}$$
(32)

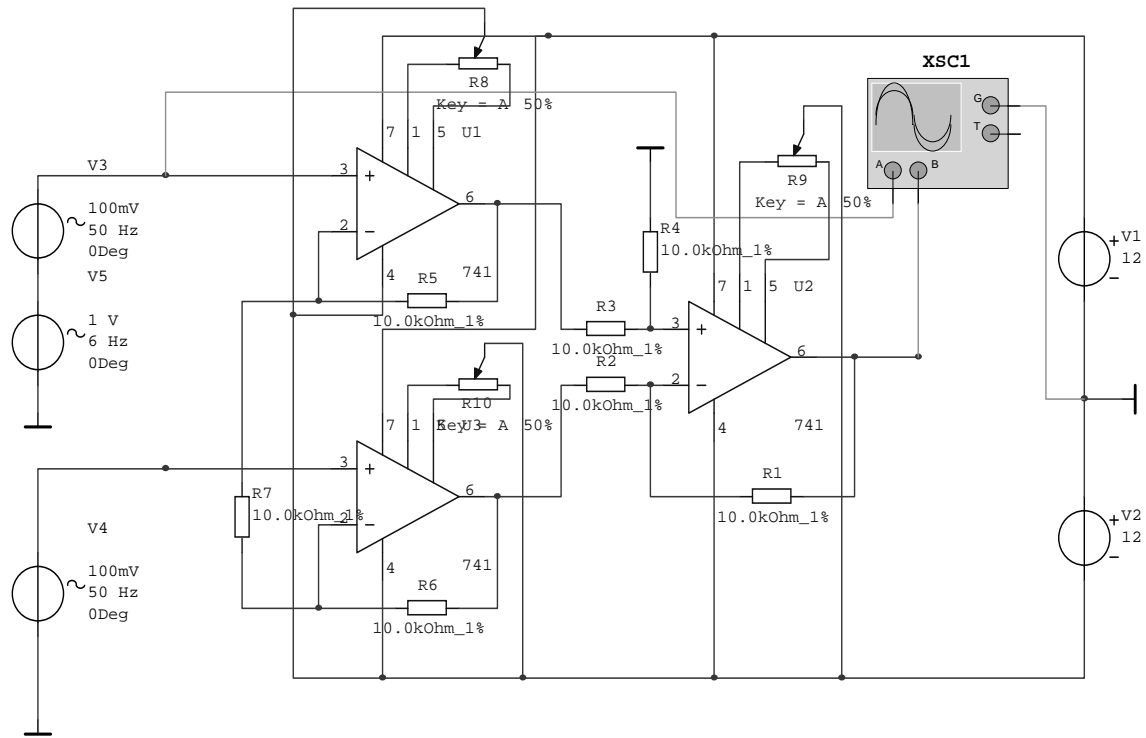
Velika primjena instrumentacionih pojačala dovela je do pojave ovakvih IC kao pojedinačnih komponenti nazvanih 'tri OP u pojačalu' (The three-op-amp in amp) (slika 74). S obzirom da se svi otpori integrišu to je u procesu proizvodnje moguće ih precizno napraviti i smanjiti grešku koju unosi tolerancija otpora. Prenosna funkcija ovakvog OP data je izrazom na slici 74. Za razliku od prethodno izvedenog izraza ovdje figuriše i član  $+V_{ref}$ . Ovakva pojačala se koriste kada se bipolarni ulazni signal želi podići za određeni istosmjerni nivo, na primjer prije AD konverzije kod AD konvertora sa unipolarnim ulaznim signalom.



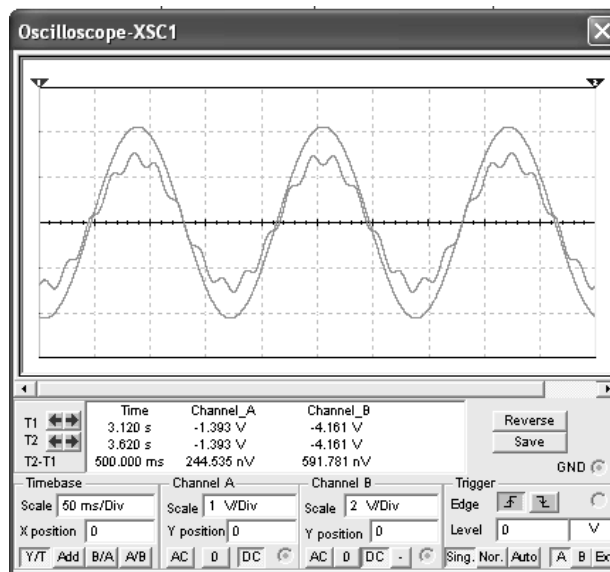
Slika 74. Tri OP u pojačalu, integrirano instrumentaciono pojačalo

## **Eksperiment 8**

Korištenjem instrumentacionog pojačala napraviti sistem za mjerenje velikih struja korištenjem strujnog šenta. Neka je vrijednost strujnog šenta  $10\text{m}\Omega$  i neka se struje mogu mjeriti u opsegu od 0 do 10A. Informacione kablove sa šenta provesti kroz područje sa energetske vodovima 220V tako da se inducira šum. Napraviti isti sistem ali sa običnim diferencijalnim pojačalom. Porediti rezultate. Koristiti sliku 75 kao demonstracioni primjer.



Slika 75. Provjera principa rada instrumentacionog pojačala



Slika 76. Signali na ulazu i izlazu za primjer sa slike 75

Slika 76 pokazuje princip rada instrumentacionog pojačala. Ulazni signal koji se sastoji iz sinusnog signala 6Hz,1V (korisni signal) i 50Hz,100mV (šum) je poslije prolaska kroz instrumentaciono pojačalo očišćen od signala šuma. Izlazni signal se sastoji samo od korisnog signala. Ovakav način eliminacije šuma je moguć samo ako se signal šuma istovremeno inducira i na + ulaz i na – ulaz. Šum koji proizvode mjerni izvori, kao i elektronski sklopovi koji obrađuju signale nije moguće ovako eliminisati.



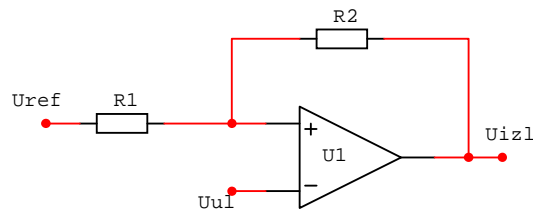
## 4.3.11. Pozitivna povratna sprega

Ukoliko sa izlaza OP vratimo dio signala na + ulaz OP ostvarit ćemo pozitivnu povratnu spregu. Tada će izlaz biti u zasićenju  $+U_z$  ili  $-U_z$  u ovisnosti kakav je napon na – ulazu. To dalje znači da za proračun ovako realiziranog spoja ne koristimo jednačinu  $\varepsilon=0$  nego koristimo činjenicu da je izlaz ili  $+U_z$  ili  $-U_z$ .

## 4.3.12. Šmitov triger

Kao primjer pozitivne povratne sprege obradićemo komparator realiziran na bazi OP. Za razliku od prethodno objašnjenog komparatora kada se OP koristi u otvorenom, ovdje ćemo koristiti povratnu spregu i komparator će imati histerezu.

Šema sklopa je data na slici 77.



Slika 77. Šmitov triger

Pošto je ostvarena pozitivna povratna sprega izlaz se nalazi u zasićenju. Pretpostavimo da je  $U_{ul}=0V$  a da je  $U_{ref}>0$ , tada je  $\varepsilon>0$  i izlaz je na naponu  $+U_z$ . Napon na plus ulazu OP je sada određen sa  $U_{ref}$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  i  $+U_z$  i on iznosi:

$$V_g = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{ref} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_z \quad (33)$$

Ako sada ulazni napon podižemo do vrijednosti veće od  $V_g$ ,  $\varepsilon$  će promijeniti znak i izlaz će otići u – zasićenje. Sada će na + ulazu OP da se formira napon koji iznosi:

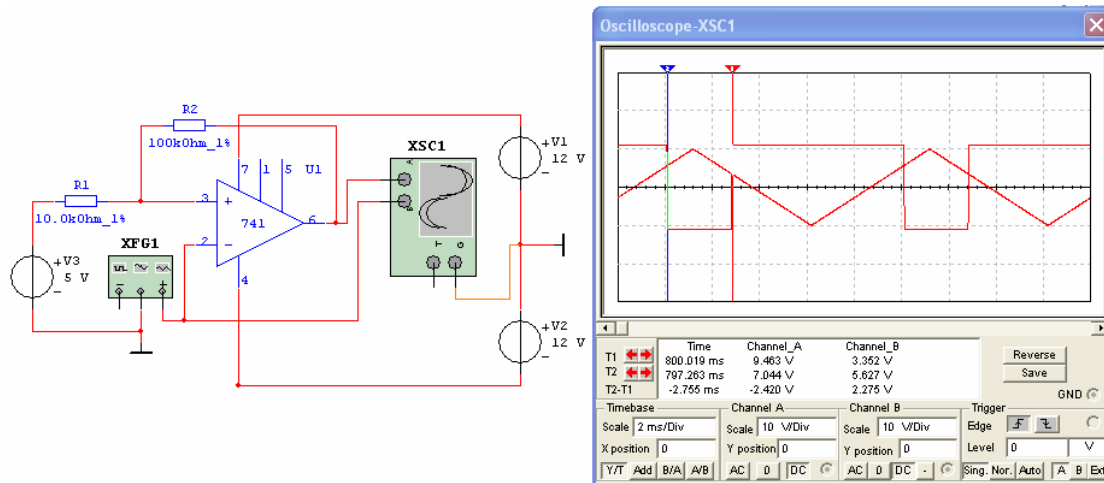
$$V_d = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{ref} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_z \quad (34)$$

Ako nastavimo povećavati ulazni napon izlaz će ostati na  $-U_z$ , jer će stalno  $\varepsilon$  biti manje od nule. Kada ulaz počnemo smanjivati  $\varepsilon$  će promijeniti znak tek kada ulaz postane manji od  $V_d$  i izlaz će se vratiti u  $+U_z$ . Pošto je  $V_d < V_g$  to znači da se izlaz vraća na  $+U_z$  pri manjoj vrijednosti ulaza nego se prebacio u  $-U_z$ . Ova razlika se zove histereza i ona iznosi:

$$H = V_g - V_d = \frac{2R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_z \quad (35)$$

Vrijednosti pri kojima dolazi do promjene izlaza nazivaju se pragovi: gornji  $V_g$  i donji  $V_d$ .

Za primjer pokazaćemo rezultate simulacije rada šmitovog trigeru u MULTISIMu. Uzeti ćemo da je  $V_{ref}=5V$ ,  $+U_z=11V$ ,  $-U_z=11V$ ,  $R_1=10k$ ,  $R_2=100k$ . Prema izrazima 33,34 i 35 vrijednosti pragova i histereze iznose:  $V_g=5,545V$ ,  $V_d=3,545$ ,  $H=2V$ . Ako na ulaz dovedemo signal pile amplitude 10V i frekvencije 100Hz signali ulaza i izlaza će izgledati kao na slici 78.



Slika 78. Princip rada Šmitovog trigera

#### 4.3.13. Astabilni multivibrator

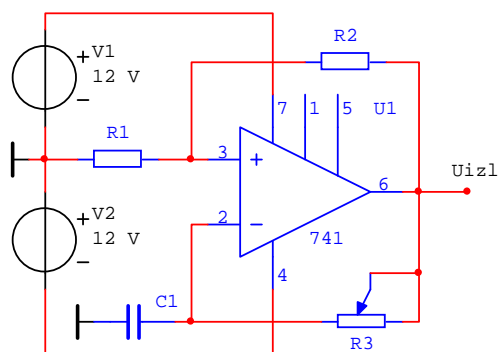
Astabilni multivibrator na bazi OP741 je predstavljen slikom 79, a opisan je sistemom jednačina (36). Sklop je interesantan jer su realizirane obje povratne sprege. Pošto postoji pozitivna povratna sprega izlaz će biti u zasićenju, a napon na plus ulazu OP određen sa  $V_g$  ili  $V_d$  (jednačine 36). Pošto je struja u pojačalo nula to će se kondenzator puniti preko otpora  $R_3$  na vrijednost izlaza. Kada napon na kondenzatoru dostigne napon  $V_g$  ili  $V_d$  ε promjeni predznak i izlaz mijenja polaritet. Sada se kondenzator puni ka novoj vrijednosti izlaza i taj se proces ponavlja. Ovako dobijene oscilacije daće na izlazu signal koji za male frekvencije može izgledati kao signal četvrtke.

$$\begin{aligned}
 V_g &= U_{ref} \frac{R_2}{R_2 + R_1} + U_z \frac{R_1}{R_2 + R_1}, \\
 V_d &= U_{ref} \frac{R_2}{R_2 + R_1} - U_z \frac{R_1}{R_2 + R_1}, \\
 \tau &= R_3 C_1, \\
 t_1 &= \tau \ln \frac{U_z - V_d}{U_z - V_g}, \\
 t_2 &= \tau \ln \frac{U_z + V_d}{U_z + V_g}.
 \end{aligned} \tag{36}$$

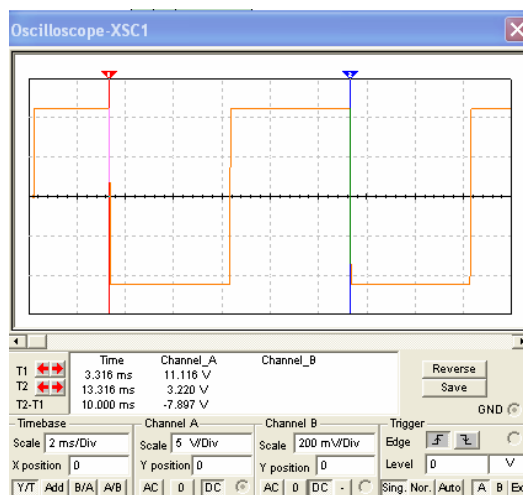
Za primjer uzmimo da je potrebno realizirati astabilni multivibrator tako da se frekvencija može mijenjati od 100Hz do 2kHz. Ako u sistemu jednačina (36) uvrstimo da je  $U_{ref}=0V$ ,  $R_1=R_2$ , dobijemo da je frekvencija određena sa  $R_3$  i  $C_1$  prema izrazu (37):

$$f = \frac{0,455}{R_3 C_1} \tag{37}$$

Ako odaberemo  $C_1=0,1\mu F$  za promjene  $f$  od 100Hz do 2kHz,  $R_3$  se mijenja u granicama:  $45500\Omega$  do  $2275\Omega$ . Zato ćemo odabrati za  $R_3$  potencijometar od 50k. Otpori  $R_1$  i  $R_2$  su jednaki te možemo ih uzeti po 10k.



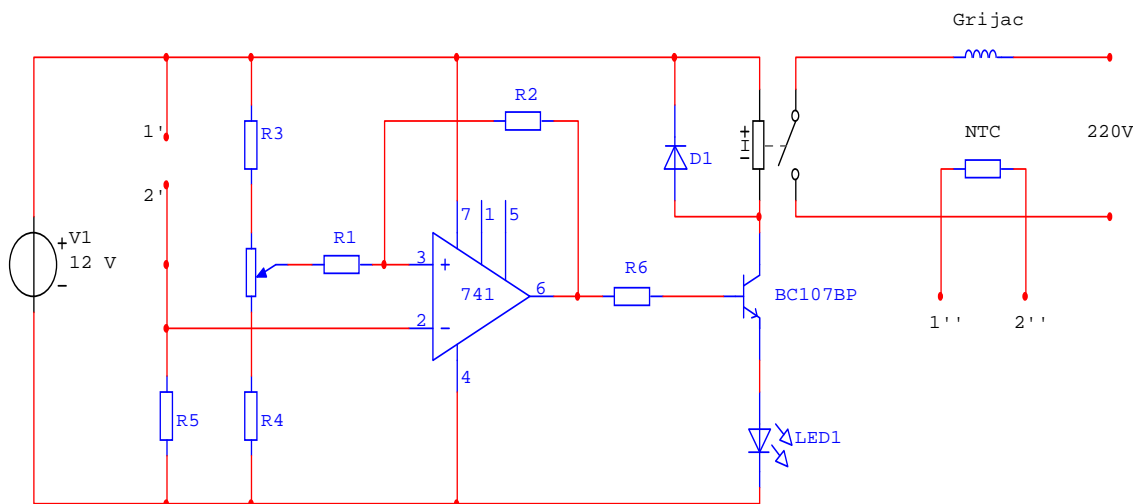
Slika 79. Astabilni multivibrator na bazi OP741



Slika 80. Signali na izlazu astabila  $f=100\text{Hz}$

### Eksperiment 9

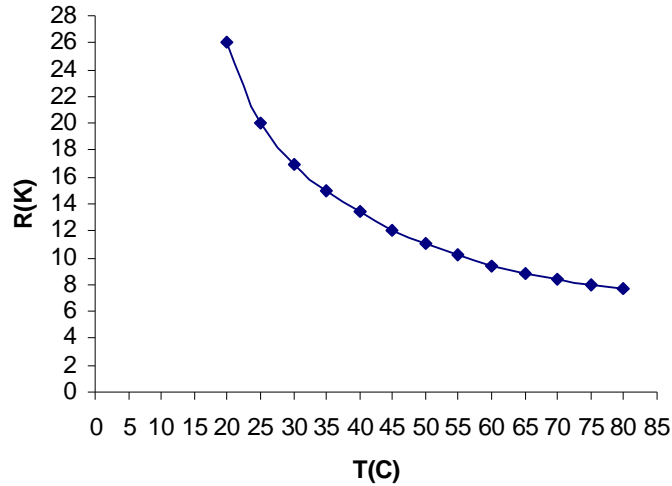
Koristeći Šmitov triger realiziran na bazi OP 741 napraviti dvopoložajni regulator temperature sa mogućnošću regulisanja temperature u opsegu  $25^{\circ}\text{C} - 70^{\circ}\text{C}$ . Šemu sklopa realizirati prema slici 81. Neka je osjetljivost regulatora bolja od  $2^{\circ}\text{C}$ .



Slika 81. Šema dvopoložajnog regulatora temperature

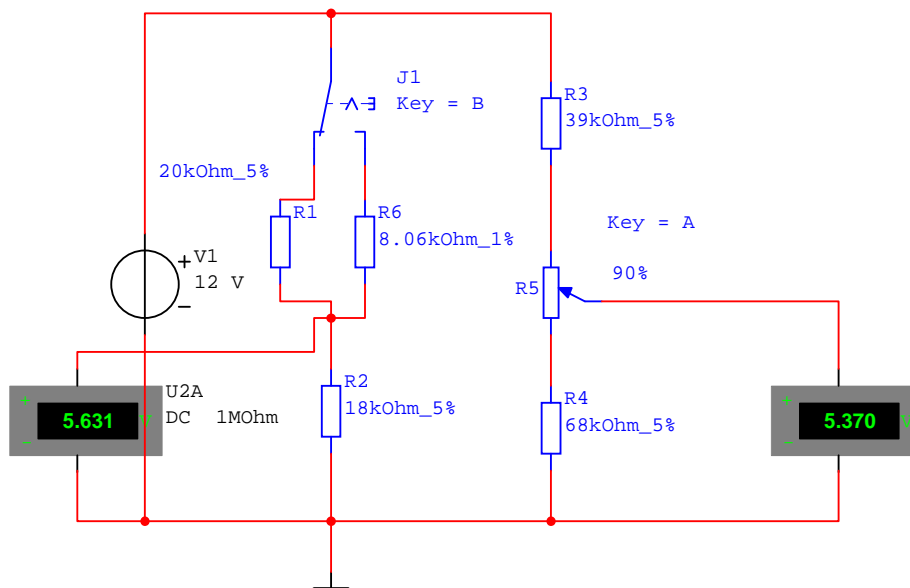
Upustvo za realiziranje zadatka.

Snimiti karakteristiku NTC elementa. Po osnovu toga odabrati otpore  $R_5$ ,  $R_3$ ,  $R_4$ . Uzeti  $R_5$  približno jednako vrijednosti NTC otpora na  $25^{\circ}\text{C}$ . Otpore  $R_3$ ,  $R_4$  i potencijetar P odabrati tako da se potencijetrom P mogu zadati krajnje vrijednosti temperature ( $25^{\circ}\text{C}$  i  $70^{\circ}\text{C}$ ). Na primjer neka je karakteristika NTC elementa data na slici 82.



Slika 82. Karakteristika NTC elementa za primjer

Sa karakteristike se očitaju vrijednosti NTC elementa na temperaturama  $25^{\circ}\text{C}$  i  $70^{\circ}\text{C}$ , i one kao što vidimo iznose:  $R_{25^{\circ}\text{C}}=20\text{k}$  i  $R_{70^{\circ}\text{C}}=8\text{k}$ . Sada za  $R_3$  odaberemo  $18\text{k}$  i usvojimo vrijednost potencijometra koja nam stoji na raspolaganju. Kod nas je to  $50\text{k}$ . Za zadati opseg promjene temperatura NTC se mijenja od  $20\text{k}$  do  $8\text{k}$  što iznosi  $12\text{k}$ , dok potencijetrom možemo mijenjati otpor u iznosu  $50\text{k}$ , što iznosi oko 4 puta više. Sada ćemo u prvoj iteraciji otpornu mrežu sa NTC-om i sa potencijetrom odabrati tako da odnos bude 1:4. Dobili smo  $R_4=68\text{k}$ ,  $R_3=33\text{k}$ . Simulacijm u MULTISIMU prema šemi sa slike 82 preciznije ćemo odrediti vrijednosti  $R_4$  i  $R_3$  tako da potencijetrom možemo dobiti oba napona  $5,63\text{V}$  i  $8,42\text{V}$  kada NTC ima vrijednost  $20\text{k}$  i  $8\text{k}$ . Pri tome treba da potencijetar mijenja vrijednosti od 10% do 90%. Kao što vidimo korigirali smo otpor  $R_3$  na  $39\text{k}$ .

Slika 83. Eksperimentalno određivanje otpora  $R_4$  i  $R_5$ 

U slijedećem koraku biramo otpore  $R_1$  i  $R_2$ . Njihova vrijednost treba da je što veća da bismo mogli zanemariti struju koja teče kroz njih. Neka su  $R_1+R_2>500\text{k}$ . Odnos ovih otpora određuje histerezu (izraz 35). Izraz za histerezu daje naponsku razliku pragova, a nama histereza treba u stepenima. Ako usvojimo da je histereza manja od zadate osjetljivosti recimo

$H < 2^{\circ}\text{C}$  onda protuvrijednost u voltima možemo odrediti sa dijagrama karakteristike NTC elementa. Ako karakteristiku u dijelu gdje se otpor sporije mijenja sa promjenom temperature aproksimiramo pravcem imamo:

$$k = \frac{R_{60^{\circ}\text{C}} - R_{70^{\circ}\text{C}}}{60 - 70} = \frac{9000 - 8000}{-10} = -100 \frac{\Omega}{^{\circ}\text{C}},$$

što znači da se vrijednost NTC elementa smanji za  $100\Omega$  sa porastom temperature za  $1^{\circ}\text{C}$ . To dalje znači da se u tom dijelu karakteristike pri porastu temperature za  $1^{\circ}\text{C}$  napon na -ulazu OP promijeni za:

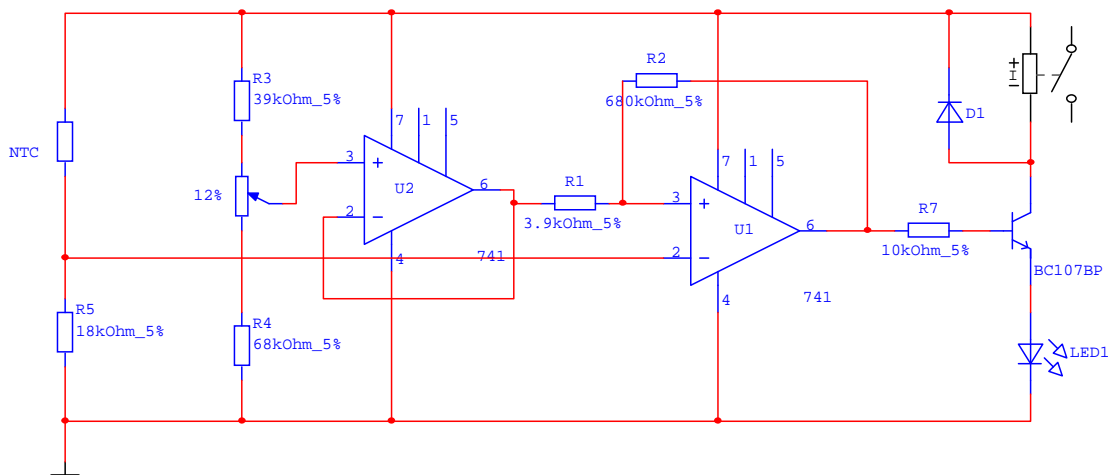
$$\Delta U = U_{70} - U_{69} = \frac{12}{18000 + 8000 - 100\Omega} \cdot 18000 - \frac{12}{18000 + 8000} \cdot 18000 = 31\text{mV}.$$

Usvojicemo da histereza bude  $60\text{mV}$  što je manje od  $2^{\circ}\text{C}$ . Sada su vrijednosti  $R_1$  i  $R_2$  određene sa:

$$R_1 = R_2 \frac{H}{2U_z - H}.$$

Ako uvrstimo  $U_z = 5\text{V}$  (koristimo unipolarno napajanje  $12\text{V}$ ),  $H = 60\text{mV}$  i usvojimo  $R_2 = 680\text{k}$  dobićemo  $R_1 = 4104\Omega$ . Usvojimo  $R_1 = 3.9\text{k}$ . Sada ćemo sa ovako izračunatim vrijednostima napraviti simulaciju u MULTISIMU i izmjeriti histerezu (kako li se mjeri?). Uočićemo da je histereza mnogo veća nego što smo trebali dobiti. To je zato što smo zanemarili struju kroz  $R_1$  i  $R_2$ . Problem je u tome što su nam vrijednosti  $R_3$ ,  $R_4$  i  $P$  velike. Mogli bismo problem riješiti tako što bismo ove vrijednosti spustili recimo 10 puta ako imamo potencijometar u tom području ( $5\text{k}$ ), a ako nemamo kao što je to kod nas slučaj ubacićemo još jedno operaciono pojačalo kao naponsko sljedilo te problem jednostavno riješiti.

Kompletna šema regulatora će sada izgledati kao na slici 84.



Slika 84. Izvedbena šema dvopoložajnog regulatora prema primjeru

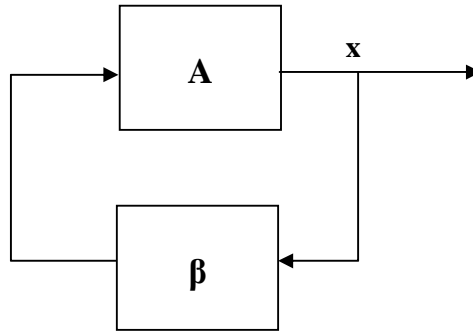
Da biste provjerili princip rada regulatora kao grijač koristiti grijač iz neke stare grijalice, a ostale elemente jednostavno je odabrati. Napraviti demonstracionu maketu prema vlastitom dizajnu.

#### 4.3.14. Oscilator s Wienovim mostom

Vraćanjem dijela signala sa izlaza na ulaz OP moguće je realizirati sklop koji će generirati sinusni signal. Uslov oscilacija dat je Barkhausenovim kriterijem koji glasi:

$$\beta A + 1 = 0. \quad (38)$$

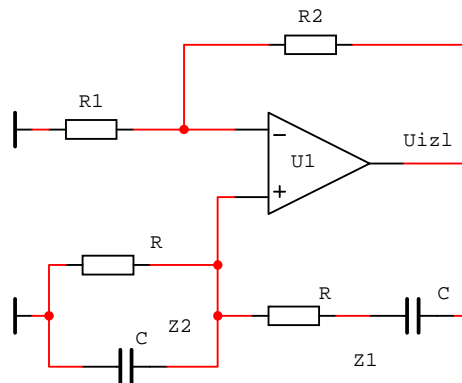
U jednačini 38 A predstavlja pojačanje direktne grane a  $\beta$  pojačanje povratne grane (slika 85).



Slika 85. Pojačavač sa povratnom granom

Ako navedeni sklop generiše sinusni valni oblik onda je  $x$  signal sinusnog oblika. Iz jednačine 38 slijedi da je za pojačanje povratne grane potrebno obezbijediti da bude  $|\beta A| = 1$ . Ako je  $|\beta A| < 1$  amplituda izlaznog signala će kliziti ka nuli i sistem će prestati oscilirati. Pošto je u praksi teško postići uslov  $|\beta A| = 1$ , onda se obično bira da  $|\beta A| > 1$  što povećava amplitudu izlaznih oscilacija. Zbog nelinearnosti i zasićenja karakterisika pojačala ta amplituda se zaustavlja na vrijednosti kada je zadovoljen uslov 38.

Na osnovu navedenog na bazi OP 741 može se realizirati sinusni oscilator poznat kao oscilator s Wienovim mostom (slika 86).



Slika 86. Oscilator s Wienovim mostom

Sa slike se vidi da je napon na izlazu jednak:

$$U_{izl} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot U_+$$

gdje je  $U_+$  napon na + ulazu OP. Napon  $U_+$  se dobiva kao dio naponskog signala sa izlaza ( $U_{izl}$ ) realiziran naponskim djeljiteljem  $Z_1, Z_2$ . Odnosno:

$$U_+ = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot U_{izl}.$$

Ako ovaj izraz uvrstimo u prethodnu jednačinu dobićemo:

$$\frac{Z_1 + Z_2}{Z_2} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \quad (39)$$

gdje su  $Z_1$  i  $Z_2$  dati sa:

$$Z_1 = R + \frac{1}{j\omega C}, \quad Z_2 = \frac{R}{1 + jR\omega C}$$

Pošto je izraz sa lijeve strane jednačine (39) kompleksan, a izraz na desnoj strani realan to slijedi da mora biti zadovoljen uslov:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}\left\{\frac{Z_1 + Z_2}{Z_2}\right\} &= \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \\ \operatorname{Im}\left\{\frac{Z_1 + Z_2}{Z_2}\right\} &= 0 \end{aligned}$$

Kada se ovo izračuna dobije se da će frekvencija oscilovanja biti:

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \quad (40)$$

a  $R_2 = 2R_1$ .

Isti rezultat dobije se ako primijenimo Barkhausenov kriterij  $\beta A + 1 = 0$ , uzevši da je:

$$\beta = \frac{-Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad A = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

### **Eksperiment 10**

Realizirati generator sinusnog valnog oblika na bazi OP741 maksimalne i minimalne frekvencije.

Upustvo za realizaciju vježbe.

Proračunati oscilator za  $f=1\text{kHz}$ . Spojiti proračunati sklop na matador i snimiti izlazni signal. Na mjesto otpora  $R_1$  i  $R_2$  staviti potencijometar te mijenjajući odnos  $R_2/R_1$  postaviti uslov oscilovanja  $|\beta A| = 1$  (odnosno  $R_2 = 2R_1$ ). Kada na izlazu dobijemo čist sinusni signal izmjeriti  $R_2$  i  $R_1$ . Prokomentarisati.

Zatim samo malo smanjiti  $R_2$  (uslov  $|\beta A| < 1$ ). Pratiti šta se dešava. Prokomentarisati.

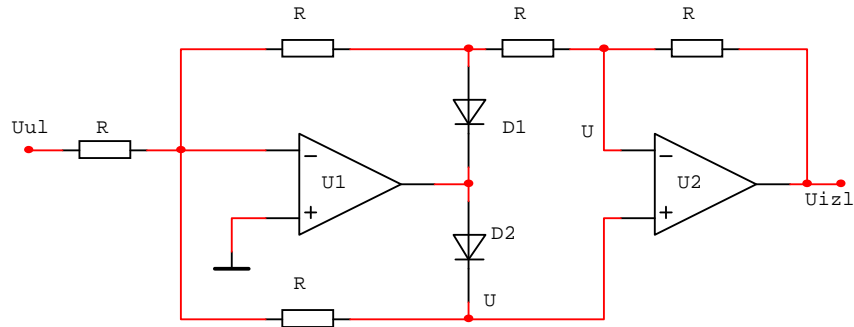
Ponovo vratiti sinusne oscilacije te sada povećavati  $R_2$ . Šta se dešava? Da li sklop osciluje? Ako jeste da li se i šta promjenilo sa izlaznim signalom? Snimiti izlazni signal.

Sada iterativnim postupkom mijenjati RC kombinaciju tražeći najveću i najmanju frekvenciju pri kojoj će sklop oscilovati.

Da li će smanjenje napona napajanja omogućiti oscilovanje pri većim frekvencijama?

#### 4.3.15. Sklop za punovalno ispravljanje

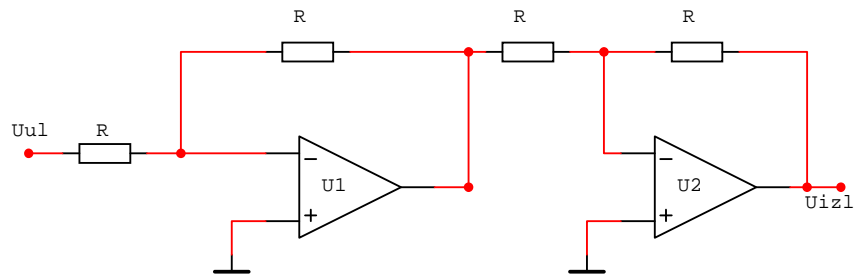
Sklop za punovalno ispravljanje se u principu realizira Gretzovim spojem i takav spoj je upotrebljiv kada je amplituda ulaznog napona velika. Međutim, u mjernoj tehnici kada su ulazni signali naponi ispod napona praga diode (0,7V za Si diodu) Gretzov spoj se nebi mogao koristiti. Tada se koristi poseban spoj na bazi OP pod nazivom 'idealna dioda'. Sklop je prikazan na slici 87.



Slika 87. Sklop za punovalno ispravljanje

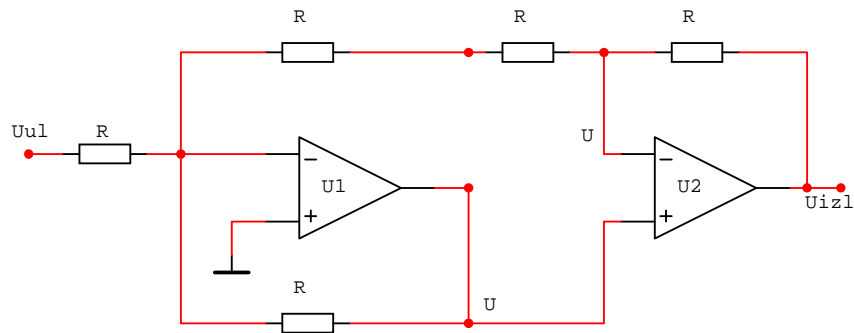
Kada je ulazni napon  $U_{ul} > 0$  dioda  $D_1$  vodi, a dioda  $D_2$  ne vodi. Minus ulaz u  $OP_1$  se nalazi na prividnoj masi jer je plus ulaz  $OP_1$  spojen na masu. Pošto  $D_2$  ne vodi onda je struja kroz  $R$  jednaka nuli, te je napon na katodi  $D_2$  jednak nuli. To znači da će oba pojačala raditi kao invertovana pojačala te je izlaz dat sa:

$$U_{izl} = U_{ul}, \quad \text{za } U_{ul} > 0.$$



Slika 88. Ekvivalentna šema idealne diode za  $U_{ul} > 0$

Kada je ulazni napon manji od nule onda dioda  $D_1$  ne vodi a dioda  $D_2$  vodi. Sada je ekvivalentno kolo predstavljeno slikom 88. Oba pojačala rade u linearnom režimu. Plus ulaz  $OP_2$  je isti kao izlaz  $OP_1$ , kao i napon na minus ulazu  $OP_2$ . Uznačimo ovaj napon sa  $U$ .



Slika 89. Ekvivalentna šema idealne diode za  $U_{ul} < 0$

Pošto je ulaz negativan onda je napon  $U$  pozitivan i strujna jednačina za čvor na minus ulazu  $OP_1$  ima izgled:

$$\frac{U}{2R} + \frac{U}{R} + \frac{U_{ul}}{R} = 0,$$



odakle slijedi da je napon U

$$U = -\frac{2}{3}U_{ul}.$$

Izlazni napon se dobije iz jednakosti struja na minus ulazu OP<sub>2</sub>, tj.

$$\frac{U_{izl} - U}{R} = \frac{U}{2R}.$$

Iz ove dvije jednačine slijedi:

$$U_{izl} = -U_{ul}, \text{ za } U_{ul} < 0.$$

Odnosno, prenosna funkcija sklopa je:

$$U_{izl} = |U_{ul}|. \quad (41)$$

### **Eksperiment 11**

Koristeći sliku 87 provjeriti funkcionalnost idealne diode. Na izlaz sklopa postaviti teret od 1k. Ulaznu frekvenciju postaviti na 1kHz. Snimiti izlaz za vrijednosti amplitude 100mV; 0,5V; 1V; 5V. Ponoviti snimanje ali koristiti Gretzov spoj.

## 5. REGULATORI NAPONA (Voltage Regulators)

Regulatori napona su elektronički sklopovi koji regulišu napon prema unaprijed zadatim uslovima. Regulisati napon na izlazu regulatora možemo prema zadatom konstantnom naponu  $U_z = \text{const}$  ili prema naponu koji se mijenja u vremenu po nekom zakonu tj.  $U_z = f(t)$ . U opštem slučaju na regulator se daje zahtjev da napon drži jednakim zadatoj vrijednosti i za slučaj da se mijenja opterećenje i za slučaj da se mijenja ulazni napon.

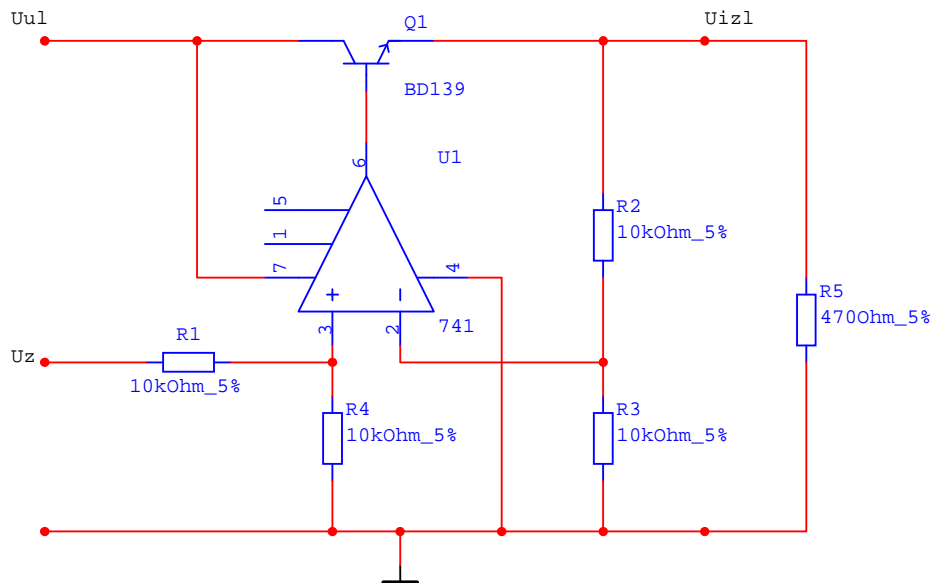
Dva su osnovna principa realiziranja regulatora: linearni i prekidački. Mi ćemo analizirati rad linearnih regulatora, dok će prekidački regulatori biti obrađeni u predmetu Energetska elektronika koji se sluša na trećoj godini.

Linearni regulatori mogu biti realizirani kao: serijski i paralelni (shunt).

Kod serijskih regulatora upravljački elemenat (tranzistor) je povezan u seriju sa opterećenjem, a kod paralelnih regulatora upravljački elemenat (tranzistor) je povezan paralelno sa opterećenjem.

### 5.1. Serijski linearni regulator napona

Slika 90 pokazuje principijelnu izvedbu linearnog serijskog regulatora.



Slika 90. Principijelna šema linearnog serijskog regulatora

Na slici 90  $U_{ul}$  predstavlja ulazni neregulirani napon koji može da varira u određenim granicama. Te granice su određene zahtjevom za postizanje odgovarajućeg maksimalnog napona na izlazu, te radom OP741 i  $Q_1$ . Napon na izlazu može dostići najviše vrijednost koja je za približno 1,7 V manja od ulaznog napona. Naime da bi  $Q_1$  vodio njegov napon u bazi mora biti za  $U_{be}$  veći od izlaznog napona ( $0,7V + U_{izl}$ ), s druge strane napon u bazi tranzistora prema masi može imati najveću vrijednost za slučaj da OP ode u zasićenje, a to je napon oko 1V manji od gornjeg napona napajanja OP. Prema tome, zbir ova dva napona daje navedenih 1,7V. Gornja granica ulaznog napona je određena maksimalnim naponom koji se smije

dovesti na OP (36V), te maksimalnim naponom na tranzistoru Q<sub>1</sub>. U<sub>izl</sub> predstavlja izlazni regulisani napon koji treba biti jednak zadatom naponu U<sub>z</sub> za promjene opterećenja R<sub>5</sub> u određenim granicama kao i za promjene ulaznog napona u određenim granicama. Opterećenje R<sub>5</sub> je ograničeno sa donje strane samo maksimalnom strujom koja smije da teče kroz Q<sub>1</sub>. Treba primijetiti da struja potrošača teče kroz Q<sub>1</sub> te se ovaj tranzistor bira prema tom uslovu.

Pojačalo OP741 radi kao neinvertirajući pojačavač jer je preko U<sub>be</sub>, R<sub>2</sub> i R<sub>3</sub> ostvorena negativna povratna sprega. Zato vrijedi da je napon na ulazima OP izjednačen, odnosno:

$$U_+ = U_- = \frac{U_z \cdot R_4}{R_1 + R_4}.$$

Struja koja teče kroz R<sub>2</sub> i R<sub>3</sub> je ista jer je struja u pojačalo jednaka nuli. Sada je izlazni napon dat sa:

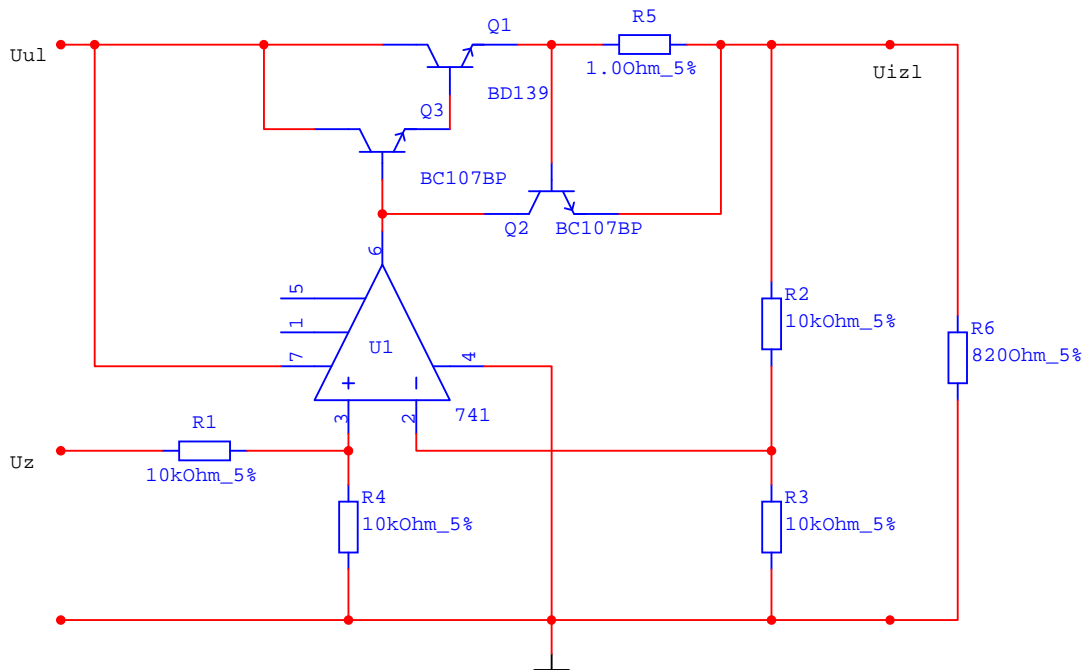
$$U_{izl} = \frac{U_z R_4}{R_1 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right),$$

tako da je prenosna funkcija regulatora data sa:

$$A = \frac{R_4}{R_1 + R_4} \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right). \quad (42)$$

Za R<sub>1</sub>=R<sub>4</sub> i R<sub>2</sub>=R<sub>3</sub> A=1, odnosno U<sub>izl</sub>=U<sub>z</sub>. Ova prenosna funkcija vrijedi osim u graničnim uslovima kada OP ide u zasićenje.

Zaštita od kratkog spoja i preopterećenja može se izvesti prema šemi sa slike 91.



Slika 91. Zaštita od kratkog spoja i preopterećenja

Otpornik  $R_5$  spojen u seriju sa izlaznim opterećenjem polariše  $U_{be}$  tranzistora  $Q_2$  i ukoliko je taj napon dostigao 0,7V  $Q_2$  će voditi. Vođenje tranzistora  $Q_2$  će smanjivati napon na izlazu OP odnosno u bazi upravljačkog tranzistora. Upravljački tranzistor je ovdje realiziran kao Darlingtonov spoj da se omogući veća struja na izlazu. Naime maksimalna struja iz pojačala je reda 10mA što za izlazne struje reda 1A traži pojačanje od najmanje 100. Ukoliko nemamo pojačanje korištenog tranzistora od 100 na izlazu nećemo imati dovoljno veliku struju. Maksimalna struja koju može da daje spoj na slici je:

$$I_{\max} = \frac{U_{be}}{R_5} = \frac{0.7}{1} = 0.7A \quad (43)$$

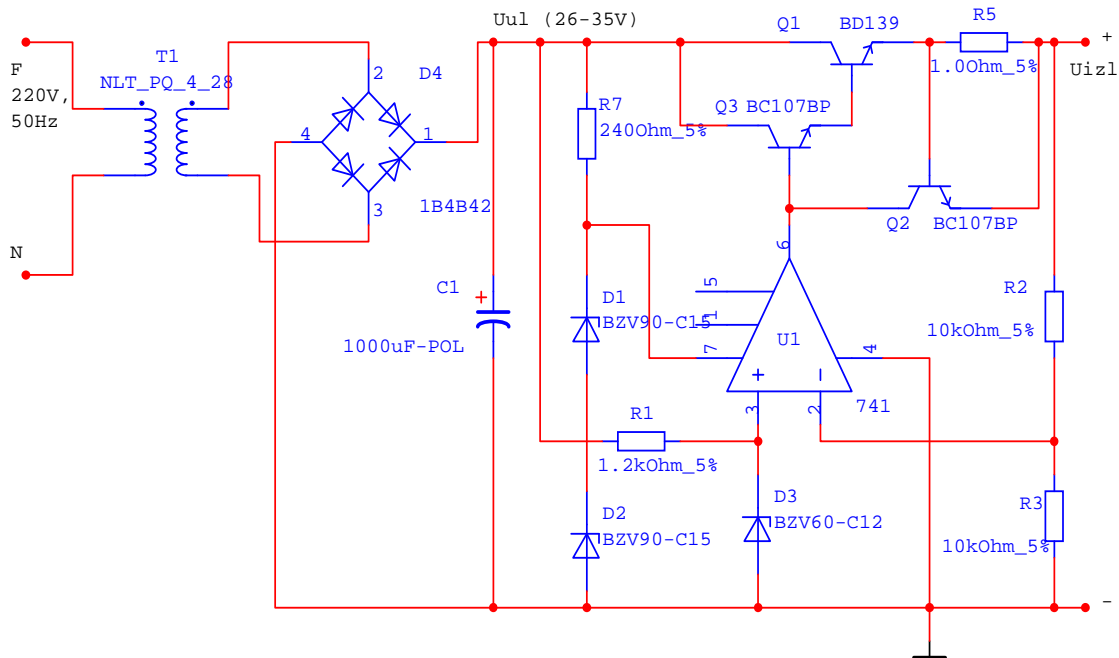
Ako želimo veće struje onda biramo tranzistor  $Q_1$  predviđen za takve struje i otpornik  $R_5$  biramo prema izrazu (43). I za otpornik i za tranzistor  $Q_1$  treba voditi računa o snazi.

Iako je navedena šema nešto izmjenjena u odnosu na polaznu sa slike 90 i dalje za prenosnu funkciju vrijedi relacija (42). Naime važno je da pojačalo ima i dalje negativnu povratnu spregu te da radi u linearnom režimu. Regulacija se izvodi u samom pojačalu koje nastoji svesti grešku na nulu. Kao što vidimo ta greška je data sa razlikom napona na ulazima u pojačalo odnosno:

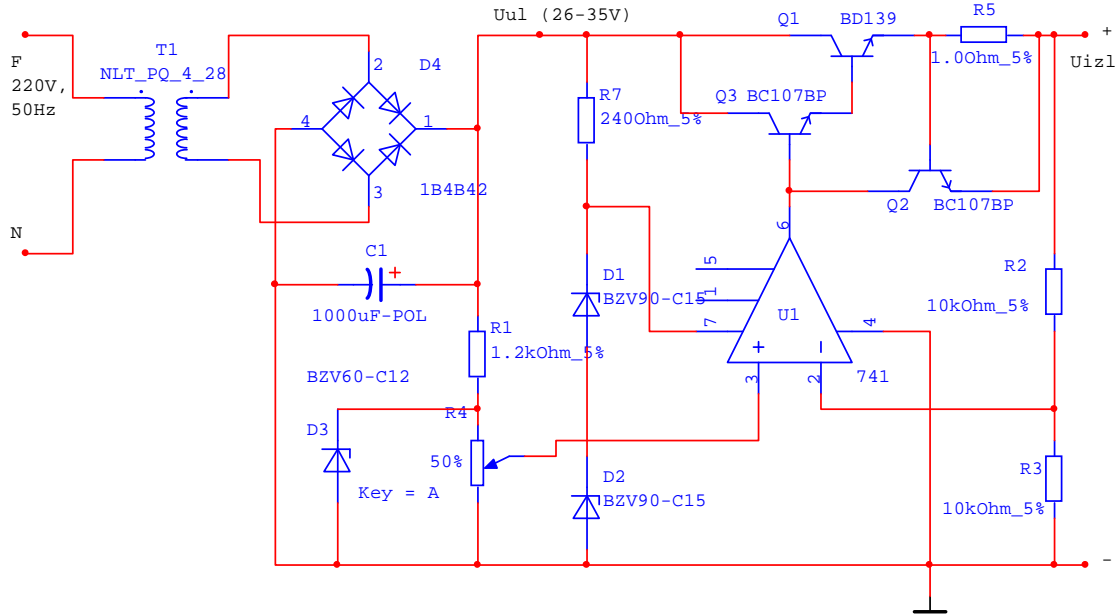
$$e = V_+ - V_- = \frac{U_z \cdot R_4}{R_1 + R_4} - \frac{U_{izl} \cdot R_3}{R_2 + R_3} \quad (44)$$

Ukoliko vrijedi  $R_4=R_1$  i  $R_3=R_2$ , onda je  $e=(U_z-U_{izl})/2$  i za  $e \rightarrow 0$ ,  $U_{izl} \rightarrow U_z$ .

Navedeni sklop se može iskoristiti za realizaciju konstantnih naponskih izvora (slika 92), promjenjivih regulisanih naponskih izvora (slika 93), pojačavača upravljačkih signala (slika 94).

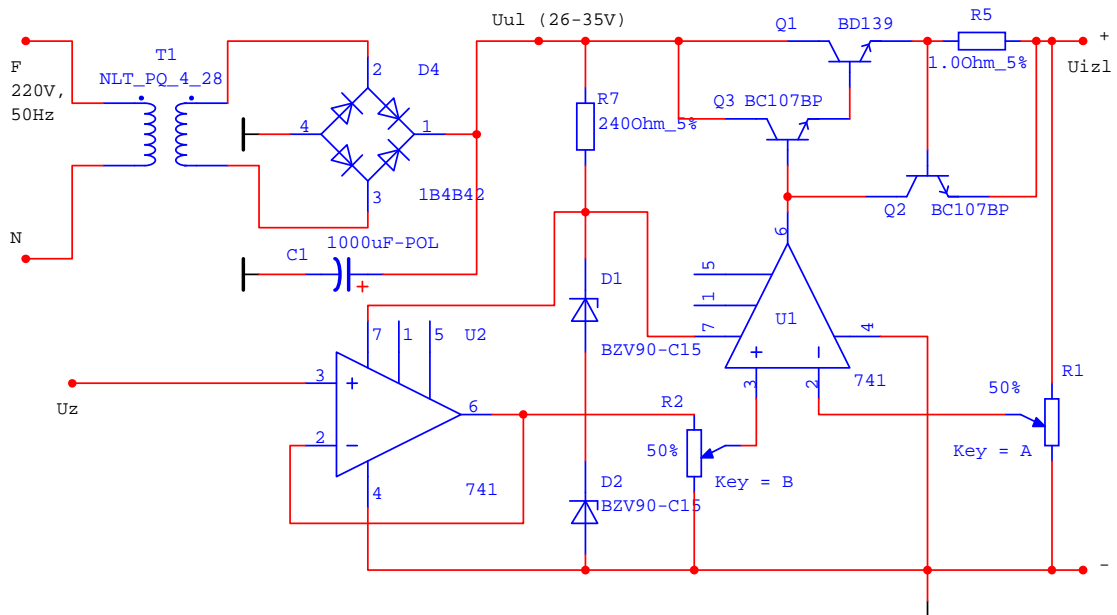


Slika 92. Potpuna šema regulisanog naponskog izvora 24V



Slika 93. Promjenjivi regulisani naponski izvor 2-24V, 0.7A

Promjena napona u regulatoru sa slike 93 se izvodi potencijetrom  $R_4$  (50k) u granicama 2V-24V. Ukoliko je broj okretaja korištenog potencijetra nedovoljan da se obezbijedi fina regulacija izlaznog napona može se u seriju sa potencijetrom  $R_4$  dodati još jedan potencijetar (50k) kome je paralelno vezan otpornik 4k7. Ovim potencijetrom se vrši fina regulacija.



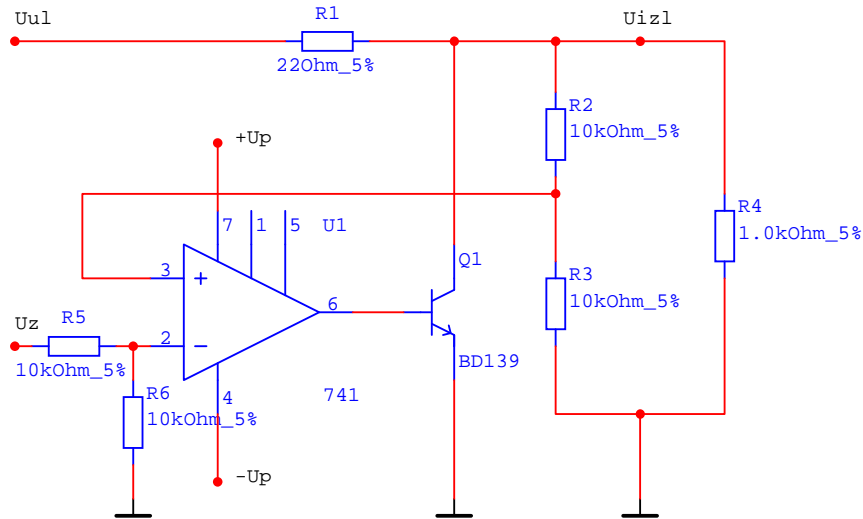
Slika 94. Pojačavač upravljačkog signala

Pojačanje sklopa sa slike 94 je određeno prenosnom funkcijom datom u izrazu 42. Otpore  $R_1$  i  $R_4$  te  $R_2$  i  $R_3$  iz navedenog izraza smo zamijenili potencijetrima  $R_1$  i  $R_2$  na ovoj šemi. Njihovom promjenom je moguće mijenjati pojačanje u dosta širokim granicama. Za pojačanja manja od 2 postavimo potencijetar  $R_1$  na sredinu, te promjenom  $R_2$  mijenjamo pojačanje od

0 do 2. Za pojačanja veća od 2 postavimo  $R_2$  na sredinu te promjenom  $R_1$  mijenjamo pojačanje od 1 do gornje granice koja može biti i 100. U ovisnosti za što koristimo navedeni sklop potencijometre je najbolje zamijeniti fiksnim otporima proračunatim za konstantno pojačanje. Pojačalo  $U_2$  koje se koristi kao naponsko sljedilo i ima funkciju impedantnog razdvajanja upravljačkog signala od ulaza u pojačalo se može i izbjeći, jer je ulazni otpor pojačala ukupan otpor potencijometra, a taj može biti reda 50k ili više.

## 5.2. Paralelni (shunt) linearni regulator napona

Principijelna šema paralelnih linearnih regulatora napona data je na slici 95.



Slika 95. Principijelna šema paralelnog regulatora

Razliku između ulaznog i izlaznog napona preuzima otpornik  $R_1$  preko struje koju vozi tranzistor  $Q_1$ . Tranzistor  $Q_1$  reguliše izlazni napon tako što u slučaju porasta napona na ulazu poraste njegova struja prema izrazu:

$$\Delta I_{Q1} = \frac{\Delta U_{ul}}{R_1}. \quad (45)$$

Ukoliko je ulazni napon konstantan, a mijenja se opterećenje onda se struja na tranzistoru mijenja prema relaciji:

$$\Delta I_{Q1} = -\Delta I_p. \quad (46)$$

Sa stanovišta izbora tranzistora i otpora  $R_1$  uzimamo dvije krajnje vrijednosti izlaznog napona:  $U_{izl} = U_{min}$  i  $U_{izl} = U_{max}$ . Recimo da je minimalni izlazni napon koji želimo postići 0V tada sva struja teče preko  $R_1$  i  $Q_1$  i to je maksimalna struja koja se može pojaviti u krugu. U tom slučaju ta struja iznosi:

$$I_{R1} = I_{Q1} = I_{max} = \frac{U_{ulmax}}{R_1}. \quad (47)$$

Kompletnu snagu na sebe preuzima otpornik i ona iznosi:

$$P_{R1} = \frac{U_{ul\max}^2}{R_1}. \quad (48)$$

Znači, otpornik biramo po snazi prema izrazu 48, a tranzistor po struji prema izrazu 47. Uočimo da će se ova struja na otporniku pojaviti u slučaju kratkog spoja na izlazu, tako da ovaj regulator ima ugrađenu prekostrujnu zaštitu.

Ukoliko je na izlazu maksimalan napon tada su struje u kolu manje od  $I_{\max}$ , ali se sada na tranzistoru  $Q_1$  može pojaviti napon jednak naponu na ulazu. Taj uslov treba imati na umu kada se bira tranzistor po naponu  $U_{cb}$ .

Za razliku od serijskog regulatora kada nemožemo postići na izlazu napone manje od 0,5V ovim regulatorom je moguće postići izlazne napone vrlo bliske nuli ( $U_{izl\min}=U_{cezas}$ ).

Operaciono pojačalo koje upravlja radom tranzistora ne radi u linearnom režimu kao što je to bio slučaj kod serijskog regulatora. Ovdje je ostvarena pozitivna povratna sprega te se izlaz pojačala kreće ka  $+U_p$  ako je napon na njegovom plus ulazu veći od napona na njegovom minus ulazu ( $\varepsilon > 0$ ), odnosno kreće se ka  $-U_p$  kada je napon na njegovom plus ulazu manji od napona na njegovom minus ulazu ( $\varepsilon < 0$ ), tj:

$$U_{izp} = \begin{cases} \uparrow +U_p, & \text{za } \varepsilon > 0, \\ \downarrow -U_p, & \text{za } \varepsilon < 0. \end{cases} \quad (49)$$

Prema šemi sa slike 95 razlika napona na ulazima OP je data sa:

$$\varepsilon = \frac{U_{izl}}{R_2 + R_3} \cdot R_2 - \frac{U_z}{R_5 + R_6} \cdot R_6. \quad (50)$$

Ako je  $R_2=R_3$  i  $R_5=R_6$  onda je  $\varepsilon > 0$  za  $U_{izl} > U_z$  i  $\varepsilon < 0$  za  $U_{izl} < U_z$ . Ako je izlazni napon veći od zadanog, tendencija da izlaz OP dostigne + napon napajanja znači povećavanje napona u bazi tranzistora odnosno povećanje njegove kolektorske struje koja će povećanjem pada napona na  $R_1$  smanjivati izlazni napon. U jednom trenutku izlazni napon će spasti ispod zadane vrijednosti,  $\varepsilon$  će promijeniti znak i izlaz OP mijenja tendenciju, tj. klizi ka  $-U_p$ . Ovakav proces će se neprekidno odvijati u okolini tačke napona  $U_{be}$  tranzistora  $Q_1$  pri kojoj teče struja  $I_{Q1}$  potrebna za uspostavljanje ravnoteže između izlaznog i zadanog napona. Iako OP ne radi u linearnom režimu (pozitivna povratna sprega) u stacionarnom stanju napon između + i - ulaza će biti približno jednak, te se izlaz može izračunati iz 50 uzimanjem da je  $\varepsilon = 0$ , tako da dobijemo:

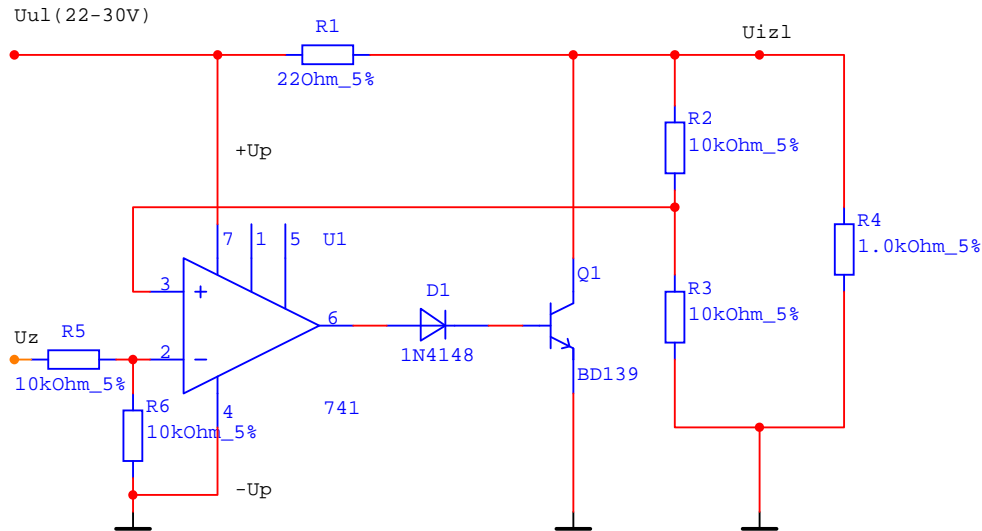
$$U_{izl} = \frac{U_z \cdot R_6}{R_5 + R_6} \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right). \quad (51)$$

Ovo je isti izraz koji smo dobili za serijski regulator (oznake otpora su drugačije). Prenosna funkcija je:

$$A = \frac{U_{izl}}{U_z} = \frac{R_6}{R_5 + R_6} \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right). \quad (52)$$

Ako je  $R_2=R_3$  i  $R_5=R_6$  onda je  $A=1$ .

Za potpunu šemu treba samo efikasno obezbijediti napajanje OP, a da se ne koriste posebni izvori tako da će izvedbena šema paralelnog regulatora za promjenu napona od 0 do 20 V izgledati kao na slici 96.



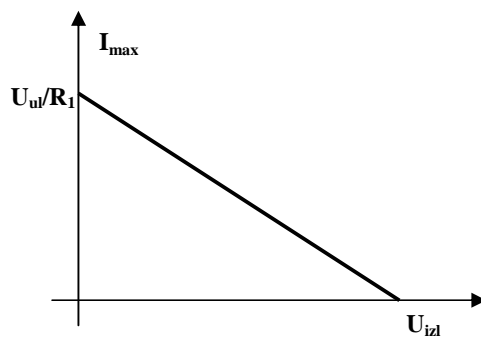
Slika 96. Izvedbena šema paralelnog regulatora za promjene napona od 0V do 20V

Na slici se vidi da smo problem jednostavno riješili vezivanjem OP na ulazni napon. To je uredi ukoliko je ulazni napon dosta konstantan, ako to nije slučaj možemo iskoristiti stabilizaciju tog napona zener diodama. Na šemi ima nešto drugo interesantno, dioda  $D_1$ . Njena funkcija je slijedeća: pri zahtjevu za većim naponima na izlazu, OP ima tendenciju da smanji napon  $U_{be}$  odnosno da smanji struju kroz tranzistor, kada je taj napon nizak on pada oспod napona donjeg zasićenja OP koje iznosi oko 1V te nemožemo postići velike vrijednosti izlaza. Ubacivanjem diode podižemo prag vođenja na 1,4V (dva pn prelaza) te ovaj problem nestaje.

Ovi regulatori se koriste za manje struje jer radna struja teče kroz otpor  $R_1$  koji bi se za velike struje grijao.

Iako smo rekli da regulator kompenzira i promjenu ulaznog napona i promjenu opterećenja, treba uočiti da postojanje otpora  $R_1$  u seriji sa potrošačem limitira gornju struju koju je moguće postići pri zadanom naponu. Pretpostavimo da je ulazni napon konstantan i da iznosi  $U_{ul}$ , najveća struja na teretu pri datom naponu se dobije kada je struja kroz tranzistor jednaka nuli odnosno vrijedi:

$$I_{\max}(U_{izl}) = \frac{U_{ul} - U_{izl}}{R_1}. \quad (53)$$



Slika 97. Dijagram maksimalne struje u funkciji napona na izlazu

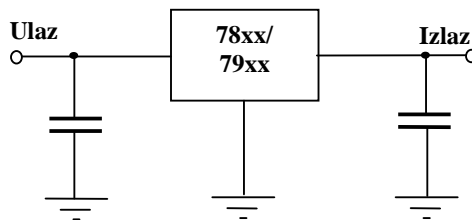


### 5.3. Integrirani linearni naponski regulatori

Zbog velike primjene regulatori napona se proizvode kao integrirane komponente vrlo pristupačne cijene i za različite primjene. Daćemo pregled najviše korištenih integriranih regulatora napona.

#### 5.3.1. Linearni regulatori napona sa fiksnim izlaznim naponom

Serije 78xx i 79xx naponskih regulatora predstavljaju naponske regulatore u tri tačke sa načinom povezivanja kao na slici 98. 78xx su regulatori sa pozitivnim naponskim izlazom, a 79xx sa negativnim naponskim izlazom. I jedan i drugi tip regulatora imaju na ulazu plus napon u odnosu na srednju tačku (masu). Rade se za različite struje od 100mA do nekoliko A. Ulazni napon treba biti veći bar za 2V od izlaznog napona. Regulatori imaju ugrađenu internu zaštitu od kratkog spoja i od pregrijavanja. Kondenzatori se koriste da smanje VF smetnje i obično iznose 100nF. Tabela 6 pokazuje sve tipove ovih regulatora koji se proizvode.



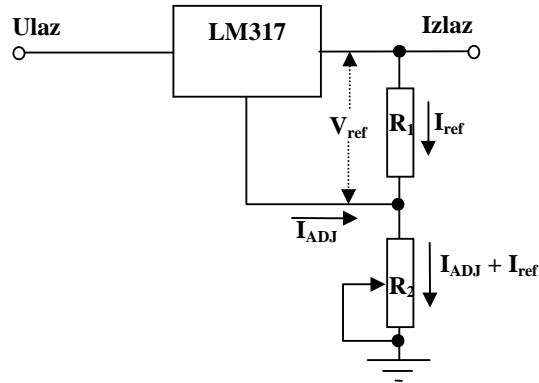
Slika 98. Spajanje linearnih integriranih regulatora

Tabela 6. Tipovi 78xx i 79xx regulatora

Pozitivni izlaz		Negativni izlaz	
Tip	Izlazni napon	Tip	Izlazni napon
7805	+5V	7905	-5V
7806	+6V	7905.2	-5.2V
7808	+8V	7906	-6V
7809	+9V	7908	-8V
7812	+12V	7912	-12V
7815	+15V	7915	-15V
7818	+18V	7918	-18V
7824	+24V	7924	-24V

#### 5.3.2. Linearni regulatori sa promjenjivim izlazom

Integrirani krug LM317 je linearni regulator sa mogućnošću promjene izlaznog napona u opsegu 1.25V do 37V i strujom do 1.5A. Izlazni napon se reguliše potenciometrom  $R_2$  prema slici 99. Radi se o plivajućem regulatoru kod koga srednja tačka nije spojena na masu nego se između te tačke i izlaza te prema masi dodaju otpori  $R_1$  i  $R_2$  pomoću kojih se namješta izlazni napon. Interni referentni napon  $V_{ref}$  koji se formira između izlaza i srednje tačke definiše struju  $I_{ref}$  koja na  $R_2$  pravi odgovarajući pad napona. Struja namještanja  $I_{ADJ}$  je vrlo mala nekoliko desetina  $\mu A$  te se u proračunu može zanemariti.  $V_{ref}$  iznosi 1.25V.



Slika 99. Linearni integrirani regulator LM317

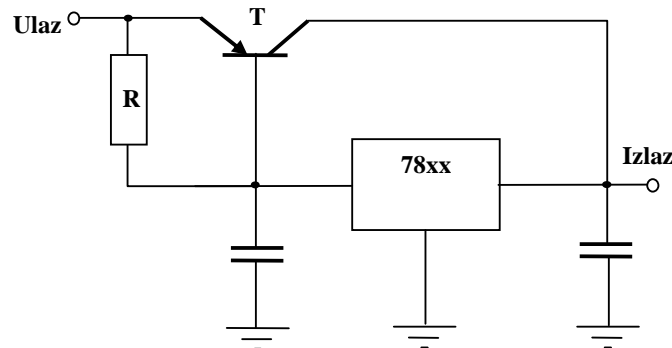
Izlazni napon se dobije prema slijedećem izrazu:

$$\begin{aligned}
 U_{izl} &= V_{ref} + V_{R2} = I_{ref} \cdot R_1 + I_{ADJ} \cdot R_2 + I_{ref} \cdot R_2 = \frac{V_{ref}}{R_1} (R_1 + R_2) + I_{ADJ} \cdot R_2 = \\
 &= V_{ref} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + I_{ADJ} \cdot R_2
 \end{aligned}
 \tag{54}$$

Analogno prethodno opisanom kolu, kolo LM337 se koristi za regulisane napone od -1.25V do -37V. Potpuno se isto koristi kao LM317, s time što treba znati da se ulazni napon dovodi kao negativan, a ne kao kod 79xx regulatora gdje je ulazni napon pozitivan.

### 5.3.3. Proširenje strujnog opsega linearnih regulatora

Ako nam trebaju naponski izvori sa većom izlaznom strujom od one koju korišteni integrirani naponski regulator može dati onda problem možemo jednostavno riješiti dodajući paralelno regulatoru tranzistor prema slici 100.



Slika 100. Proširenje strujnog opsega integriranih regulatora

Ako potrošač vuče struju koja pravi pad napona na R manji od 0,7V tranzistor T ne vodi i izlaznu struju daje regulator. Kada potrošač zahtjeva veću struju napon  $U_{be}$  na tranzistoru postane veći od 0.7 V (po apsolutnom iznosu, PNP je tranzistor) te on počinje voditi, na ovaj način višak struje preuzima tranzistor T. Izborom otpornika R ograničavamo struju koju daje regulator na njegovu dozvoljenu.

### **Eksperiment 12.1**

Realizirati naponski izvor  $\pm 12\text{V}$ , 0.5A.

### **Eksperiment 12.2**

Realizirati naponski izvor 0-20V, 2A.

### **Eksperiment 12.3**

Realizirati linearni pojačavač upravljačkog signala za promjenu napona od 2V do 20V i maksimalnom strujom od 2A.

### **Eksperiment 12.4**

Koristeći LM317 realizirati naponski izvor sa mogućnosti promjene napona od 1.25V do 30V i maksimalnom strujom 5A.

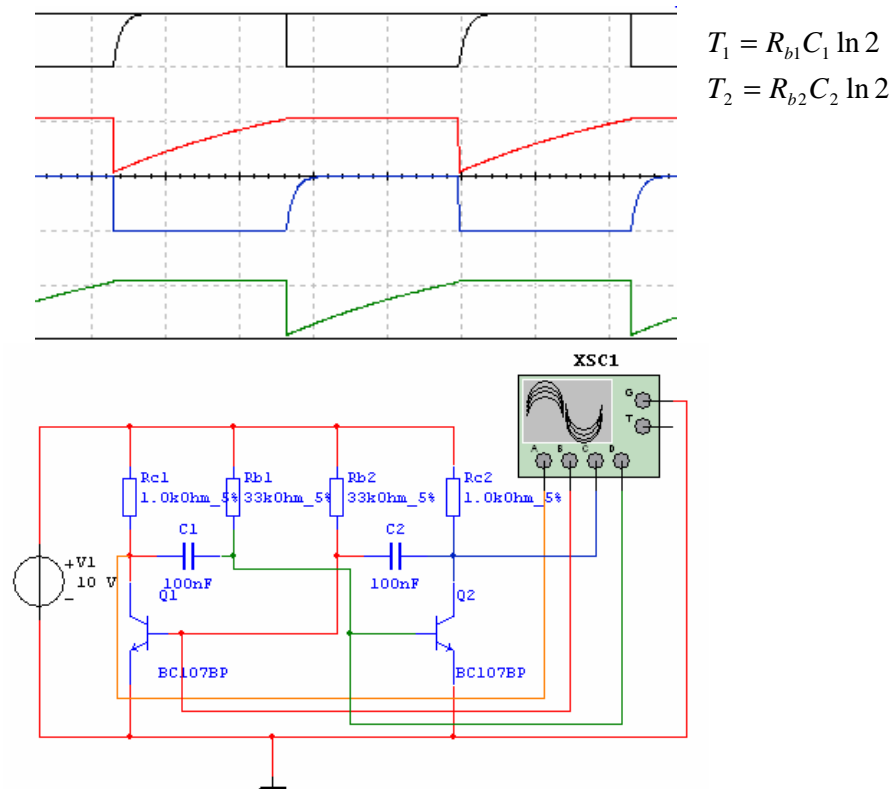
Za sve navedene eksperimente odabrati odgovarajući transformator, grec, elektrolit na ulazu, proračunati potrebne elemente, napraviti štampanu ploču, napraviti kutiju, izvesti ulaze i izlaze, spojiti odgovarajuće instrumente.

## 6. REALIZACIJA MULTIVIBRATORA NA BAZI DISKRETNIH KOMPONENTI

Multivibratori kao osnovni sklopovi sa tranzistorima koje karakterizira nelinearni rad obrađuju se u predmetu Digitalna elektronika i ovdje neće biti detaljno obrađeni. Daćemo samo šeme sa krajnjim izrazima koji definiraju vezu između pojedinih veličina po osnovu kojih je moguće realizirati predviđene zadatke. Ono što je nama zanimljivo jeste poređenje rezultata dobivenih eksperimentalno i u MULTISIMU, te će eksperimenti na bazi multivibratora biti tako osmišljeni. Posebnu pažnju ćemo posvetiti realiziranju multivibratora na bazi MOSFET tranzistora, te obraditi integrirani tajmer NE555, koji je za praktične realizacije ovakvih sklopova najbolja i najjeftinija varijanta.

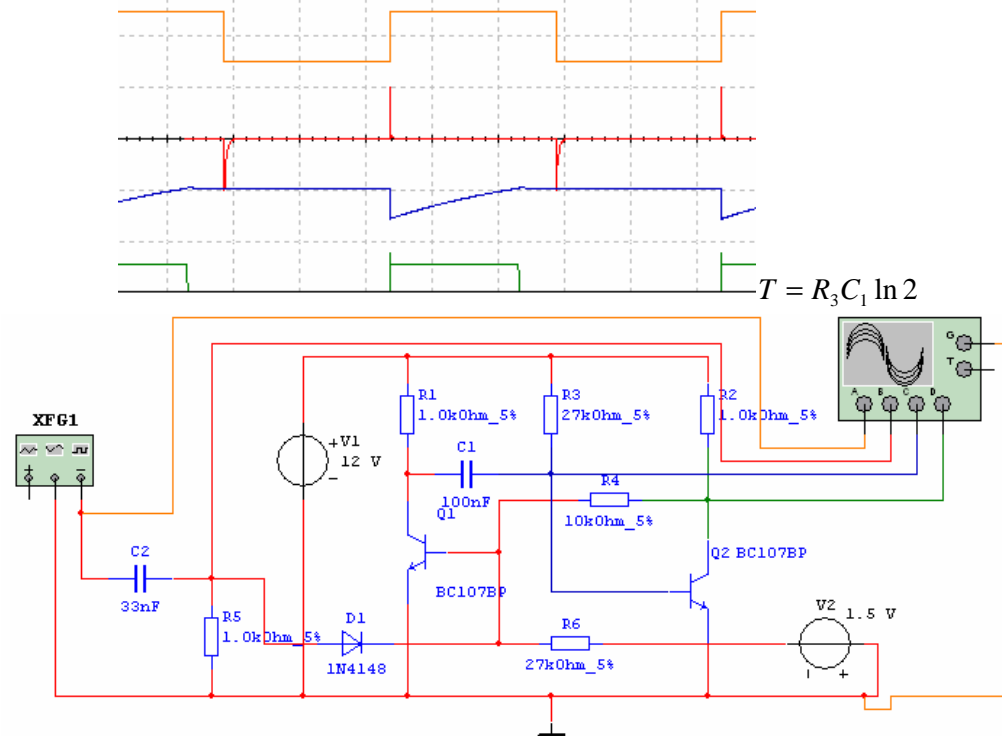
### 6.1. Astabil, monostabil i bistabil sa bipolarnim tranzistorima

Električna šema astabilnog multivibratora i signali u karakterističnim tačkama su dati na slici 101. Ono što je ovdje zanimljivo jeste korištenje 4-kanalnog osciloskopa u okviru MULTISIMA tako da na jednom dijagramu imamo sva 4 karakteristična signala. Signali su poredani slijedećim redom:  $U_{c1}$ ,  $U_{b1}$ ,  $U_{c2}$ ,  $U_{b2}$ .



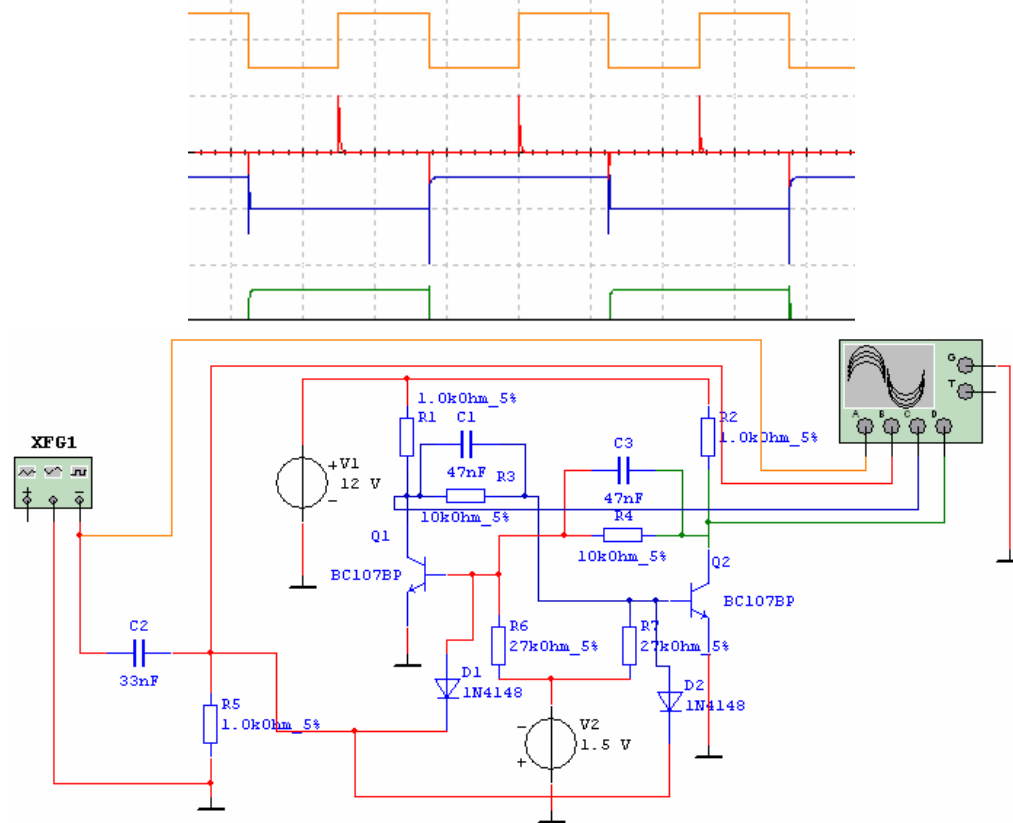
Slika 101. Simulacija rada astabilnog multivibratora u MULTISIMU

Električna šema monostabilnog multivibratora i signali u karakterističnim tačkama su dati na slici 102. Takođe smo iskoristili 4-kanalni osciloskop u okviru MULTISIMA tako da na jednom dijagramu imamo sva 4 karakteristična signala. Signali su poredani slijedećim redom:  $U_{ul}$ ,  $U_d$ ,  $U_{b2}$ ,  $U_{izl}$ .



Slika 102. Simulacija rada monostabilnog multivibratora u MULTISIMU

Simulacija bistabila i odgovarajući dijagrami su dati na slici 103.



Slika 103. Simulacija rada bistabilnog multivibratu u MULTISIMu

## Eksperiment 13

Provjeriti mogućnosti MULTISIMA na primjeru multivibratora. Realizirati sve multivibratore sa vrijednostima parametara datih u tabelama u MULTISIMu i eksperimentalno. Dati poređenje rezultata dobivenih računski, simulacijom i eksperimentom. Za bistabilni multivibrator na nivou simulacije i eksperimentalno odrediti gornju frekvenciju pri kojoj će sklop korektno raditi.

Tabela 7. Rezultati astabilnog multivibratora

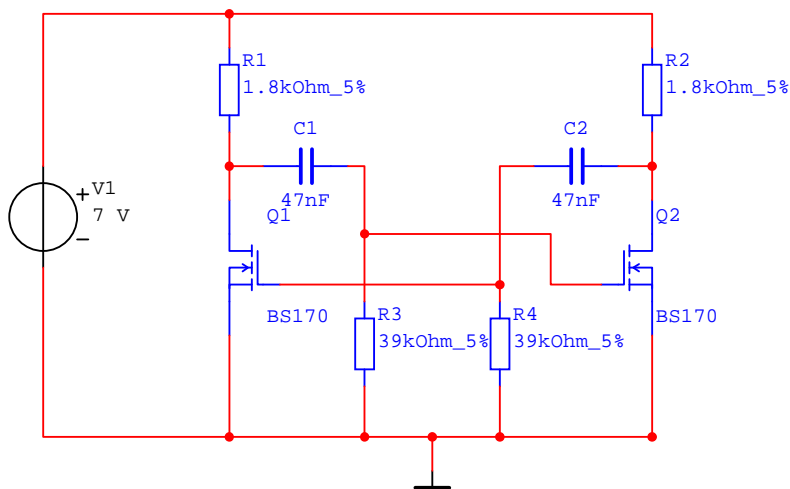
Astabilni multivibrator					Računski		Simulacijom		Eksperimentom	
	R <sub>3</sub>	C <sub>1</sub>	R <sub>4</sub>	C <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>
1	33k	100nF	33k	100nF						
2	33k	1μF	33k	1μF						
3	33k	100nF	33k	1μF						
4	10k	33nF	10k	33nF						
5	10k	10nF	10k	10nF						

Tabela 8. Rezultati monostabilnog multivibratora

Monostabilni multivibrator			Računski	Simulacijom	Eksperimentom
	R <sub>3</sub>	C <sub>1</sub>	T	T	T
1	27k	100nF			
2	27k	1μF			
3	100k	100nF			
4	10k	33nF			
5	10k	10nF			

### 6.2. Astabil, monostabil i bistabil sa MOSFET-ovima

Astabil na bazi MOSFET tranzistora ćemo realizirati prema šemi sa slike 104.



Slika 104. Astabil sa MOSFET tranzistorima

Astabil sa gornje slike neće raditi za napone manje od 5.5V ? Isti sklop neće prooscilirati u MULTISIM-u, ali će raditi na matadoru za napone od 6V do 10V.

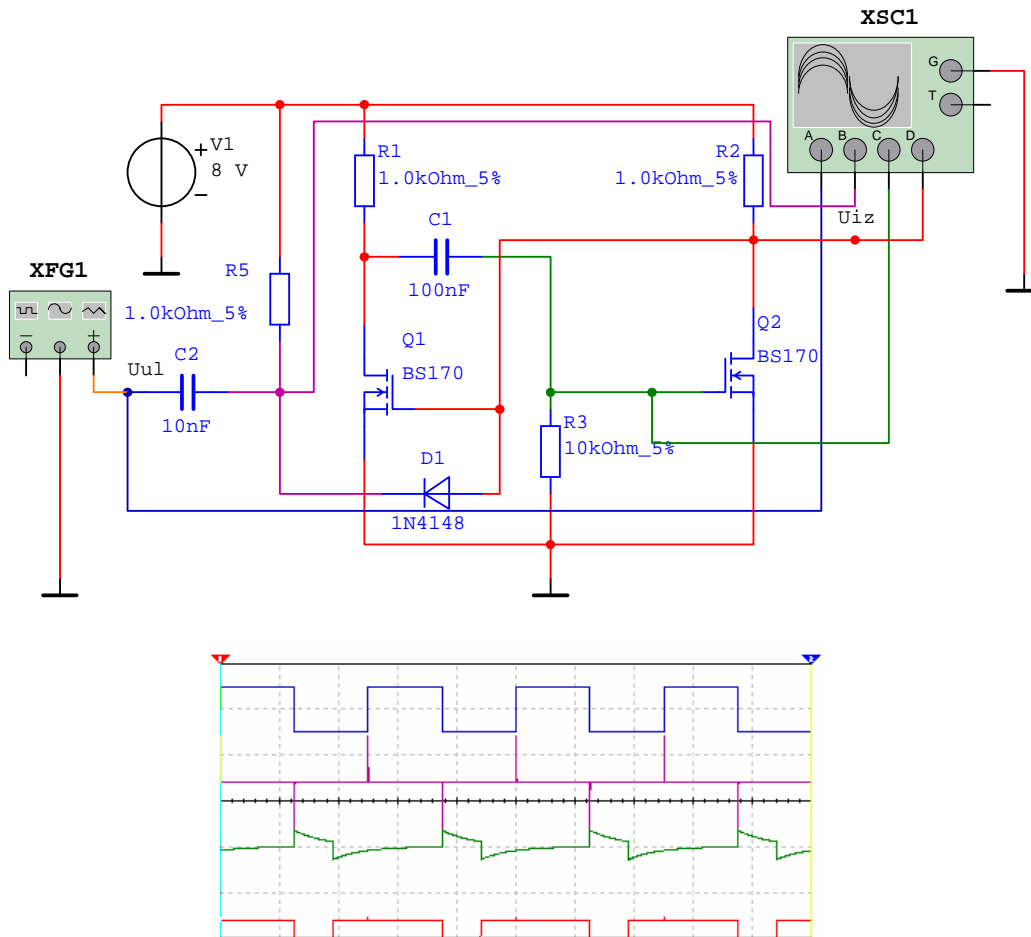
### Eksperiment 14.1

Realizirati astabil prema slici 104. Snimiti valne oblike signala u svim tačkama. Opisati način rada. Izvesti izraz za trajanje vremena  $T_1$  i  $T_2$ . Mijenjati napon napajanja od 6V do 12V sa korakom 1V i provjeriti vrijednost dobijenog izraza za vrijednosti date u tabeli 9.

Tabela 9. Rezultati astabilnog multivibratora sa MOSFET-om

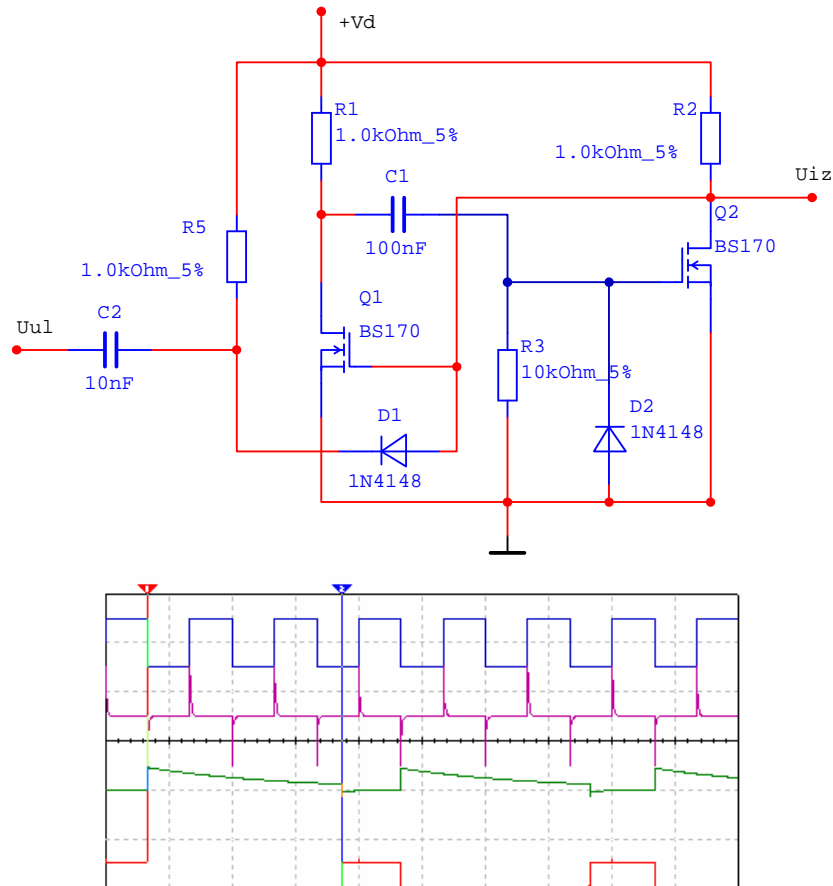
$R_{1/2}=33k$ $C_{1/2}=100nF$	Prema izrazu		Mjerenjem		
	$V_{DD}$	$T_1$	$T_2$	$T_1$	$T_2$
	6				
	7				
	8				
	9				
	10				
	11				
	12				

MOSFET tranzistori su naponski upravljivi elementi tako da je realiziranje pozitivne povratne sprege karakteristične za multivibratore na bazi bipolarnih tranzistora sada drugačije.



Slika 105. Monostabil na bazi MOSFETa

Sklop sa slike 105 radi tako da trajanje nestabilnog stanja treba biti kraće od pola perioda ulaznih impulsa. Sklop dobro radi ako se starta pojedinačnim impulsima. Ako želimo napraviti monostabil koji je imun na nailazak slijedećeg impulsa prije nego završi trajanje njegovog nestabilnog stanja, onda ćemo se poslužiti šemom sa slike 106. Dioda  $D_2$  ima ulogu da skрати punjenje desne obloge kondenzatora  $C_1$  tako da  $Q_2$  bude spreman za nailazak slijedećeg impulsa.



Slika 106. Monostabil sa MOSFET-tranzistorima

### **Ekspiriment 14.2**

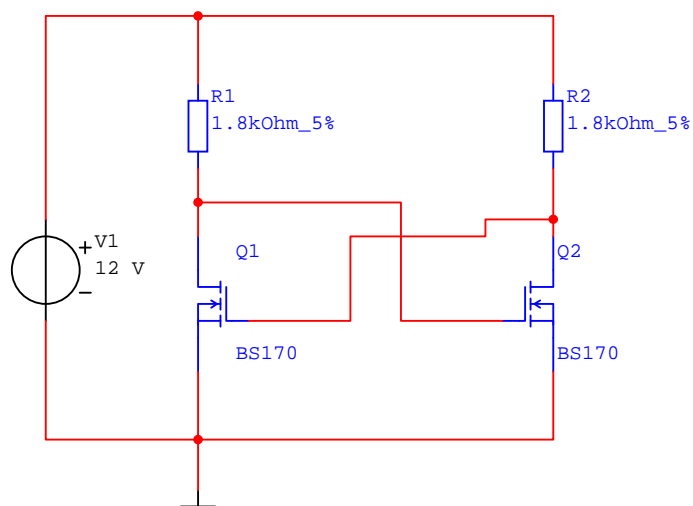
Realizirati monostabil sa šeme na slici 106. Snimiti valne oblike u svim karakterističnim tačkama. Varirati napon napajanja od 1V do 10 V sa korakom 1V. Ustanoviti ovisnost trajanja nestabilnog stanja od napona napajanja. Odrediti minimalni napon napajanja pri kome će sklop raditi korektno. Kod promjene napona napajanja usklađivati amplitudu ulaznih okidnih impulsa tako da sklop radi (otprilike za 1 V veća od napona napajanja). Izvesti analitički izraz za trajanje nestabilnog stanja.

### **Ekspiriment 14.3**

Za demonstraciju rada bistabila u šemu sa slike 107 postavite dvije LED u grane sa otporima  $R_1$  i  $R_2$  te naizmjeničnim dovodenjem kratkotrajnih impulsa u vrata MOSFET-ova vršite prebacivanje.

Razmisliti o načinu okidanja impulsima sa generatora funkcija.





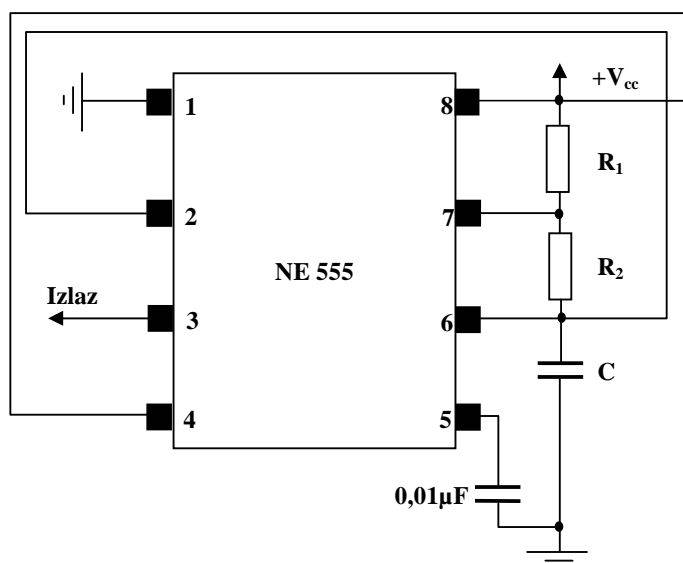
Slika 107. Bistabilni multivibrator na bazi MOSFETa

### 6.3. Spojevi na bazi NE555

Integrirano kolo NE555 predstavlja univerzalni tajmer pomoću kog je moguće realizirati sklopove kao što su: astabilni multivibrator i monostabilni multivibrator. Kolo ima 8 nožica i koristi jednostrano napajanje koje se može mijenjati od 5 do 15V. Dodavanjem vanjskih elemenata otpora i kondenzatora, postiže se odgovarajuća funkcija kao i potrebna vremena.

#### 6.3.1. Astabilni multivibrator na bazi NE555

Astabilni multivibrator sa kolom NE555 se realizira prema šemi sa slike 108.



Slika 108. Astabilni multivibrator na bazi NE555

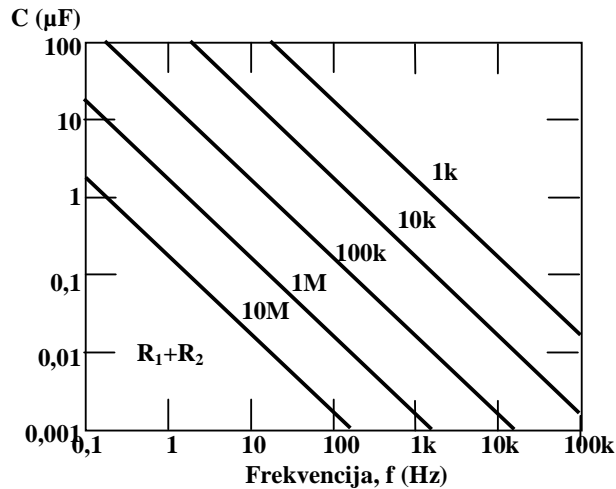
Vremena astabilnog multivibratora su određena sa:

$$\begin{aligned} T_1 &= 0,693(R_1 + R_2) \cdot C \\ T_2 &= 0,693 \cdot R_2 \cdot C \end{aligned} \quad (55)$$

Frekvencija oscilovanja je određena sa:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{T_1 + T_2} = \frac{1}{0,693(R_1 + 2R_2)C} \quad (56)$$

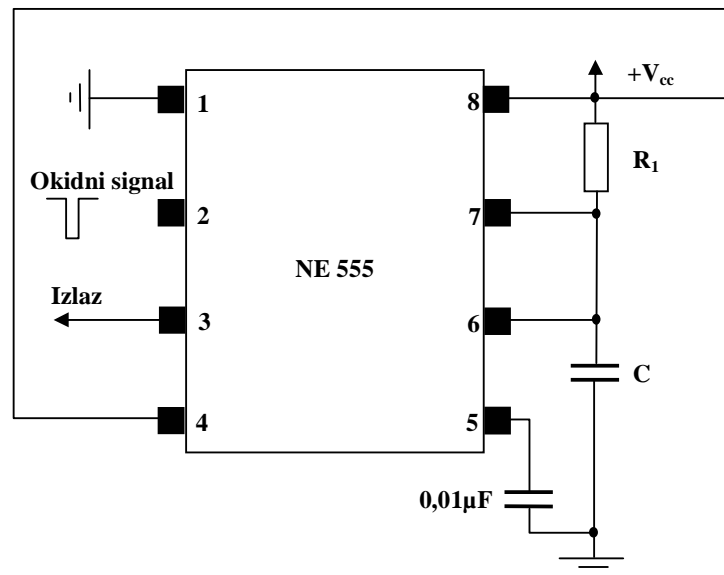
Kao što se iz izraza 55 vidi vremena ne zavise od napona napajanja, a pošto isti može da varira od 5 do 15 V astabil je imun na varijacije napajanja. Izlazni napon ima vrijednost napona napajanja. Astabil dozvoljava generisanje signala sa frekvencijama od 0,1Hz do 100kHz. Vrijednosti  $R_1, R_2$  i  $C$  se biraju prema dijagramu sa slike 109. Za razliku od astabilnih multivibratora realiziranih sa tranzistorima ili OP izlazni signal generisan sa NE555 kolom je puno pravilnijeg oblika (bez RC prelaznog procesa) i sa širim dijapazonom radnih frekvencija. S te strane ovakav astabil se mnogo više koristi nego onaj na bazi tranzistora.



Slika 109. Izbor  $R_1, R_2$  i  $C$  prema opsegu frekvencija

### 6.3.2. Monostabilni multivibrator na bazi NE555

Monostabilni multivibrator na bazi NE555 se realizira prema šemi sa slike 110.

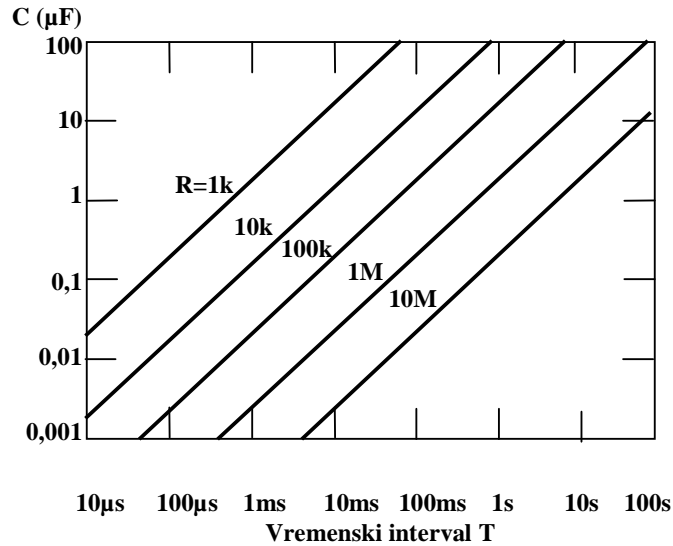


Slika 110. Monostabilni multivibrator na bazi NE555

Kolo se okida silaznom ivicom ulaznog signala na ulazu 2. Izlazni signal za vrijeme trajanja nestabilnog stanja je jednak naponu napajanja, dok je u stabilnom stanju na nivou nule. Trajanje nestabilnog stanja je odeđeno izrazom:

$$T = R_1 C \ln 3. \quad (57)$$

Područje rada je od  $10\mu\text{s}$  do  $100\text{s}$ . Izbor RC para se bira prema dijagramu sa slike 111.



Slika 111. R<sub>1</sub>C par u funkciji potrebnog vremena za monostabil

### **Eksperiment 15.1**

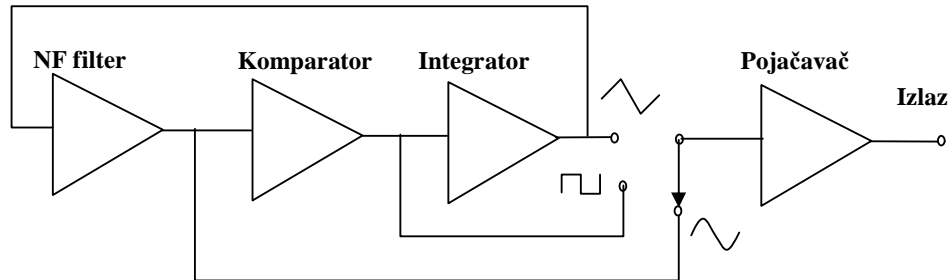
Realizirati astabilni multivibrator frekvencije  $f=1\text{kHz}$ ,  $T_1=T_2$  i  $f=50\text{kHz}$  i  $T_2=2T_1$ . Snimiti valne oblike u karakterističnim tačkama. Za napon napajanja koristiti  $9\text{V}$ .

### **Eksperiment 15.2**

Ralizirati monostabilni multivibrator sa  $T=10\mu\text{s}$ ,  $T=1\text{ms}$  i  $T=100\text{s}$ . Snimiti valne oblike u karakterističnim tačkama. Za napon napajanja koristiti  $9\text{V}$ .

## 7. GENERATORI FUNKCIJA

Generator funkcija za područje niskih frekvencija (do 10 kHz) može se realizirati na bazi OP741. Blok šema takvog generatora data je na slici 112.



Slika 112. Blok šema generatora funkcija

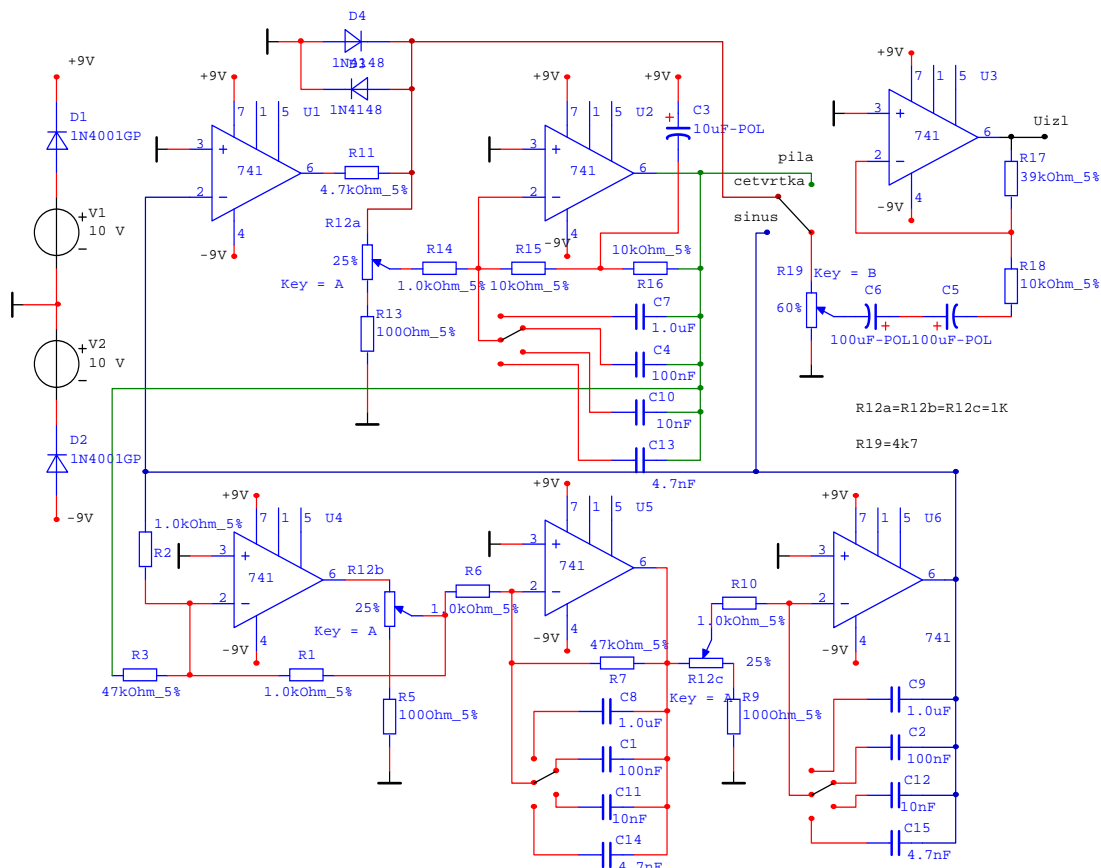
Slika 112 se sastoji iz tri stepena na bazi OP741 povezana u prsten. Pošto svaki stepen radi kao invertor sistem nema stabilno stanje te će oscilirati. Frekvencija oscilovanja će ovisiti od RC konfiguracija pojedinih stepeni. Ova tri stepena se sastoje iz NF filtera, komparatora i integratora. Izlaz iz NF filtera je sinusni signal koji na sklopu komparatora pravi signal četvrtke, a ovaj se opet uvodi u integrator koji pravi signal pile. Pošto se signal pile vraća nazad u NF filter on će eliminisati više harmonijske komponente te će izlaz iz NF filtra biti sinusni. Pojačalom na izlazu razdvajamo potrošač od izvora signala i omogućujemo promjenu amplitude. Izbor odgovarajućeg frekventnog područja vrši se istovremenim izborom kapaciteta na integratoru i NF filtru.

### Eksperiment 16

Realizirati generator funkcija 10Hz do 10kHz sa mogućnošću promjene amplitude od 0V do 5V i kontinualnom promjenom frekvencije u navedenom opsegu. Generator treba da ima mogućnost izbora jednog od tri signala. Realizirati štampanu ploču te generator upakovati u kućište. Koristiti šemu data na slici 113.

Na šemi su data 4 potencijometra od kojih se tri koriste za kontinualno namještanje frekvencije, a jedan za namještanje amplitude. Kod ova tri potencijometra za frekvenciju klizač je smješten na istu osovinu tako da se oni istovremeno mijenjaju, tako da korisnik sa samo jednim potencijetrom mijenja frekvenciju. To dalje znači da kod realizacije treba predvidjeti korištenje takvog potencijometra.

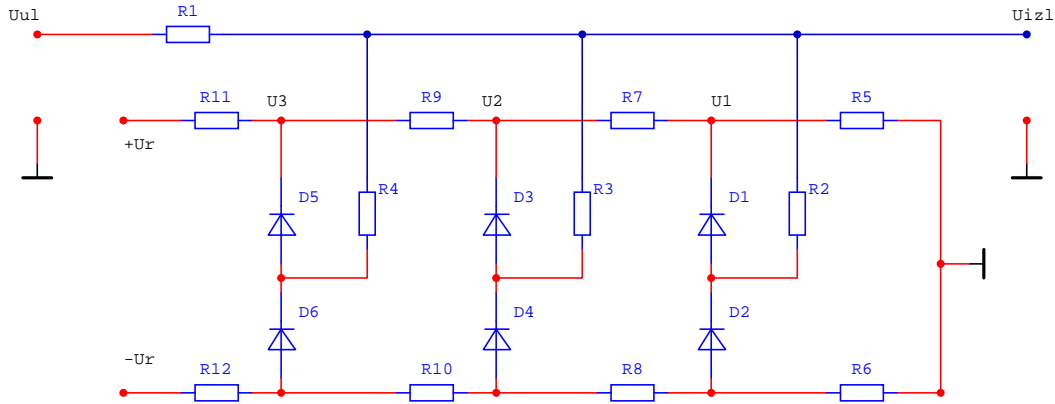
Na integratoru i na dva pojačala filtra nalaze se po 4 ista kondenzatora. Njima se bira neko od frekventnih područja: 10Hz-200Hz, 100Hz-800Hz, 500Hz-5kHz i 4kHz-10kHz. Za izbor nekog od navedenih područja istovremeno se postavljaju na sva tri pojačala isti kondenzatori. Zato se koristi 4x3-položajni preklopnik, ali takav da je u nekom trenutku samo jedan aktivan.



Slika 113. Generator funkcija

### 7.1. Diodni sintetizator sinusnog napona

Vrlo interesantan generator sinusnog valnog oblika može se dobiti diodnim uobličavanjem sinusoide iz pilastog ulaznog napona. Generisanje signala oblika četvrtke je dosta jednostavan postupak. To je običan astabil za čije realiziranje imamo dosta jednostavnih sklopova. Karakteristika svih tih sklopova je da možemo dobiti stabilnu četvrtku, te da frekvenciju i amplitudu možemo podešavati u dosta širokim granicama. Integratorom iz ovako dobijene četvrtke je moguće generisati pilasti napon. Integriranje pilastog napona sa ciljem dobivanja sinusnog napona nije preporučljivo zbog najmanje dva problema: prvi - ovako dobiven napon nije sinus nego su to elementi kvadratnih funkcija te je faktor izobličenja veliki i drugi - amplituda ovako dobivenog signala je vrlo mala. Zato je diodno uobličavanje jedna dosta jednostavna i uspješna varijanta. Sa samo 6 dioda moguće je postići kvalitetnu sinusoidu sa faktorom izobličenja manjim od 0,2%. Frekventni opseg u kome se mogu koristiti diodni uobličavači iznosi i do 10MHz. Potrebno je samo da ulazni napon bude kvalitetna pila sa konstantnom amplitudom. Ovakvi uobličavači se danas mnogo koriste za generisanje sinusnih valnih oblika, kompletna struktura se realizira u monolitnoj tehnici, vrlo malih dimenzija i jednostavna je za upotrebu. Šema diodnog uobličavača sa 6 dioda je data na slici 114.



Slika 114. Diodni uobličavač sinusoide

Sklop radi na slijedeći način. Kada je napon na ulazu  $U_{ul}$  manji od napona  $U_1$  nijedna dioda ne vodi i izlazni napon je jednak ulaznom naponu tj:

$$U_{iz} = U_{ul} = k_0 U_{ul}, \text{ za } 0 \leq U_{ul} \leq U_1.$$

Kada napon na ulazu postane veći od napona  $U_1$  provede dioda  $D_1$  i na izlazu se pojavi napon nastao na djelitelju:  $(R_1; (R_2+R_5))$ . Ako uzmemo da je  $R_2 \gg R_5$  onda je izlazni napon dat sa:

$$U_{iz} = U_1 + \frac{R_2}{R_1 + R_2} (U_{ul} - U_1) = U_1 + k_1 (U_{ul} - U_1), \text{ za } U_1 \leq U_{ul} \leq U_2'.$$

Kada napon na ulazu dostigne napon  $U_2$  provede dioda  $D_3$  te se uz pretpostavku da je  $R_3 \gg (R_7+R_5)$  na izlazu pojavi napon:

$$U_{iz} = U_2 + \frac{R_3'}{R_1 + R_3'} (U_{ul} - U_2) = U_2 + k_2 (U_{ul} - U_2), \text{ za } U_2' \leq U_{ul} \leq U_3'.$$

Kada napon na ulazu dostigne napon  $U_3$  provede dioda  $D_5$  te se uz pretpostavku da je  $R_4 \gg (R_9+R_7+R_5)$  na izlazu pojavi napon:

$$U_{iz} = U_3 + \frac{R_4'}{R_1 + R_4'} (U_{ul} - U_3) = U_3 + k_3 (U_{ul} - U_3), \text{ za } U_3' \leq U_{ul} \leq U_4'.$$

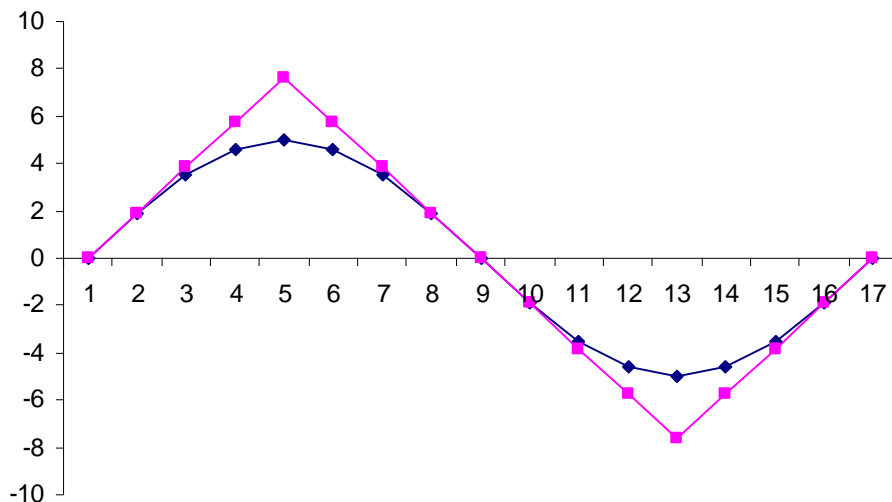
Sa  $U_2', U_3'$  i  $U_4'$  su označene vrijednosti ulaznog napona pri kojima napon na izlazu ima vrijednost  $U_2, U_3$  i  $U_4$ . Vrijednosti  $R_3'$  i  $R_4'$  predstavljaju paralelne kombinacije otpora koje se pojave kod provođenja dioda  $D_3$  i  $D_5$  i date su sa:

$$R_3' = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}, \quad R_4' = \frac{R_4 R_3'}{R_4 + R_3'} = \frac{R_2 R_3 R_4}{R_2 R_3 + R_2 R_4 + R_4 R_3}.$$

Koeficijenti nagiba  $k_0, k_1, k_2$  i  $k_3$  se odrede iz uslova da se formira potreban nagib određen tačkama kroz koje prolaze pravci, pri tome je  $k_0=1$ . Iz poznatih ovih vrijednosti mogu se odrediti vrijednosti otpora  $R_2, R_3$  i  $R_4$  prema izrazima:

$$R_2 = \frac{k_1}{1 - k_1} \cdot R_0, \quad R_3 = \frac{k_2 k_1}{k_1 - k_2} R_0, \quad R_4 = \frac{k_3 k_2}{k_2 - k_3} R_0, \quad \dots, \quad R_n = \frac{k_n k_{(n-1)}}{k_{(n-1)} - k_n} R_0. \quad (58)$$

Kada se ulazni napon počne smanjivati vrijedi ista logika pri čemu koeficijenti  $k_i$  imaju negativne vrijednosti. Kod negativnih ulaznih napona provodi ekvivalentna simetrična grana sa diodama:  $D_2$ ,  $D_4$  i  $D_6$ . Slika 115 pokazuje grafik ulaznog pilastog napona i segmentima generisanog sinusnog napona sa  $N=16$  tačaka na periodu. Sa ovog dijagrama mogu se odrediti vrijednosti potrebne za proračun otpora:  $U_1, U_2, U_3$ ,  $k_1, k_2$  i  $k_3$ .



Slika 115. Princip generisanja sinusnog valnog oblika iz signala pile promjenom koeficijenta nagiba

Kako formiramo otpornu mrežu?

Opredjelimo se za maksimalnu amplitudu koju želimo postići ( $U_{\max}$ ). Kod proračuna uzmemo proizvoljnu frekvenciju  $f_0$  i četvrtinu perioda podijelimo na  $N/4$  dijelova, tako da  $N/4$  iznosi broj korištenih dioda podjeljen sa dva plus jedan. Sada je  $N$  broj tačaka na periodu unutar koga vršimo aproksimaciju. Uzmimo za primjer da koristimo 6 dioda kao na slici 114 tada je  $N/4=4$  odnosno  $N=16$ . Aproksimacija sa 16 uzoraka po periodu je sasvim dobra. Sada izračunamo sve vrijednosti idealne sinusoida u ovih 16 tačaka (druga kolona u tabeli 10). Poslije toga izračunamo vrijednosti odgovarajuće pile koju je potrebno dovesti na ulaz (treća kolona u tabeli 10). To računamo po osnovu prolaska kroz prvu tačku aproksimacije gdje sinusoida i pila imaju iste vrijednosti, odnosno vrijedi da je napon na izlazu jednak naponu na ulazu za sve vrijednosti ulaznog napona od nule do prve aproksimacione tačke. Sada računamo koeficijente  $k_i$  prema izrazu:

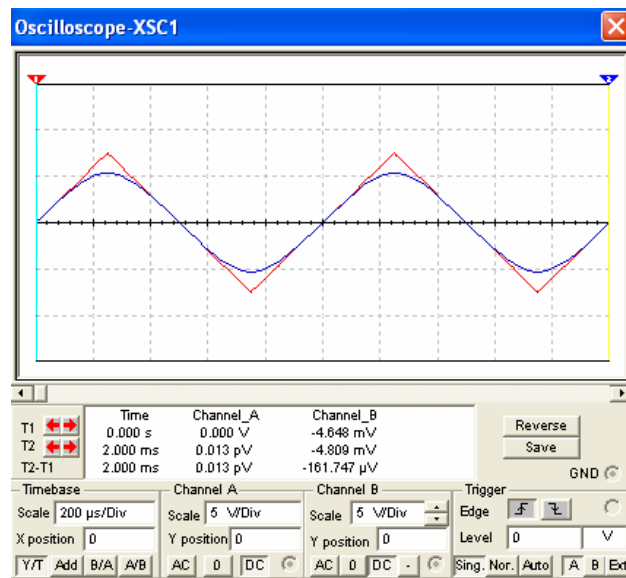
$$k_i = \frac{U_i - U_{i-1}}{U'_i - U'_{i-1}}, \quad k = 0,1,2,3. \quad (59)$$

Po osnovu gornjeg izraza izračunali smo vrijednosti  $k_i$  date u četvrtoj koloni tabele 10. Otpori  $r_i$  predstavljaju djelitelj koji formira tačke promjene nagiba. Najjednostavnije ih je uzeti tako da njihov zbir iznosi iznosu referentnog napona  $V_{\text{ref}}$  izražen u kiloomima. Tako smo odredili kolonu 5 u tabeli 10.  $V_{\text{ref}}$  treba iznositi vrijednosti maksimalnog napona sinusoida odnosno njenoj amplitudi. Po osnovu određenih  $k_i$  i gore datog izraza odrede se otpori  $R_i$  uz usvojeni  $R_1=47k$  da bismo obezbijedili uslov  $r_i \ll R_i$ . Maksimalna vrijednost ulaznog napona treba da iznosi 7,654V. Time smo dobili sve potrebne vrijednosti.

Tabela 10. Vrijednosti potrebne za proračun diodnog uobličavača sinusoide

n	sinus	pila	$k_i$	$r_i$ (k $\Omega$ )	$V_{ref}$	$R_i$ (k $\Omega$ )
0	0,000	0,000			5,000	
1	1,913	1,913	1,000	1,913		150,350
2	3,536	3,827	0,848	1,622		46,092
3	4,619	5,740	0,566	1,084		8,277
4	5,000	7,654	0,199	0,381		
5	4,619	5,740				
6	3,536	3,827				
7	1,913	1,913				
8	0,000	0,000				
9	-1,913	-1,913				
10	-3,536	-3,827				
11	-4,619	-5,740				
12	-5,000	-7,654				
13	-4,619	-5,740				
14	-3,536	-3,827				
15	-1,913	-1,913				
16	0,000	0,000				

Dobijena sinusoida se sastoji iz izlomljenih pravaca koji povezuju dvije susjedne tačke između kojih se izvodi aproksimacija. Vrijednosti ovako dobijene sinusoide u tačkama interpolacije odgovaraju idealnoj sinusoidi. Grafik dobijen simulacijom po osnovu ovako izračunatih vrijednosti dat je na slici 116.



Slika 116. Rezultati diodnog uobličavača dobijeni simulacijom

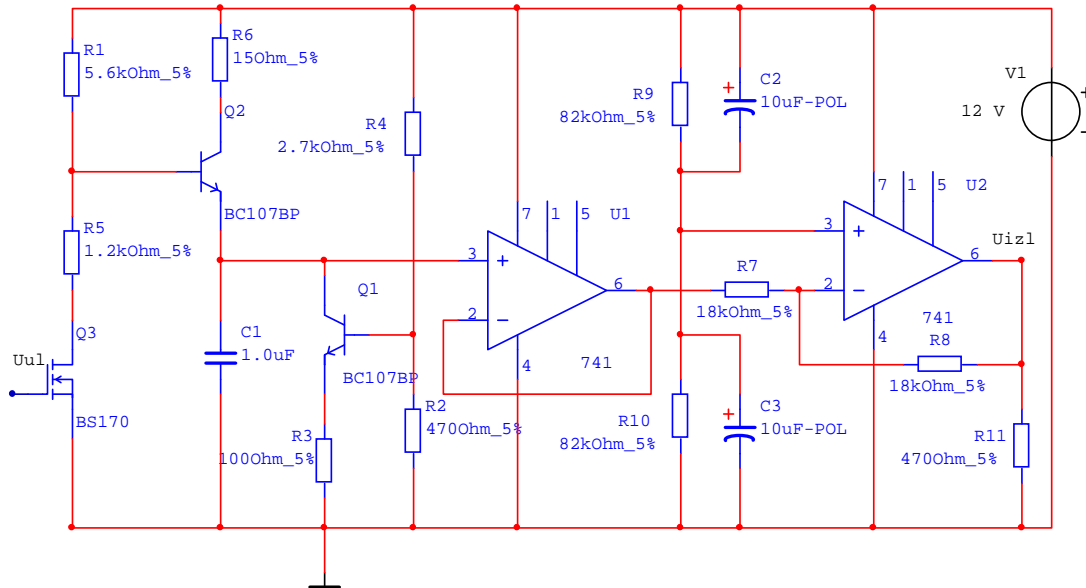
## **Eksperiment 17**

Koristeći gornji primjer realizirati diodni uobličavač sinusoide sa 8 dioda. Uzeti da je  $U_{max}=5V$ . Koristiti 1% otpore pri tome formirati serijskim kombinacijama sve potrebne vrijednosti iz E12 otpornog niza.

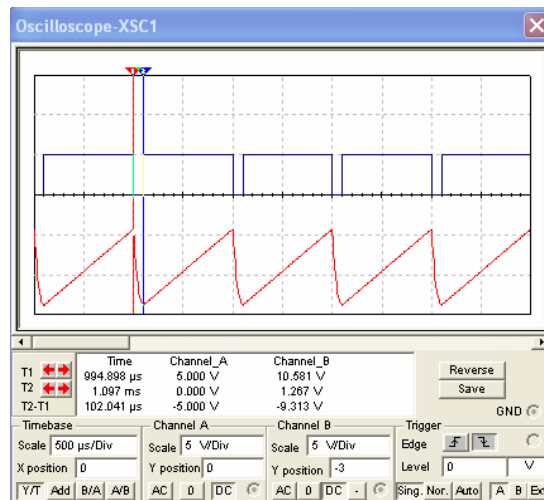


## 7.2. Generator pile

Jedna šema generatora pile prikazana je slikom 117. Iako su u sklopu kombinirani OP bipolarni i unipolarni tranzistor šema je dosta jednostavna i funkcionalna. Dobijeni signal je linearan i neovisan od napona napajanja za sve  $R_p \geq 1k$ . Amplituda linearnog dijela signala je 10V. Napajanje sklopa je 12V. Signali dobijeni simulacijom su prikazani slikom 118. Isti signali se dobiju i na fizičkom sklopu.



Slika 117. Šema generatora pile



Slika 118. Oblika signala na generatoru pile

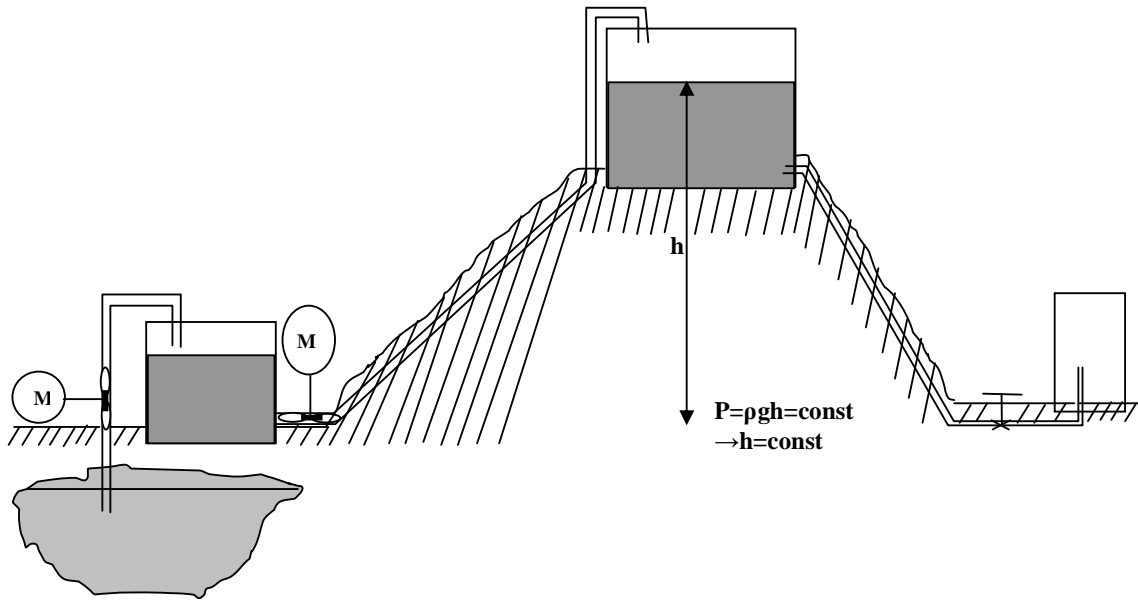
## **Ekspiriment 18**

Spojiti generator signala prema slici 117. Na ulaz dovesti unipolarni signal četvrtke amplitude 5V i frekvencije 1kHz. Neka je odnos višeg i nižeg naponskog nivoa ulaznog signala jednak 90:10. Snimiti signale na ulazu i izlazu. Analizirati sklop. Izračunati: sve struje, sve napone, potrošnju, ovisnost linearnosti od opterećenja. Opisati ulogu svih dijelova sklopa. Nacrtati blok strukturu sklopa razbijenog na funkcionalne podcjelive.

## 8. NAPONSKO-STRUJNI I STRUJNO-NAPONSKI KONVERTORI

Procesi kojima se upravlja putem automatske regulacije za potrebe te regulacije opisuju se parametrima koji definiraju stanje procesa. Ti parametri mogu biti različiti: temperatura, napon, brzina, nivo, protok, pritisak itd. Sami regulatori uglavnom se izvode kao električni te se javlja potreba pretvaranja neelektričnih veličina u električne signale. Kao električni signali koriste se naponski ili strujni signal. Naponski signal je jednostavniji za obradu i s te strane poželjniji, ali neke primjene zahtijevaju korištenje strujnog signala. Vrlo često aplikacija zahtjeva konverziju strujnog u naponski signal i naponskog signala u strujni signal. Na jednom primjeru ćemo pokazati obe navedene konverzije kao i razloge njihovog korištenja.

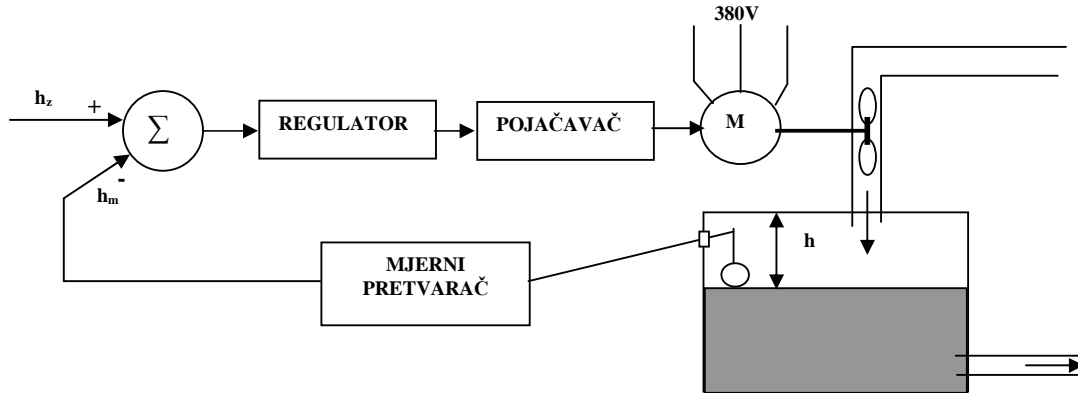
Neka se šire gradsko područje snabdijeva vodom iz podzemnih izvora sa jednom bušotinom. Na mjestu bušotine izgrađeno je postrojenje kojim se reguliše snabdijevanje potrošača vodom. Na nekoliko lokalnih uzvišenja izgrađeni su rezervoari za lokalnu distribuciju vode. Regulacija se izvodi tako što se na svakom rezervoaru reguliše pritisak vode predviđen za to područje. Pritisak se reguliše postizanjem odgovarajućeg nivoa u rezervoaru. Iz ovog rezervoara potrošači se snabdijevaju putem prirodnog pada vode. Pošto iz distributivnih rezervoara putem distributivne mreže ističe voda prema potrošačima to nivo vode u rezervoarima opada. Da bi se nivo vode održavao voda se dopunjuje iz glavnog rezervoara koji se opet puni iz podzemnih izvora. Dopunjavanje vodom distributivnih rezervoara izvodi se pumpama smještenim neposredno uz glavni rezervoar. Pumpe pogoni motor kojim je potrebno upravljati.



Slika 119. Snabdijevanje gradskog područja vodom

Pošto je potrošnja stohastična i unaprijed nepredvidiva onda je potrebno mjeriti nivo vode u distributivnim rezervoarima i po osnovu toga upravljati motorima, odnosno pumpama. Proces se može jednostavno opisati prostim regulacionim krugom (slika 120). Zadana vrijednost je nivo  $h_z = \text{const}$ , mjerena vrijednost je  $h_m$  koju dobivamo sa mjerača nivoa smještenog u distributivni rezervoar. Pošto su regulatori smješteni u postrojenju kod glavnog rezervoara, a

distributivni rezervoari se nalaze na različitim lokacijama, sa različitim rastojanjima od glavnog rezervoara potrebno je mjerenu vrijednost  $h_m$  prenijeti do postrojenja sa regulatorima. Ako se to izvodi električnim vodovima (bakarnim vodovima) naponskim signalom, na njima će doći do pada napona zbog postojanja otpora tih vodova.

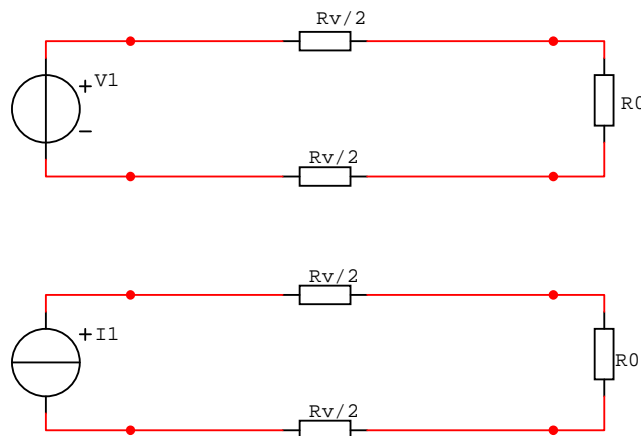


Slika 120. Prosti regulacioni krug regulacije nivoa u jednom rezervoaru

Dužina i presjek vodova mogu biti različiti te se nastoji realizirati sistem koji će biti neosjetljiv na otpor vodova. Rješenje je korištenje strujnih signala (slika 121). Kao što se sa slike 121 i iz izraza 60 vidi, napon na mjestu regulatora ne zavisi od otpora voda kod strujnog signala dok kod naponskog zavisi. Zato se za prenos mjernih signala na veća rastojanja koristi strujni signal. Usvojeni su standardi 0-20mA i 4-20mA.

$$U_2 = \frac{V_1}{R_v + R_0} \cdot R_0 = f(R_v) \quad (60)$$

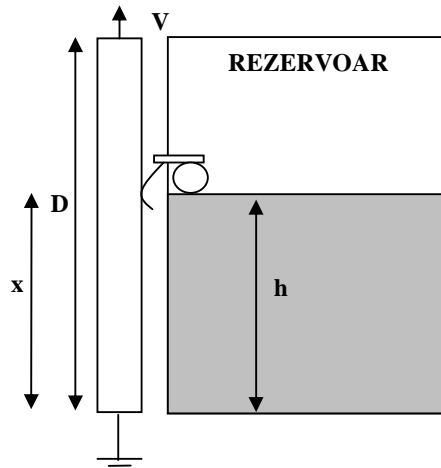
$$U_2 = I_1 \cdot R_0$$



Slika 121. Prenos naponskog ili strujnog mjernog signala

Mjerni pretvarač koji mjeri nivo vode može biti realiziran na različite načine. Jedan vrlo jednostavan pretvarač može se realizirati korištenjem plovka. Plovak je jednim svojim krajem vezan za klizač potenciometra, a drugi kraj pliva na površini vode. Pošto plovak prati površinu vode to će pozicija na klizaču biti proporcionalna nivou. Ako se na potenciometar

dovede konstantan napon onda će napon sa klizača biti proporcionalan nivou vode u rezervoaru (slika 122). Jednačina 61 daje prenosnu karakteristiku mjernog pretvarača.



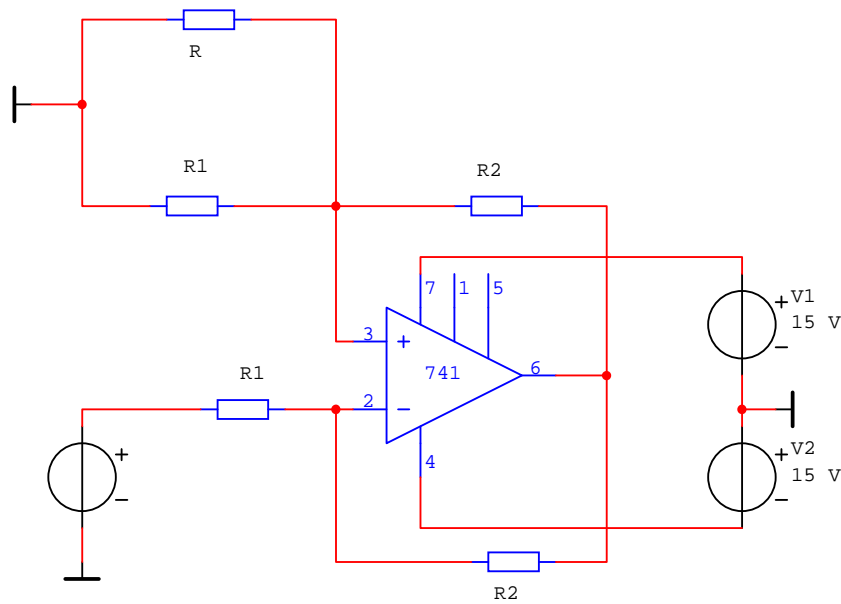
Slika 122. Mjerni pretvarač nivoa

$$R_x = \frac{R}{D} \cdot x = \frac{R}{D} \cdot h = K \cdot h \quad (61)$$

$$V_x = \frac{V}{R} \cdot R_x = \frac{V}{D} \cdot h = K_1 \cdot h$$

Kao što se u izrazu 61 vidi izlazni napon na klizaču potencijometra proporcionalan je nivou rezervoara h. Dobijeni signal je naponski i potrebno ga je prenijeti na veće rastojanje. Zato ćemo ga pretvoriti u strujni signal.

Jedna izvedba U/I konvertora može se realizirati sa OP 741. Šema je data na slici 123. Jednačine koje opisuju sklop su date u 62.



Slika 123. U/I konvertor realiziran na bazi OP741

Struja u grani ulazni napon - minus ulaz pojačala - izlaz pojačala je određena sa:

$$I_1 = \frac{U - U_2}{R_1} = \frac{U_2 - U_{iz}}{R_2},$$

gdje je sa  $U_2$  označen napon u tački 2 OP a sa  $U_{iz}$  napon na izlazu OP.  $U$  je napon na ulazu U/I konvertora. Pošto OP radi u linearnom režimu (negativna povratna sprega), to je napon na plus ulazu OP jednak onom na minus ulazu odnosno iznosi  $U_2$ . Sada je struja koja teče kroz granu izlaz OP - plus ulaz određena sa:

$$I_2 = \frac{U_{iz} - U_2}{R_2} = I + \frac{U_2}{R_1},$$

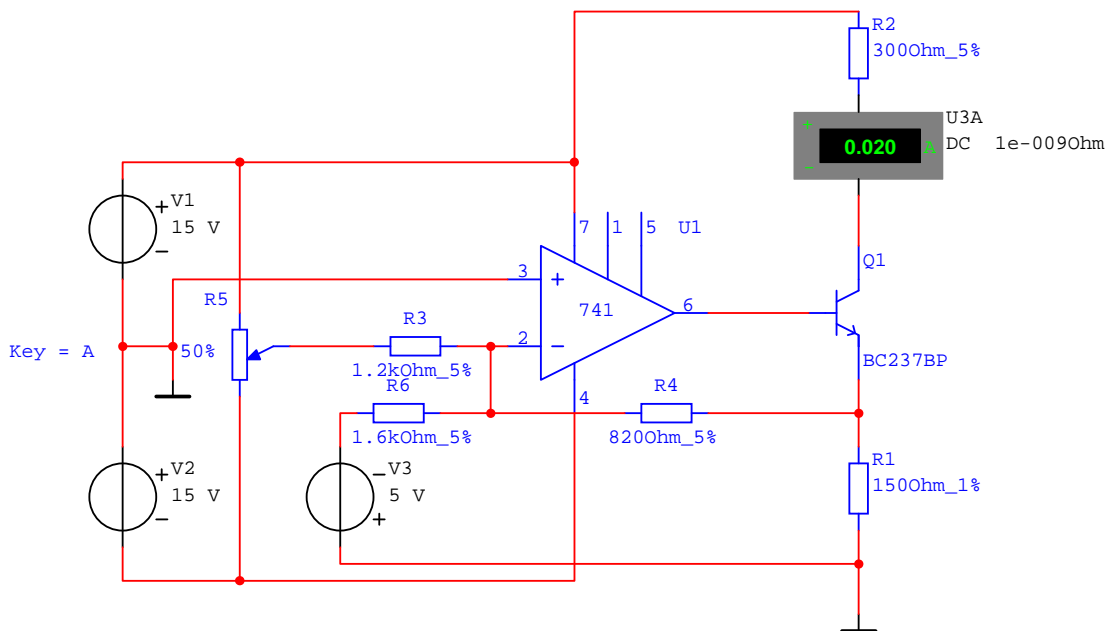
gdje je sa  $I$  označena struja na izlazu U/I konvertora. Iz navedene dvije jednačine dobije se da struja  $I$  zavisi samo od ulaznog napona  $U$  i otpora  $R_1$  tj. ne zavisi od otpora potrošača  $R$ .

$$I = -\frac{U}{R_1} \quad (62)$$

### Eksperiment 19.1

Realizirati U/I pretvarač prema gornjoj šemi. Odrediti vrijednosti otpora  $R_1$  i  $R_2$  tako da se za promjene ulaznog napona od 0V do 10V dobije promjena struje od 0mA do 10mA. Voditi računa o ograničenjima OP. Na ovako realiziranom U/I konvertoru izvršiti mjerenja prenosne karakteristike u ovisnosti od otpora  $R$ .  $R$  mijenjati od 100Ω do 1000Ω sa korakom od 100Ω. Za sva mjerenja ulazni napon mijenjati od 0 do 10V sa korakom od 1V. Sva mjerenja prvo napraviti u MULTISIMU a zatim ponoviti na fizičkom modelu.

Spoj sa prethodne šeme ima jedan vrlo jednostavan nedostatak. Zbog strujnih ograničenja realnog OP nemožemo dobiti izlaznu struju 0-20 mA, nego maksimalno 10mA. Zato ćemo dati jednu drugu šemu koja to omogućuje.



Slika 124. U/I pretvarač 5V / 0-20mA i 5V / 4-20mA

Pretvarač sa slike 124 omogućuje pretvaranje napona 0-5V u struju 0-20mA ili 4-20mA. Pri ulaznom naponu  $V_3=0V$ , potencijetrom  $R_5$  se namjesti struja na 0mA ili 4mA. Zatim se

izborom otpora  $R_6$  bira strmina prenosne karakteristike. Za ovaj tranzistor (BC237) u MULTISIMU je realizirana šema sa otporom  $R_6=2k$  za opseg 4-20mA i  $R_6=1k6$  za opseg 0-20mA.

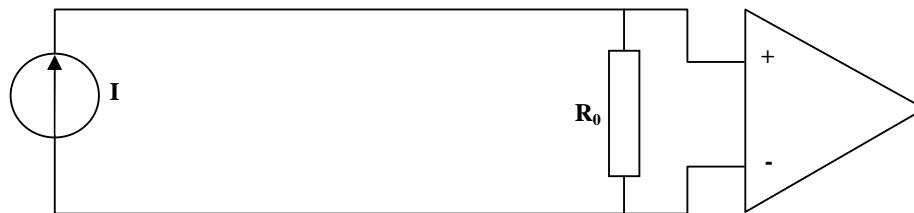
### **Eksperiment 19.2**

Realizirati U/I pretvarač prema šemi sa slike 124. Na ovako realiziranom U/I konvertoru izvršiti mjerenja prenosne karakteristike u ovisnosti od otpora  $R_2$ , za oba mjerna područja (0-20mA, 4-20mA).  $R$  mijenjati od  $10\Omega$  do  $500\Omega$  sa korakom od  $10\Omega$ . Za sva mjerenja ulazni napon mijenjati od 0 do 5V sa korakom od 0.5V. Sva mjerenja prvo napraviti u MULTISIMu a zatim ponoviti na fizičkom modelu.

Konverzija struje u napon je mnogo jednostavnija. Dovoljno je struju iz strujnog izvora pustiti kroz poznati otpor ( $R_0$ ) na njegovim krajevima će se pojaviti naponski signal  $U=IR_0$ . U praktičnim realizacijama I/U konvertora treba voditi računa o dvije stvari:

- maksimalna vrijednost otpora za koju strujni izvor daje konstantnu struju,
- zajedničke naponske tačke strujnog izvora i mjernog uređaja na drugoj strani.

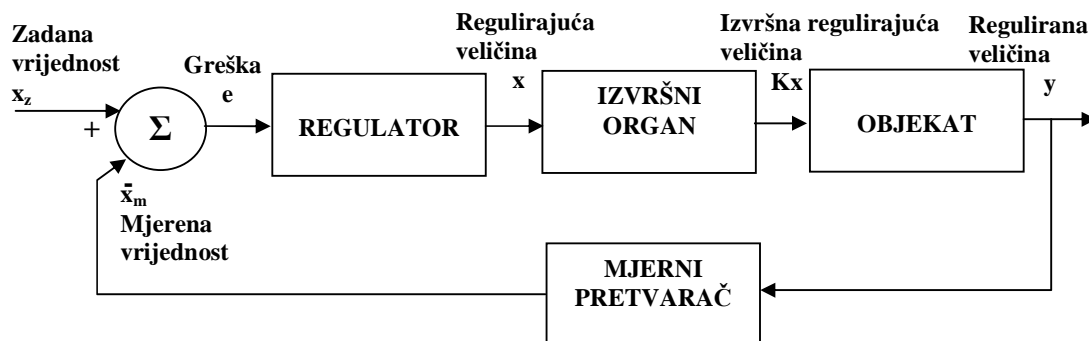
Uglavnom se koristi instrumentaciono pojačalo koje ima diferencijalni ulaz tako da nije nužno da strujni izvor i mjerni sistem imaju zajedničku masu iako mogu.



Slika 125. I/U konvertor sa instrumentacionim pojačalom

## 9. ELEKTRONIČKA REALIZACIJA ANALOGNIH REGULATORA

Kao što je poznato automatska regulacija po jednoj promjenjivoj se izvodi prema blok šemi koja predstavlja prosti regulacioni krug i data je na slici 126.



Slika 126. Prosti regulacioni krug

Funkcija svakog pojedinog dijela na slici 126 je dobro poznata iz linearnih sistema upravljanja i ovdje ih nećemo posebno objašnjavati. Neke od izvedbi pojedinih komponenti sa gornje šeme, kao što je mjerni pretvarač, pojačavač upravljačkog signala, smo već upoznali. Ovdje ćemo dati neke od realizacija analognih regulatora. Kao što ćemo vidjeti i te izvedbe se zasnivaju na sklopovima koje smo ranije detaljnije obradili.

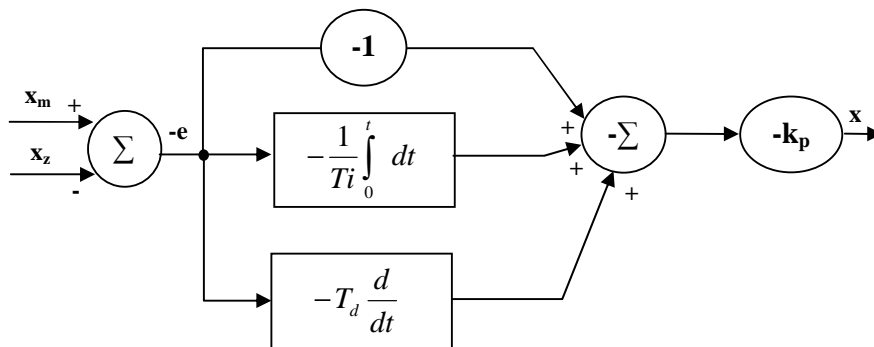
### 9.1. PID regulator

PID (Proporcionalno-integralno-derivatni) zakon upravljanja je dat slijedećom funkcijom:

$$x = k_p \left( e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e dt + T_d \frac{de}{dt} \right) \quad (63)$$

$$e = x_z - x_m.$$

Konstante  $T_i$ ,  $T_d$  zovu se konstante integracije i derivacije i podešavaju se prema dinamičkim svojstvima objekta. Elektronička realizacija gornjeg zakona upravljanja korištenjem OP proizilazi iz samog izraza: imamo proizvod pojačanja i zbira tri člana (greške, integrala greške i izvoda greške). Ulaz je greška koja se dobije kao izlaz iz sklopa za oduzimanje. Sve navedene operacije se jednostavno realiziraju sa OP i svi su sklopovi već ranije obrađeni. Blok struktura rješenja je data na slici 127.



Slika 127. Blok struktura PIDa

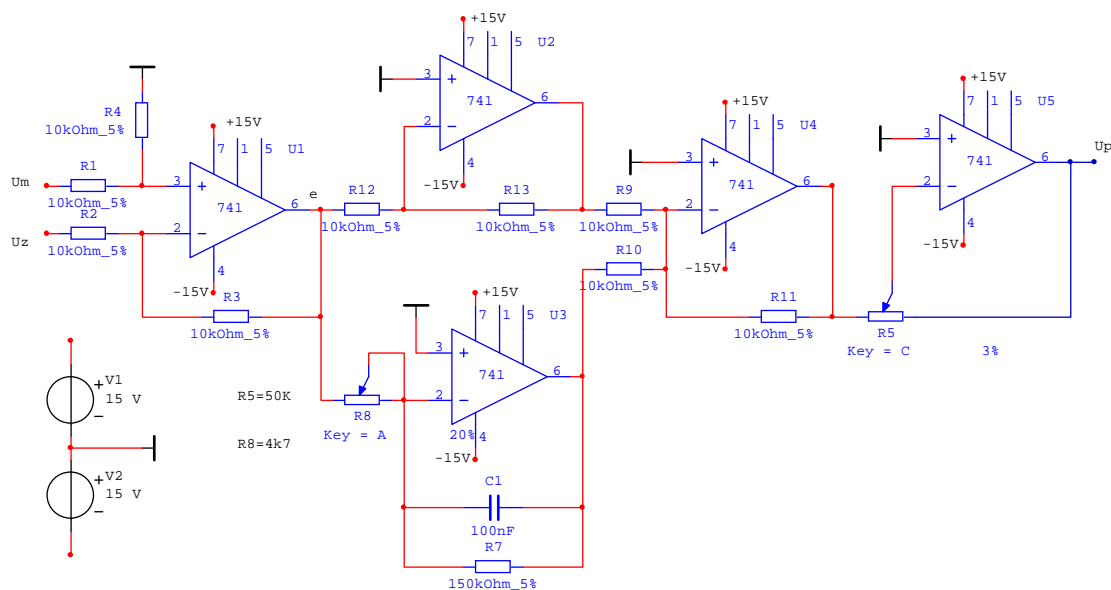
Diferencijator je vrlo osjetljiv na šumove te se stoga u praktičnim realiziranjima funkcije diferenciranja koriste aktivne RC mreže predstavljene prenosnom funkcijom:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = K_d \frac{s}{1 + T_d s} \quad (64)$$

ako je ulazni signal  $x(t)$  takav da je  $T_d \omega \ll 1$  ( $s=j\omega$ ), tj. da ne sadrži komponente sa višim frekvencijama onda gornja prenosna funkcija predstavlja blok idealnog diferencijatora. Ukoliko u ulaznom signalu postoje više harmonijske komponente (na primjer šumovi) onda za te komponente nazivnik izraza 64 postaje velik te se njihov uticaj minimizira.

## 9.2. Realizacija PI regulatora za regulaciju brzine vrtnje istosmjernog motora

S obzirom da smo vidjeli da je praktična realizacija D komponente u PID regulatoru komplicirana za demonstraciju rada linearnih regulatora napravićemo PI regulator. Da bismo mogli vidjeti sve zamke koje kod postojanja povratne sprege u regulaciji postoje za objekat regulacije ćemo birati prenosne funkcije prvog reda tako da ćemo u konačnici imati sisteme drugog reda koji mogu pokazati neke interesantne fenomene regulacije.



Slika 128. Šema PI regulatora

Šema sa slike 128 je jednostavno dobijena tako što smo implementirali strukturu sa slike 127 unutar koje je izostavljen diferencijalni član. Ako nam treba PID onda samo dodamo diferencijator na šemu sa slike 128. Pojačalo  $U_1$  predstavlja sklop za oduzimanje koji formira signal greške  $e = -(U_m - U_z) = U_z - U_m$ . Pojačalo  $U_2$  predstavlja inverter na čijem izlazu dobijemo  $-e$ . Pojačalo  $U_3$  predstavlja integrator čije je  $T_i = R_8 C_1$ . Pojačalo  $U_4$  je sumator koje sabira P i I komponente regulirajućeg signala. Zadnje pojačalo predstavlja pojačavač kojim mijenjamo  $K_p$  u jednačini 63.

## **Ekspiriment 20**

Realizirati PI regulator sa slike 128. Za kondenzator  $C_1$  predvidjeti više mogućnosti tako što će se jednostavnim kratkospojnicima birati potreban C (10nF, 100nF, 1μF, 10μF). Realizirati štampanu ploču za navedeni sklop veličine ¼ Evropa kartice. Sve ulaze i izlaze izvesti na konektore, a potencioetre locirati tako da je pristup istima jednostavan. Sve testne signale



(izlaze svih pojačala) izvesti na testne tačke na koje se jednostavno može prikačiti sonda osciloskopa. Provjeriti ispravnost regulatora tako što ćete ulaz kao  $U_z$  dovoditi signal sa generatora funkcija (četvrtka 1V, 1kHz), a  $U_m$  vratiti sa izlaza (jedinična povratna sprega, regulator reguliše sam sebe). Kada sklop profunkcioniše onda testirati njegove mogućnosti dodajući različite terete: otporno opterećenje, RC serijska kombinacija, RC paralelna kombinacija, samo C. Mijenjati  $K_p$  i  $T_i$  i uočavati promjene. Pronaći slučaj primjera odziva drugog reda te za njega napraviti detaljan izvještaj. Dati funkcionalni opis sistema za ovaj slučaj.

### **Eksperiment 21**

Realizirati regulaciju brzine vrtnje istosmjernog motora korištenjem realiziranog PI regulatora. Kao izvršni organ koristiti pojačalo upravljačkog signala prema šemi datoj na slici 94. Koristiti motor sa taho generatorom tako da mjerni signal bude napon. Vježbu odraditi sa studentima koji pohađaju 'Praktikum automatike i informatike'. Vaš je zadatak da realizirate elektroničku podršku za navedenu realizaciju, a njihov zadatak je da naprave kompletan matematički model navedenog sistema te podese parametre regulatora. Sva mjerenja i eksperimentisanja trebaju biti izvedena zajedno.

## LITERATURA

1. Thomas L. Floyd, '*Electronic Devices*', Macmillan Publishing Company New York 1992.
2. Wal Jung, Editor, Analog Devices '*OP Amp Applications Handbook*', Elsevier Amsterdam, Boston, London, New York...2005.
3. Petar Biljanović, '*Elektronički sklopovi*', Školska knjiga Zagreb 1997.
4. Dragan M. Pantić, Janko S. Pešić, '*Primena linearnih integriranih kola*', Tehnička knjiga Beograd, 1983.
5. Zijo Pašić, '*Impulsna elektronika*', Svjetlost Sarajevo 1991.
6. Božo Milobar, Alfred Židan, '*Spojevi s integriranim sklopovima*', Tehnička knjiga Zagreb 1982.
7. I.M.Ivanov, R.D.Mac, M.M.Mogilevski '*Elektrotehnika*', Moskva 1966.
8. Tugomir Šurina, Günther Klasche, '*Impulsne pojave i sklopovi*', Školska knjiga Zagreb 1978.
9. David L. Heiserman, '*Handbook of digital IC applications*', Prantice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey 1980.
10. Filip K.Petrović, '*Električna mjerenja*', II dio, Naučna knjiga Beograd 1992.
11. Ante Šantić, '*Elektronička instrumentacija*', Školska knjiga Zagreb 1993.
12. Tektronix, '*Instruction Manual TAS455&465 Analog Oscilloscopes*', Tektronix 1992.
13. Hameg Instruments '*Oscilloscope HM504-2 User Manual*' Mainhausen Germany 2006.
14. Boris Tomić, '*Električne instalacije*', Školska knjiga Zagreb 1967.
15. Amir Halep, '*Električne instalacije i osvjetljenje*', Posebna izdanja Planjax Tešanj 2005.
16. Drago Keler, Miljenko Maričević, Vjekoslav Srb, '*Elektromonterski priručnik*', Tehnička knjiga Zagreb 1975.
17. Conrad Electronic GmbH, '*Function Generator FG-7202 operating instructions*', Germany 1997.
18. Slavoljub Marjanović, '*Elektronika 1 – Komponente i kola*', Akademska misao, Beograd 2004.
19. Robert Brekalo, Bor Masten, Zlatko Šimunec, '*Projektiranje tiskanih pločica skupom programskih alata ACCEL EDA*', CadCam Design Centar, Zagreb 2000.
20. Abdulah Akšamović, '*Računarska podrška dizajniranju štampanih veza*', Seminarski rad, ETF Sarajevo 2000.