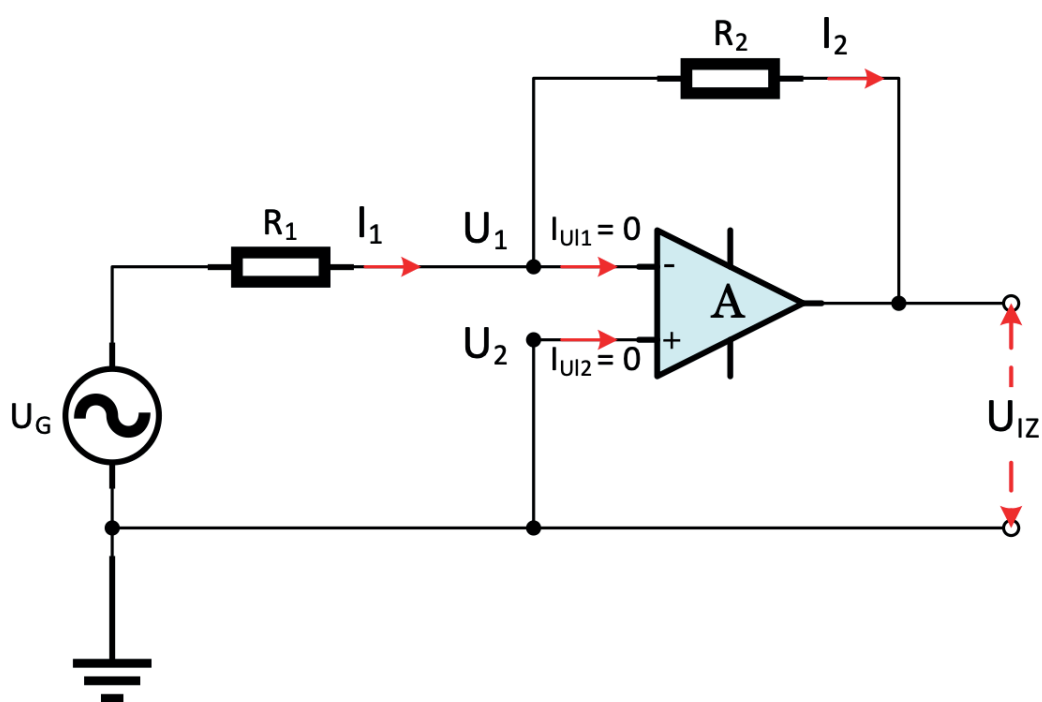




ELEKTRONIČKI SKLOPOVI



Tonko Kovačević • Vjekoslav Zrno

ELEKTRONIČKI SKLOPOVI



Projekt je sufinancirala Europska unija iz Europskog socijalnog fonda.
Sadržaj publikacije isključiva je odgovornost Obrtne tehničke škole Split



EduSplit Obrtna tehnička škola
Regionalni centar kompetentnosti Split

Tonko Kovačević • Vjekoslav Zrno

ELEKTRONIČKI SKLOPOVI

Split, 2023.

Autori: Tonko Kovačević, mag. ing. el., Vjekoslav Zrno, mag. ing. el.

Urednik: Aleksander Radovan

Naslov: **Elektronički sklopovi**

Recenzenti: Tonči Kozina

Lektorica: Blaženka Bračun, prof.

Grafičko oblikovanje: ALGEBRA d.o.o.

Ilustracije: Shutterstock, Freepik, izrada autora u MS Visio

Nakladnik: Obrtna tehnička škola Split

Odgovorna osoba: ravnatelj Milivoj Kalebić

Za nakladnika: ALGEBRA d.o.o.

Više informacija:

Obrtna tehnička škola Split

Plančićeva 21

21000 Split

e-pošta: ured@ss-obrtna-tehnicka-st.skole.hr

mrežna adresa: edusplit.eu

ISBN:978-953-8537-10-3

Regionalni centar kompetentnosti Obrtne tehničke škole

Split, 2023.

Obrtnička tehnička škola, Plančićeva 21, 21000 Split, OIB: 43651407703, nositelj je isključivog prava iskorištavanja ovog autorskog djela, prostorno, vremenski i sadržajno neograničeno, a koje pravo obuhvaća imovinska prava autora i to osobito, ali ne isključivo, pravo reproduciranja (pravo umnožavanja), pravo distribuiranja (pravo stavljanja u promet), pravo priopćavanja autorskog djela javnosti te pravo prerade. Pojedina imovinska autorska prava treća osoba može steći isključivo na temelju pisane suglasnosti Obrtničke tehničke škole.

Sadržaj

1. Sklopovi s diodama	11
1.1. Poluvodiči	12
1.2. PN dioda	15
1.2.1. Poluvalni ispravljač	18
1.2.2. Punovalni ispravljač	20
1.2.3. Diodni ograničavači	22
1.3. Zenerova dioda	24
1.4. Kapacitivna dioda	27
1.5. Led, svjetleća dioda	30
1.6. Fotodioda	32
1.7. Diodna tehnika	35
1.7.1. Sklop „I“ u diodnoj tehnici	35
1.7.1. Sklop „ILI“ u diodnoj tehnici	35
2. Osnovni sklopovi s tranzistorima	37
2.1. Bipolarni tranzistor	38
2.1.1. Princip i područje rada bipolarnih tranzistora	39
2.1.2. Parametri bipolarnog tranzistora	42
2.1.3. Ograničenja u radu bipolarnih tranzistora	44
2.1.4. Bipolarni tranzistor kao sklopka	47
2.2. Unipolarni tranzistori	49
2.2.1. JFET	50
2.2.2. Mosfet	52
2.2.3. VFET i VMOS	56
2.2.4. Mosfet sklopka	57
2.3. Tranzistorska tehnika	59
2.3.1. Logički „NE“ sklop u tranzistorskoj tehnici	59
2.3.2. Logički „ni“ sklop u tranzistorskoj tehnici	60
2.3.3. Logički „nili“ sklop u tranzistorskoj tehnici	61
3. Osnovni logički sklopovi	63
3.1. Brojevi sustavi	64
3.1.1. Rimski i dekadski brojevi sustav	64
3.1.2. Oktalni i heksadekadski brojevi sustav	65
3.1.3. Binarni brojevi sustav	67
3.1.4. ASCII i Unicode	69
3.2. Logički sklopovi	71
3.2.1. Sklop NE	71
3.2.2. Sklop I	72
3.2.3. Sklop ILI	73
3.2.4. Sklop NI	73
3.2.5. Sklop NILI	74
3.2.6. Sklop XOR	75
3.2.7. Sklop XNOR	76
3.3. Minimizacija logičkih izraza i sklopova	77
4. Sklopovi s tranzistorima	81
4.1. Tranzistorska pojačala	82
4.1.1. Izbor položaja statičke radne točke pojačala	82

4.1.1.1. Modeli pojačala	85
4.1.1.2. Frekvencijski odziv	88
4.1.1.3. Mjerenje parametara pojačala	89
4.1.2. Sklopovi pojačala s bipolarnim tranzistorima	91
4.1.2.1. Pojačalo u spoju zajedničkog emitera	92
4.1.2.2. Pojačalo u spoju zajedničkog kolektora	93
4.1.2.3. Pojačalo u spoju zajedničke baze	95
4.1.3. Sklopovi pojačala s unipolarnim tranzistorima	96
4.1.3.1. Pojačalo u spoju zajedničkog uvoda	96
4.1.3.2. Pojačalo u spoju zajedničkog odvoda	97
4.1.3.3. Pojačalo u spoju zajedničke upravljačke elektrode	98
4.1.4. Kaskadna pojačala	99
4.1.4.1. Darlingtonov spoj	99
4.1.5. Pojačala snage	101
4.1.5.1. Pojačala snage klase A	103
4.1.5.2. Pojačala snage klase B	103
4.1.5.3. Pojačala snage klase O	104
4.1.6. Oscilatori s tranzistorima	105
4.1.6.1. RC oscilator	106
4.1.6.2. LC oscilator	109
4.1.7. Stabilizatori napona s tranzistorima	113
4.1.7.1. Serijski tranzistorski stabilizatori	115
4.1.7.2. Serijski tranzistorski stabilizatori s pojačalom u povratnoj vezi	116
4.1.7.3. Zaštita stabilizatora od preopterećenja	117
5. Sklopovi s operacijskim pojačalom	119
5.1. Operacijska pojačala	120
5.1.1. Idealno operacijsko pojačalo	122
5.1.2. Područja rada operacijskih pojačala	125
5.1.3. Realno operacijsko pojačalo	126
5.1.4. Sklopovi s operacijskim pojačalima	128
5.1.4.1. Invertirajuće pojačalo	129
5.1.4.2. Neinvertirajuće pojačalo	130
5.1.4.3. Naponsko slijedilo	131
5.1.4.4. Sumirajuće pojačalo	131
5.1.4.5. Diferencijalno pojačalo	133
5.1.4.6. Derivatorsko pojačalo	135
5.1.4.7. Integratorsko pojačalo	137
5.1.4.8. Komparator operacijskog pojačala	141
5.1.5. Oscilatori s operacijskim pojačalima	143
5.1.5.1. Generator pravokutnoga napona	143
5.1.5.2. Funkcijski generator	145
5.1.6. Integrirane izvedbe stabilizatora	147
5.1.6.1. Stabilizatori stalnoga napona s trima izvodima	148
5.1.6.2. Integrirani stabilizatori podesivog napona s trima izvodima	149
Popis elemenata korištenih u sadržaju	150
Popis literature	156



1

POGLAVLJE

SKLOPOVI S DIODAMA

Nakon ovog poglavlja moći ćete:

- objasniti osnovne fizikalne principe koji se odnose na poluvodičke elemente
- objasniti način rada pn diode
- ispitati ispravnost pn diode
- razlikovati različite vrste dioda i njihove primjene

1.1. Poluvodiči

Za primjene u elektrotehnici najvažnija su električna svojstva čvrstih tijela (Kovačević, 2010.). Električni otpor svojstvo je materijala koje utječe na protok električne struje kroz njih i ovo se svojstvo razlikuje za različite materijale. Specifični otpor, koji se označava simbolom ρ (grčko slovo "ro"), izražava ovo svojstvo i mjeri se u Ohm-metrima (Ωm), tablica 1.1. Važno je napomenuti da specifični otpor materijala ovisi o temperaturi. U većini materijala specifični otpor raste s povećanjem temperature, ali za poluvodiče može postojati određeni temperaturni interval unutar kojeg specifični otpor može pasti pri povećanju temperature prije nego što ponovno raste.

Prema iznosu specifičnog otpora, čvrsta se tijela klasificiraju u tri osnovne kategorije:

1. **Vodiči:** materijali s niskim specifičnim otporom. Tipičan primjeri metalni su kristali kao što su bakar, srebro i aluminijski vodiči. Ovi materijali omogućuju lako kretanje elektrona i dobar provod električne struje.
2. **Poluvodiči:** materijali s međusobnim karakteristikama između vodiča i izolatora. Poluvodiči, poput silicija i germanija, imaju specifični otpor između onoga što se nalazi kod vodiča i izolatora. Osim toga, specifični otpor poluvodiča može značajno varirati s temperaturom i koncentracijom dodanih primjesa.
3. **Izolatori:** materijali s visokim specifičnim otporom. Primjeri uključuju staklo, keramiku i plastiku. Ovi materijali ne dopuštaju slobodan protok elektrona pa imaju vrlo visok električni otpor.

Razumijevanje električnih svojstava materijala i kako se specifični otpor mijenja s temperaturom ključno je za projektiranje električnih i elektroničkih uređaja te za odabir pravog materijala za specifičnu primjenu u elektrotehnici.

Tablica 1.1: Podjela čvrstih tijela prema specifičnom otporu

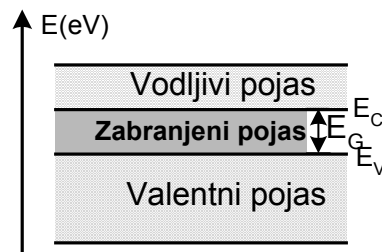
Čvrsta tijela	Specifični otpor ρ [Ωm]
vodiči	$\rho < 10^{-5}$
poluvodiči	$10^{-5} < \rho < 10^8$
izolatori	$\rho > 10^8$

Na slici 1.1 prikazani su energetske pojasevi posljednje ljuske atoma (valentna), pri čemu je energija izražena u elektronvoltima (eV). Elektronvolt predstavlja kinetičku energiju, koji je ubrzan električnim poljem, uz potencijalnu razliku od 1 V u vakuumu. Dakle, 1 eV ekvivalentan je $1,60217653 \times 10^{-19} J$ (džula). Kod poluvodiča, valentni pojas (E_v) na apsolutnoj je nuli i potpuno je popunjen, dok je vodljivi pojas (E_c) prazan, odvojen od valentnog pojasa poja-

som zabranjenih energija širine E_g . Unutar pojasa zabranjenih energija elektroni ne mogu egzistirati, što rezultira time da na apsolutnoj nuli kroz takav kristal ne može protjecati struja. Da bi struja tekla kroz kristal, elektroni moraju prijeći iz valentnog pojasa u vodljivi pojas. Međutim, kako bi to učinili, moraju apsorbirati energiju jednaku ili veću od širine pojasa zabranjenih energija (E_g). Postojanje pojasa zabranjenih energija osigurava da elektroni ne mogu prelaziti iz jednog pojasa u drugi, nego zahtijeva vanjsku energiju. Ova energija može se dobiti na različite načine, uključujući:

1. **Dopiranje:** dodavanjem određenih atoma, kao primjesa u kristalnu rešetku, mogu se mijenjati električna svojstva materijala. Na primjer, dodavanjem peterovalentnih elemenata u silicij, poput fosfora ili arsena, stvara se "n-dopirani" poluvodič, gdje će dodatni elektroni iz primjesa postati slobodni i doprinijeti vodljivosti.
2. **Luminiscencija:** ako se elektronima dodijeli dovoljno energije, na primjer svjetlosnom energijom, oni mogu „skočiti“ iz valentnog pojasa u vodljivi pojas. Kada se takav elektron vrati u niži energetski nivo, može emitirati svjetlost u procesu koji se naziva luminiscencija.

Ovaj koncept omogućuje kontrolirano upravljanje vodljivošću poluvodiča i koristi se u izradi poluvodičkih komponenata poput tranzistora, dioda i integriranih krugova. Poluvodički materijali ključni su za elektroniku i računalnu tehnologiju, a njihova sposobnost da se kontrolira vodljivost čini ih vrlo važnima za modernu tehniku.

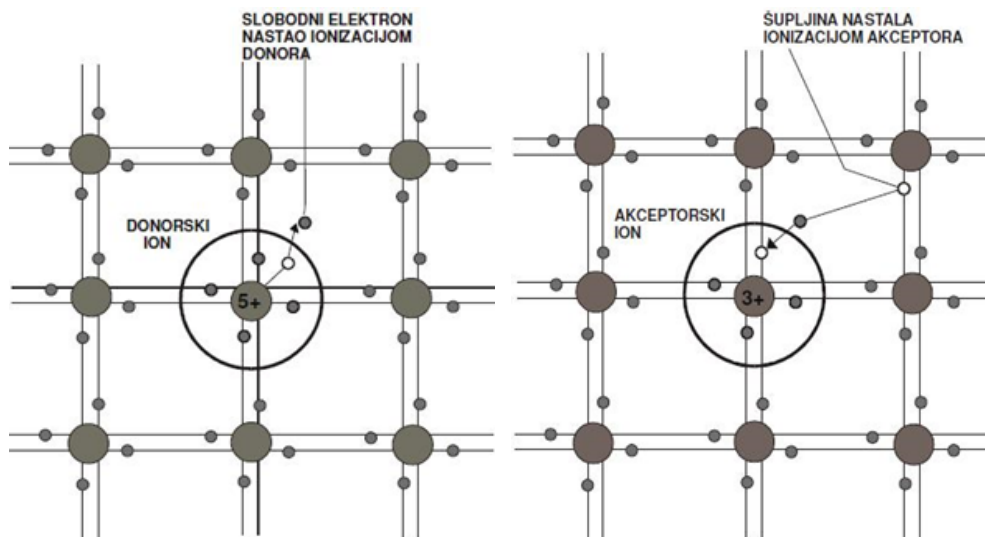


Slika 1.1: Prikaz energetske pojaseva valentne ljuske [Izvor: autorski rad]

Električna svojstva kristala mijenjaju se dodavanjem određenih primjesa u kristalnu rešetku poluvodiča (AspenCore, 2023). Donorske primjese atomi su koji se dodaju u kristalnu rešetku poluvodiča i doprinose povećanju koncentracije slobodnih elektrona. U n-tipu poluvodiča, poput n-tipa silicija, koncentracija elektrona veća je od koncentracije šupljina, što ga čini negativno nabijenim. Višak elektrona u poluvodiču potječe od donorskih primjesa poput fosfora ili arsena. Ove primjese imaju višak elektrona u valentnoj ljusci, kako je prikazano na slici 1.2. S obzirom na to da ove primjese u valentnoj ljusci imaju pet elektrona, a samo četiri su im potrebna za formiranje kovalentne veze sa susjednim atomima poluvodiča, peti će elektron biti vrlo slabo vezan za matični atom. Stoga je potrebna vrlo mala energija ionizacije da bi se taj peti elektron oslobodio i prešao u vodljivi pojas.

Kada se elektron oslobodi "primjesnog" atoma, taj atom postaje pozitivan donorski ion. Ovaj proces dodavanja donorskih primjesa omogućuje stvaranje slobodnih elektrona u vodljivom pojasu poluvodiča, što pridonosi poboljšanoj vodljivosti materijala.

P-tip poluvodiča tip je poluvodiča u kojem je koncentracija šupljina (nedostatak elektrona) veća od koncentracije elektrona, što ga čini pozitivno nabijenim, slika 1.2.

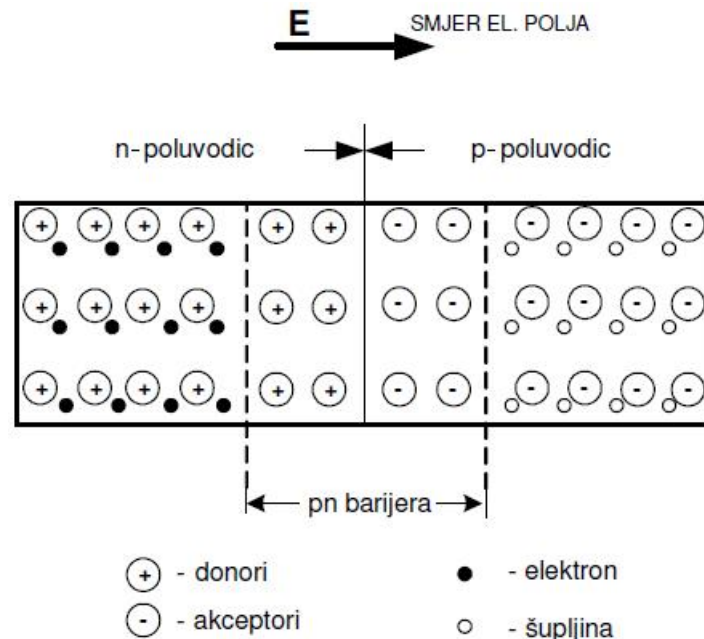


Slika 1.2: Poluvodiči *n*- i *p*- tipa [Izvor: autorski rad]

Akceptorske su primjese atomi koji se dodaju u kristalnu rešetku poluvodiča i djeluju kao "akceptori" slobodnih elektrona. U siliciju i germaniju akceptorske primjese obično uključuju trovalentne elemente poput bora i galija, koji imaju samo tri elektrona u valentnoj ljusci. Kada se akceptorski atomi ugrade u kristalnu rešetku, nedostaje im jedan elektron za formiranje čvrste kovalentne veze sa susjednim atomima poluvodiča. Kako bi nadoknadili ovaj nedostatak, akceptorski atomi "prihvaćaju" elektron iz vodljivog pojasa, stvarajući tako par elektron-šupljina. Akceptorski atom postaje negativan ion jer prima elektron. Ovaj proces stvaranja šupljina i negativnih akceptorskih iona povećava koncentraciju šupljina u poluvodiču i smanjuje koncentraciju slobodnih elektrona.

PN spoj (eng. *PN junction*) ključna je komponenta mnogih poluvodičkih elektroničkih elemenata, poput dioda i tranzistora. Ovaj spoj nastaje kada se spoje *p*-tip i *n*-tip poluvodiča, a između njih se stvori *PN* barijera. U *PN* spoju, na *p*-strani barijere postoji negativni prostorni naboj akceptorskih iona (koji su prisutni u *p*-tipu poluvodiča), dok na *n*-strani postoji pozitivni prostorni naboj donorskih iona (koji su prisutni u *n*-tipu poluvodiča). Ovaj prostorni naboj rezultat je procesa rekombinacije među većinskim nositeljima naboja, tj. elektrona i šupljina, tijekom kojeg su elektroni prelazili na *p*-stranu i rekombinirali se sa šupljinama ostavljajući za sobom akceptorske i donorske ione, što rezultira stvaranjem električnog polja između *p* i *n*-strane. Kada se *p*-strana spoja poveže s "+" stranom izvora napajanja i *n*-strana s "-" stranom, električno se polje u *PN* spoju neutralizira, što rezultira

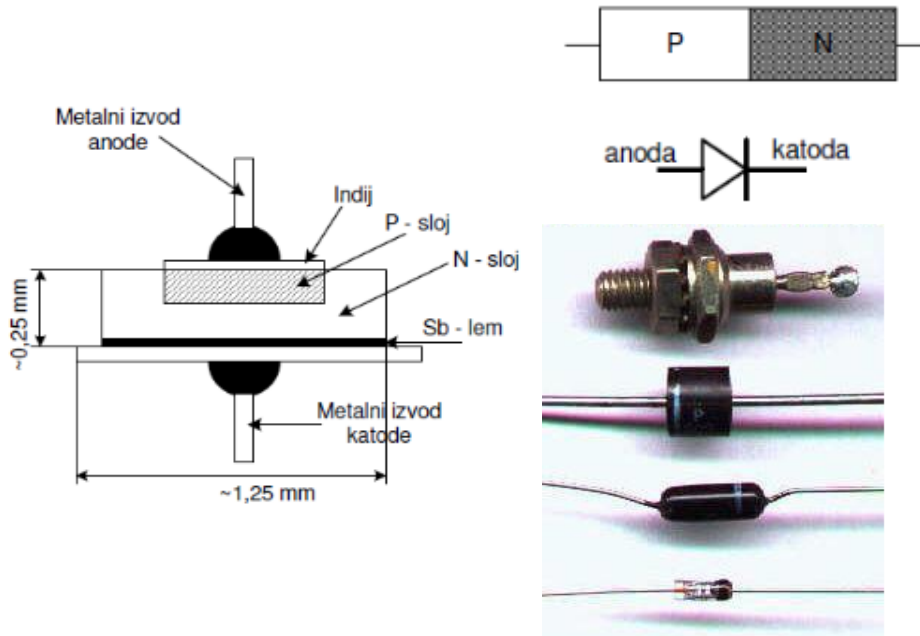
manjenjem širine barijere i olakšava protok struje kroz spoj. Ovo je uvjet za normalan rad diode u propusnom smjeru (eng. *forward bias*). Kada se polaritet izvora obrne, tj. p -strana spoji se na “-” stranu izvora, a n -strana na “+”, električno se polje povećava, a barijera postaje veća, što otežava protok struje. Ovo je uvjet za normalan rad diode u nepropusnom smjeru (eng. *reverse bias*), gdje će dioda imati visok otpor i praktički neće provoditi struju.



Slika 1.3: Ravnotežno stanje PN spoja [Izvor: autorski rad]

1.2. PN dioda

Poluvodičke diode (PN diode) elektronički su elementi s dvjema elektrodama koje dolaze u različitim izvedbama i imaju različita svojstva, ovisno o primjeni. Osnovna struktura diode obuhvaća kombinaciju n -tipa i p -tipa poluvodiča. Kada se ova dva tipa poluvodiča spoje, toplinska energija potiče difuziju uzrokujući kretanje slobodnih nositelja naboja preko cijelog kristala. U procesu difuzije elektroni prelaze s n -strane (gdje su većinski nositelji naboja) na p -stranu poluvodiča (gdje su manjinski nositelji naboja), dok šupljine s p -strane prelaze na n -stranu. Ovaj proces poznat je kao injekcija (ubacivanje) manjinskih nositelja, jer većinski nositelji dolaze na onu stranu PN spoja gdje postaju manjinski nositelji. Slika 1.4 prikazuje difuzijski tehnološki postupak izrade PN diode. Simbol diode, kao i primjeri različitih izvedbi, također su prikazani na slici 1.4 (Paunović, 2000.). Kod PN dioda pozitivna se elektroda naziva anoda, dok se negativna elektroda naziva katoda. Ova struktura i procesi difuzije ključni su za funkcionalnost poluvodičkih dioda u elektroničkim krugovima.



Slika 1.4: Simbol, građa i primjeri izvedbe difuzijske PN diode [Izvor: autorski rad]

Prvo se na metalnu podlogu nanosi n -sloj poluvodiča, a zatim se elektrolitički ili premazom nanose primjese indija ili nekog drugog trovalentnog elementa poput bora, galija itd. Kontroliranim zagrijavanjem premaza omogućava se indiju da difuzijskim procesom proдре u n -sloj, pri čemu se formira p -sloj s graničnim prijelazom. Na formirani p -sloj s graničnim prijelazom dodatno se pričvršćuju metalni izvodi, a zatim se cijeli element hermetički inkapsulira u inertnoj atmosferi kako bi se očuvala struktura i funkcionalnost. Struja kroz PN diodu može se izraziti pomoću Shockleyeve jednadžbe koja opisuje ponašanje poluvodičkih dioda:

$$I = I_s \left(e^{\frac{q \cdot U_D}{k \cdot T}} - 1 \right),$$

Jednadžba 1.1: Shockleyeva jednadžba - struja kroz PN diodu

gdje su:

I - struja kroz diodu

I_s - reverzna struja zasićenja diode (reda nA)

$e \approx 2,71828...$ - matematička konstanta poznata kao *Eulerov* ili *Napierov* broj koji čini bazu prirodnog logaritma

U_D - priključeni napon na diodi

T - temperatura diode u kelvinima (K)

$k = 1,38 \times 10^{-23}$ (J/K) - *Boltzmannova* konstanta

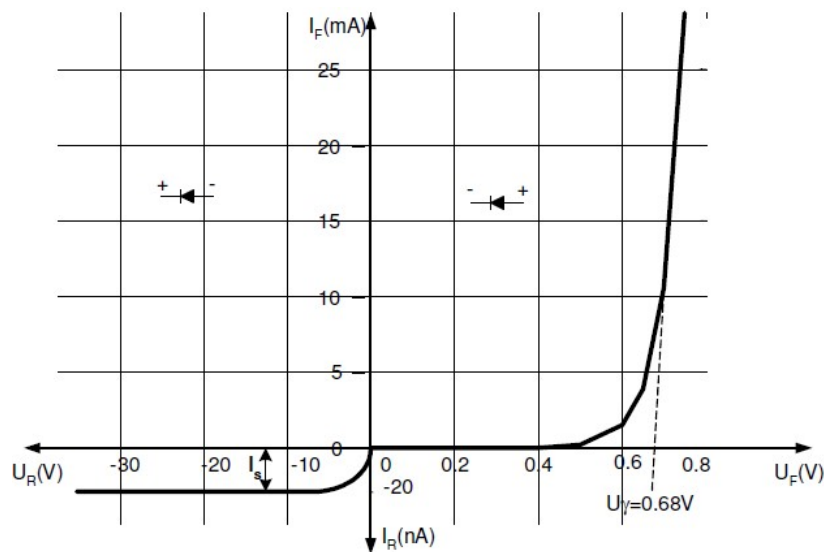
$q = 1,6 \times 10^{-19}$ (C) - iznos naboja elektrona.

Najvažnije karakteristike PN diode su (Fairchild, 1N4007, 2023):

1. **Dopuštena vrijednost napona zaporne polarizacije (U_R):** ovo je najveći iznos napona nepropusne polarizacije koji se može primijeniti na diodu bez da dođe do probijanja (izgaranja).
2. **Probojni napon (U_{BR}):** probojni napon je napon nepropusne polarizacije pri kojem dolazi do porasta reverzne struje.
3. **Dopuštena jakost struje (I_F):** to je najveći iznos struje koja smije teći kroz diodu pri propusnoj polarizaciji, a da ne dođe do njezina oštećenja. Ova struja važna je za osiguravanje da dioda ostane unutar svojih sigurnih radnih granica.
4. **Dopušten utrošak snage (P_{tot}):** ovo je ukupna snaga koja se može utrošiti na diodi pri određenim uvjetima rada. Ovaj parametar pomaže da se osigura da dioda ne prelazi svoja toplinska ograničenja.
5. **Temperaturno područje rada:** proizvođači obično pružaju podatke o karakteristikama dioda za određeno temperaturno područje. Važno je znati kako će dioda reagirati na promjene temperature kako bi se osigurala njezina pouzdanost u radu.
6. **Izvedba kućišta:** oblik i izvedba kućišta diode važni su za ugradnju i montažu u elektroničke uređaje. Kućište može utjecati na termičku učinkovitost, zaštitu od okoline i druge faktore.

Ovisno o specifičnim zahtjevima projekta, bitan je odabir diode koja zadovoljava potrebne vrijednosti ovih karakteristika kako bi aplikacija radila pouzdano i sigurno. Proizvođači pružaju tehničke listove (eng. *data sheet*) s detaljnim informacijama o ovim karakteristikama za svoje diode kako bi se mogle pravilno primijeniti.

Slika 1.5 prikazuje strujno-naponsku karakteristiku PN diode.

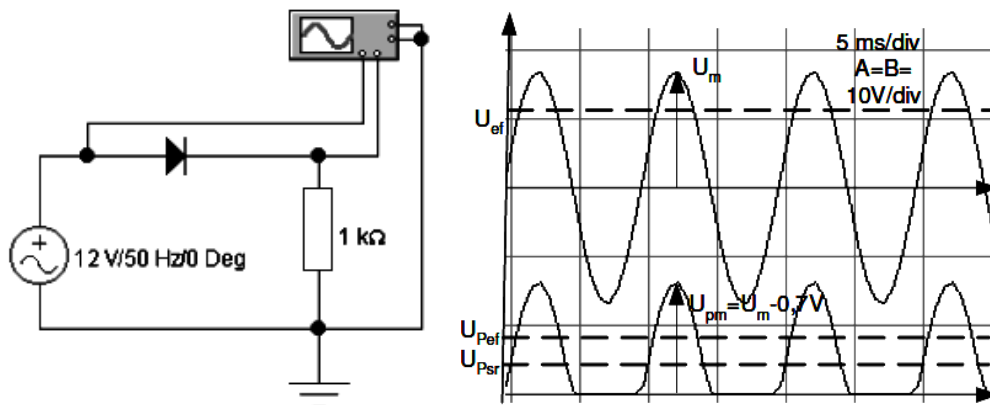


Slika 1.5: Strujno-naponska karakteristika poluvodičke diode [Izvor: autorski rad]

Struja kroz diodu u početku polagano raste, s povećanjem napona na diodi do napona koljena U_γ (engl. *threshold voltage*) u području propusne polarizacije. Nakon postizanja ovog napona koljena, struja naglo raste, poprimajući sve veće vrijednosti. Ovaj dio karakteristične krivulje diode odražava situaciju u kojoj dioda postaje provodna i omogućava prolaz slobodnih nositelja naboja. S druge strane, u području nepropusne polarizacije kada se dioda polarizira u suprotnom smjeru, kroz diodu teče vrlo mala reverzna struja zasićenja koja je obično reda nA (nanoampera). Ova reverzna struja rezultat je prolaska malog broja nositelja naboja preko diode u suprotnom smjeru. Unutar diode širina pojasa zabranjenih energija sprječava veći prolaz struje u suprotnom smjeru, no reverzna struja ipak postoji, ali je vrlo mala u usporedbi sa strujom u propusnom smjeru.

1.2.1. Poluvalni ispravljač

Ispravljačko djelovanje PN spoja osnovna je karakteristika i važna primjena poluvodičkih dioda, jer omogućuje prolaz struje samo u jednom smjeru, dok u drugom smjeru dioda blokira prolaz struje. Kada se dioda uključi u strujni krug koji se napaja izmjeničnim naponom, struja će prolaziti samo tijekom poluperiode kada je dioda polarizirana u propusnom smjeru. Ovaj proces naziva se "ispravljanje" izmjeničnog napona i rezultira pretvaranjem izmjeničnog signala u signal koji ima samo pozitivnu ili negativnu poluperiodu, ovisno o polarizaciji diode, slika 1.6. Ispravljačke diode koriste se u mnogim uređajima i električnim krugovima za pretvaranje izmjeničnog napona u istosmjerni napon, što je ključno za punjenje baterija, napajanje elektroničkih uređaja i mnoge druge primjene.



Slika 1.6: Poluvalni ispravljač [Izvor: autorski rad]

Za strujni krug prikazan na slici 1.6 struja praktički teče samo u jednom smjeru, što omogućava diodi da djeluje kao poluvalni ispravljač napona (engl. *half-wave rectifier*). Radi pojednostavljenog proračuna pretpostavljamo da je dioda idealna, što znači da nema pada napona na diodi, odnosno $U_m = U_{pm}$. Važno je napomenuti da je u stvarnim situacijama tipičan pad napona na diodi oko 0,7 V. Uzimajući u obzir praktične uvjete, dopuštena vrijed-

nost napona zaporne polarizacije diode mora biti veća od U_m . Napon na potrošaču može se izraziti sljedećim matematičkim izrazom:

$$u_p(t) = \begin{cases} U_m \cdot \sin(\omega t), & 0 \leq \omega t \leq \pi \\ 0, & \pi < \omega t \leq 2\pi \end{cases} \text{ gdje je } \omega = \frac{2\pi}{T}.$$

Jednadžba 1.2: Napon na trošilu poluvalnog ispravljača

Srednja vrijednost ispravljenoga napona, odnosno istosmjerna komponenta, dana je jednadžbom:

$$U_{Psr} = U_{DC} = \frac{U_m}{\pi} = 0,45 \cdot U_{ef},$$

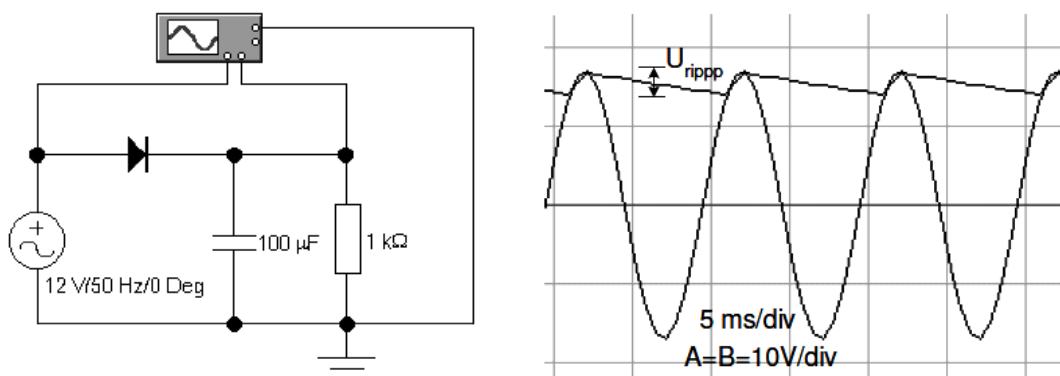
Jednadžba 1.3: Istosmjerna vrijednost ispravljenog napona poluvalnog ispravljača

a tada je efektivna vrijednost napona na potrošaču dana izrazom:

$$U_{Pef} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}.$$

Jednadžba 1.4: Efektivna vrijednost ispravljenog napona

U ispravljačima napona kvaliteta istosmjernog napona ocjenjuje se pomoću faktora valovanja ili brujanja (engl. *ripple factor*), što direktno ovisi o omjeru U_{DC}/U_{ef} . Poboľšanje oblika izlaznog napona, uz povećanje istosmjerne komponente i smanjenje valovitosti, postiže se primjenom postupka filtriranja ili glađenja ispravljenog napona. Ovaj postupak uključuje dodavanje kondenzatora paralelno s potrošačem, kako je prikazano na slici 1.7.



Slika 1.7: Poluvalni ispravljač s niskopropusnim filtrom [Izvor: autorski rad]

Iznos napona brujanja $U_{rip_{pp}}$ može se očitati na osciloskopu mjerenjem od vrha do vrha izglađenog napona, ili se može izračunati prema izrazu:

$$U_{rip_{pp}} = \frac{U_m}{f_{rip} \cdot R \cdot C'}$$

Jednadžba 1.5: Iznos napona brujanja

a f_{rip} frekvencija je napona brujanja koja za poluvalni ispravljač iznosi 50 Hz. U tablici 1.2 prikazane su karakteristične veličine za poluvalne ispravljače koji su prikazani na slikama 1.6 i 1.7.

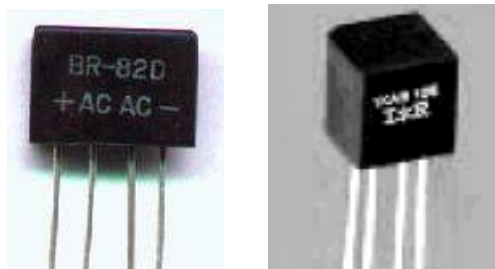
Tablica 1.2: Karakteristične veličine poluvalnoga ispravljača

C [μF]	bez	100
U_{ef} [V]	12	
U_{DC} [V]	5,4	14,5
U_{DC}/U_{ef}	0,45	1,21
$U_{rip_{pp}}$ [V]	16,22	3,38
f_{rip} [Hz]	50	

1.2.2. Punovalni ispravljač

Punovalni ispravljač (eng. *full-wave rectifier*) predstavlja poboljšanje u odnosu na poluvalni ispravljač i pokazuje znatno bolja svojstva. Postoje dvije osnovne izvedbe punovalnog ispravljača:

- spojevi s dvjema diodama
- mosni ili Graetzov spoj, slika 1.8.



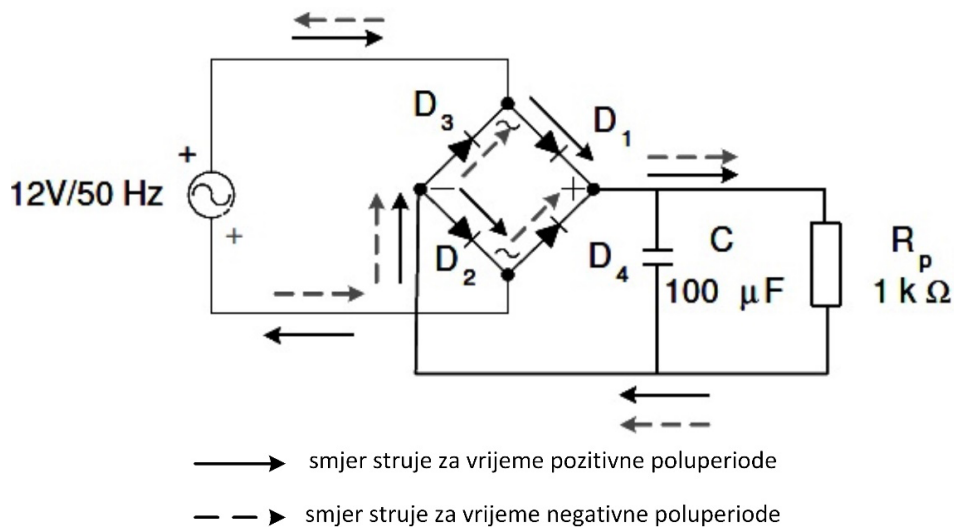
Slika 1.8: Izvedbe mosnih ispravljača [Izvor: autorski rad]

Srednja komponenta ispravljenoga napona (istosmjerna komponenta) za punovalni ispravljač uz zanemariv pad napona na diodama može se izračunati iz izraza:

$$U_{PSr} = U_{DC} = \frac{2 \cdot U_m}{\pi} = 0,9 \cdot U_{ef}.$$

Jednadžba 1.6: Istosmjerna vrijednost ispravljenog napona punovalnog ispravljača

Na slici 1.9 prikazan je ispravljač s diodnim mostom, što se često naziva Graetzovim spojem. Kada je na ulazu pozitivna poluperioda napona, tada su propusno polarizirane diode D_1 i D_2 , dok su za vrijeme negativne poluperiode propusno polarizirane diode D_3 i D_4 , što znači da za obje poluperiode kroz potrošač teče struja u istome smjeru. Struju potrošaču daje nabijeni kondenzator. To znači da treba primijeniti kondenzatore velikog kapaciteta kako bi se smanjio pad napona na kondenzatoru i time poboljšao izlazni istosmjerni napon. Iznos napona valovanja sada se može izračunati pomoću jednadžbe 1.5. Frekvencija valovanja f_{rip} za punovalni ispravljač jednaka je 100 Hz.



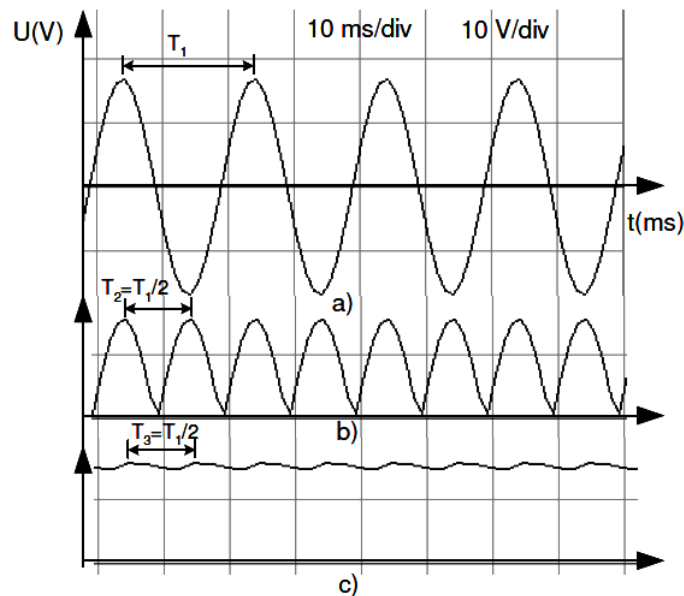
Slika 1.9: Punovalni ispravljač [Izvor: autorski rad]

Karakteristične veličine punovalnoga ispravljača prikazanog na slici 1.9. dane su u tablici 1.3.

Tablica 1.3: Karakteristične veličine punovalnoga ispravljača

$C [\mu\text{F}]$	bez	100
$U_{ef} [\text{V}]$	12	
$U_{DC} [\text{V}]$	10,8	14,6
U_{DC}/U_{ef}	0,9	1,22
$U_{ripp} [\text{V}]$	15,52	1,552
$f_{rip} [\text{Hz}]$	100	

Valni oblici u punovalnog ispravljača prikazani su na slici 1.9.



Slika 1.10: Valni oblici: a) ulazni napon, b) ispravljeni napon bez c, c) ispravljeni napon s c

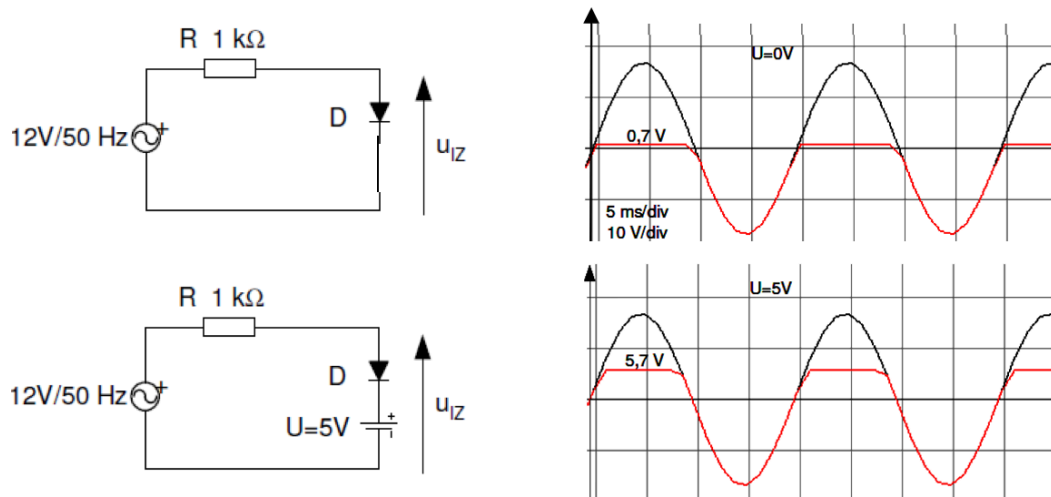
1.2.3. Diodni ograničavači

U mnogim primjenama često je potrebno ograničiti porast napona iznad određene vrijednosti. U te svrhe koriste se ograničavači napona (eng. *clipping circuits, clippers, limiters*). Spoj diode i otpornika koji ograničava porast izlaznoga napona tijekom pozitivne poluperiode prikazan je na slici 1.11. Ovaj spoj naziva se paralelni ograničavač zbog toga što je dioda spojena paralelno s izlazom. Ulazni napon prenosi se na izlaz kada je dioda nepropusno polarizirana (nije vodljiva) kod ove vrste ograničavača. Na izlazu sklopa napon je $U_\gamma = 0,7 \text{ V}$, kada je dioda propusno polarizirana. U seriju s diodom dodaje se izvor napona U (u našem slučaju $U = 5 \text{ V}$) ako se želi ograničiti porast izlaznog napona na neku vrijednost veću od U_γ .

Izlazni napon može se izračunati iz jednadžbe:

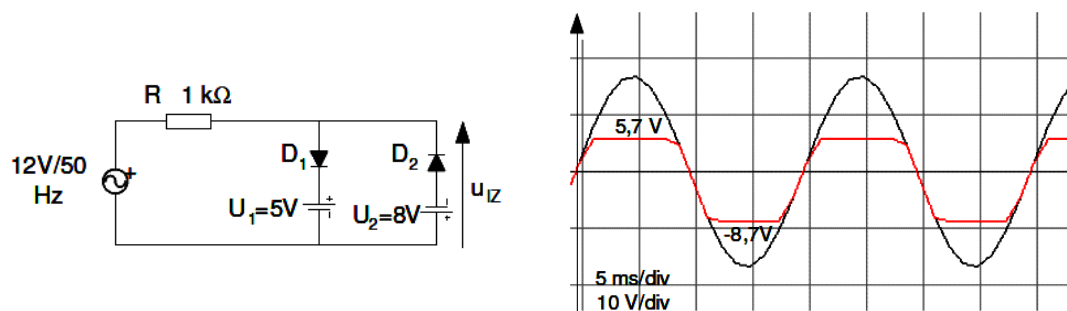
$$U_{iz} = U_{\gamma} + U = 0,7 + 5 = 5,7V.$$

Jednadžba 1.7: Izlazni napon jednostranog paralelnog diodnog ograničavača



Slika 1.11: Jednostrani paralelni diodni ograničavač [Izvor: autorski rad]

Dvostrani paralelni ograničavači upotrebljavaju se kada je potrebno ograničiti izlazni napon na dvije razine, kao što je prikazano na slici 1.12.



Slika 1.12: Dvostrani paralelni diodni ograničavač [Izvor: autorski rad]

Kada je na ulazu pozitivna poluperioda napona, izlazni napon slijedi ulazni sve dok dioda D_1 ne provede. Kada D_1 provede, tada je na izlazu napon:

$$U_{iz} = U_{\gamma} + U_1 = 0,7 + 5 = 5,7 V.$$

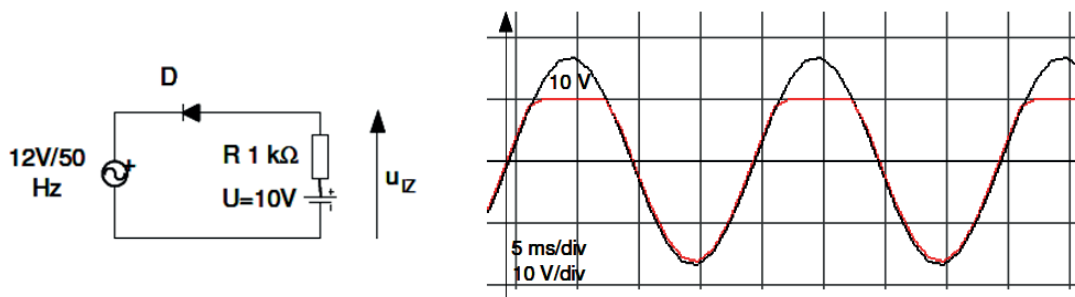
Jednadžba 1.8: Izlazni napon dvostranog paralelnog diodnog ograničavača kada vodi D_1

Na izlazu je ova vrijednost napona sve dok ulazni napon ne padne ispod ove vrijednosti. Kada napon na izlazu padne ispod vrijednosti 5,7 V, izlazni napon ponovno slijedi ulazni napon. Za vrijeme negativne poluperiode, sve dok D_2 se ne provede, na izlazu je napon:

$$U_{iz} = -U_\gamma - U_2 = -0,7 - 8 = -8,7 V.$$

Jednadžba 1.9: Izlazni napon dvostranog paralelnog diodnog ograničavača kada vodi D_2

Kada ulazni napon padne ispod 8,7 V (po svome apsolutnom iznosu), izlazni napon ponovno slijedi ulazni. Na slici 1.13 prikazan je serijski ograničavač s kojim možemo postići isti učinak kao i s paralelnim.

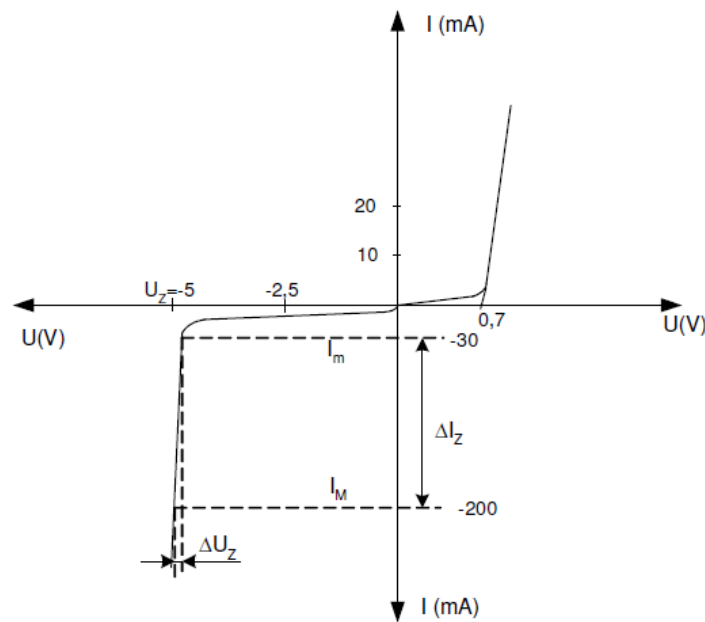


Slika 1.13: Serijski diodni ograničavač [Izvor: autorski rad]

Izlazni napon slijedi ulazni sve dok vodi dioda, a kada dioda prestane voditi, na izlazu je napon $U = 10 V$ istosmjernog izvora. Kod serijskog diodnog ograničava izlazni se napon ograničava točno na vrijednost naponskog izvora U , jer u ovom slučaju na njega ne utječe pad napona na diodi.

1.3. Zenerova dioda

Kada se napon nepropusne polarizacije prekorači, dolazi do probojnog ili Zenerova efekta. U tom trenutku struja kroz diodu počinje značajno rasti, a napon na diodi ostaje stalan, slika 1.14. Ova karakteristika omogućuje Zenerovim diodama da djeluju kao vrlo precizne naponske reference u električnim krugovima. Vrijednost probojnog napona U_z određena je konstrukcijom i materijalima Zenerove diode te se navodi u tehničkim specifikacijama za određenu diodu. Primjene Zenerovih dioda uključuju stabilizaciju napona u izvorima napajanja, regulatorima napona i drugim uređajima gdje je potrebno održavati stalan napon unatoč promjenama napona na ulazu.

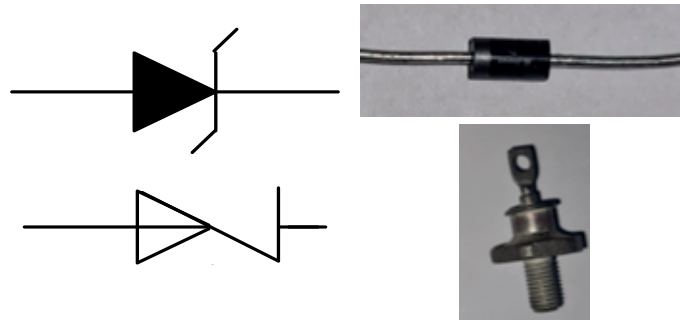


Slika 1.14: Strujno-naponska karakteristika Zenerove diode [Izvor: autorski rad]

Ključne karakteristike Zenerove diode su:

1. **Strujno-naponska karakteristika:** u području propusne polarizacije strujno-naponska karakteristika Zenerovih dioda ne razlikuje se značajno od karakteristike obične PN ispravljačke diode. Međutim, u području nepropusne polarizacije Zenerove diode pokazuju svoj specifični probojni efekt.
2. **Probojni napon:** probojni napon Zenerovih dioda vrijednost je napona pri kojoj dolazi do probojnog efekta. Ove diode namijenjene su za rad u području probojnog napona i obično imaju probojne naponske vrijednosti u rasponu od nekoliko volta do nekoliko stotina volta, ovisno o specifičnoj Zenerovoj diodi. Važno je napomenuti da diode s nižim probojnim naponima često nemaju jasno izražen probojni napon i mogu pokazivati negativan temperaturni koeficijent, što znači da se probojni napon smanjuje s porastom temperature.
3. **Ograničenje struje:** kako bi se spriječilo uništenje Zenerove diode nakon što dođe do proboja, koristiti se vanjski otpor za ograničenje struje kroz diodu na određenu dozvoljenu vrijednost.

Diode s probojnim naponom manjim od 5 V nemaju jasno izražen probojni napon i imaju negativan temperaturni koeficijent, što znači da s porastom temperature njihov Zenerov napon opada. Nasuprot tome, diode s probojnim naponom $U_z > 5$ obično imaju pozitivan temperaturni koeficijent, što znači da s porastom temperature raste Zenerov napon. Simboli i prikaz izvedbe Zenerove diode prikazani su na slici 1.15.



Slika 1.15: Simboli i primjeri izvedbe Zenerovih dioda [Izvor: autorski rad]

Sljedećom jednadžbom definiran je temperaturni koeficijent Zenerove diode:

$$\alpha_Z = \frac{\Delta U_Z}{U_Z} \cdot \frac{1}{\Delta T}$$

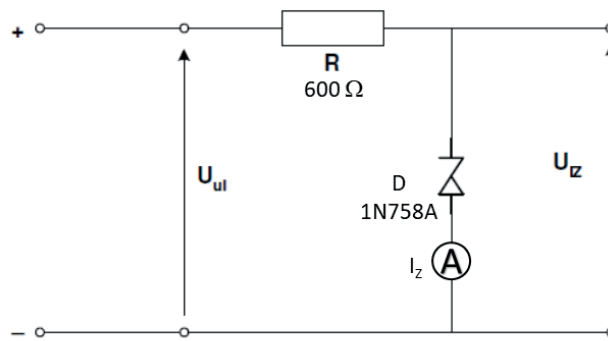
Jednadžba 1.10: Temperaturni koeficijent Zenerove diode

Temperaturni koeficijent α_Z ima tipične vrijednosti reda veličine $10^{-4}/^{\circ}\text{C}$. Dinamički otpor ili Zenerov otpor definiran je omjerom između promjene Zenerovog napona i struje, i dan je jednadžbom:

$$r_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$$

Jednadžba 1.11: Dinamički otpor Zenerove diode

Diode s probojnim naponom od 5 do 6 V imaju najmanji iznos vrijednosti Zenerovog otpora koja je oko 10Ω . Zenerov otpor naglo raste kod dioda s višim probojnim naponom. Zenerove diode upotrebljavaju se kao stabilizatori i ograničavači napona. Prilikom odabira Zenerove diode važno je voditi računa o najvećoj dopuštenoj struji diode u Zenerovu području (označeno kao I_M na slici 1.14) i o dopuštenom utrošku snage, koji se kreće od nekoliko stotina mW do nekoliko desetaka W. Na slici 1.16 prikazana je primjena Zenerove diode kao stabilizatora napona.



Slika 1.16: Stabilizator napona [Izvor: autorski rad]

U tablici 1.4. dane su vrijednosti izlaznog napona i struje kroz Zenerovu diodu u ovisnosti o promjenama ulaznog napona. Za promjene ulaznog napona u rasponu od 9 V do 14 V izlazni se napon vrlo malo mijenja i možemo ga smatrati stalnim.

Tablica 1.4: Ovisnost izlaznog napona i struje kroz Zenerovu diodu o promjeni ulaznog napona

U_{ul} [V]	9	10	10,5	11	12	13	14
U_{iz} [V]	9	9,87	9,91	9,93	9,95	9,96	9,97
I_z [mA]	0	0,2	0,97	1,78	3,41	5,1	6,72

Izlazni napon stabilizatora sa Zenerovom diodom možemo izračunati pomoću sljedeće jednadžbe:

$$U_{IZ} = U_{IZ} - I_z \cdot R \approx U_z.$$

Jednadžba 1.12: Izlazni napon stabilizatora

1.4. Kapacitivna dioda

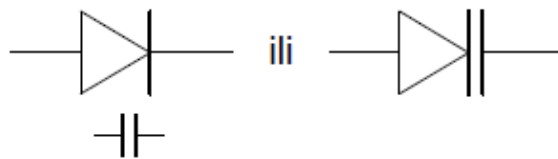
Svaki PN prijelaz (PN spoj) u poluvodičkoj diodi posjeduje kapacitivnost. Kapacitivnost se odnosi na sposobnost akumuliranja električnog naboja i formiranje električnog polja u određenom dijelu poluvodičke strukture. U slučaju PN prijelaza u diodi postoje sljedeće kapacitivnosti:

1. **Zaporna kapacitivnost** (eng. *depletion capacitance*): ova se kapacitivnost pojavljuje kada je dioda polarizirana nepropusno. U tom se slučaju PN prijelaz širi, stvarajući područje prostornog naboja ili PN barijere. Ovo područje akumulira naboje i formira

električno polje. Kapacitivnost se javlja zbog ove akumulacije naboja i određuje koliko se brzo *PN* barijera može širiti ili sužavati.

2. **Difuzijska kapacitivnost** (eng. *diffusion capacitance*): ova se kapacitivnost javlja kada je dioda polarizirana propusno. U ovom slučaju elektroni i šupljine difundiraju preko *PN* prijelaza. Difuzija elektrona i šupljina stvara privremeno električno polje, što rezultira difuzijskom kapacitivnošću.

Kapacitivna dioda često se koristi u komunikacijskim uređajima u visokofrekvencijskom području. Za analizu i projektiranje takvih dioda važno je razumjeti i uzeti u obzir oba tipa kapacitivnosti jer će njihova vrijednost i promjena ovisiti o polarizaciji diode. Simboli kapacitivnih dioda koji se koriste u električkim shemama prikazani su na slici 1.17.



Slika 1.17: Simboli kapacitivne diode [Izvor: autorski rad]

Različiti proizvođači nazivaju ove diode i varicap-diodama ili varaktorima. Kod ovih dioda kontinuirano se mijenja kapacitet, ovisno o primijenjenom naponu, pa se često koriste kao promjenjivi kondenzatori bez pomičnih mehaničkih dijelova.

Čitav prostor *PN* barijere posjeduje karakteristike dielektrika na koji se s obje strane nastavljaju relativno dobro vodljiva neutralna *p* i *n* područja. Na ovaj način formirana je struktura sa svojstvom kapaciteta slično onome kod pločastoga kondenzatora. Kada se *PN* spoj polarizira nepropusno, područje barijere širine d_B povećava se, čime se mijenja i iznos barijernoga kapaciteta. Kapacitet prijelaznoga područja C_T , odnosno barijerni kapacitet, može se općenito izraziti jednažbom koja se primjenjuje za izračun kapaciteta pločastoga kondenzatora:

$$C_T = \frac{\varepsilon \cdot S}{d_B},$$

Jednadžba 1.13: Zaporna kapacitivnost

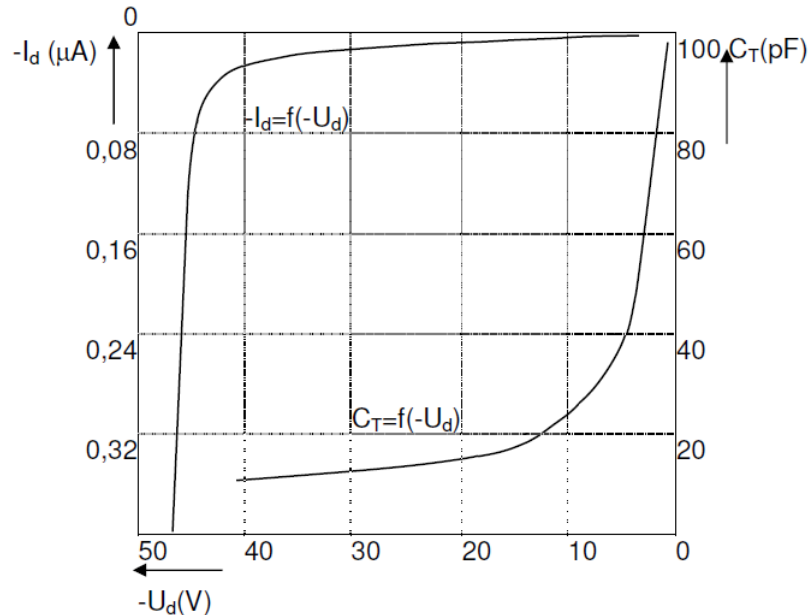
gdje su:

ε – dielektrična konstanta

S – površina poprečnoga presjeka

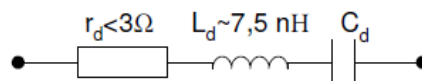
d_B – širina *PN* barijere analogna udaljenosti među pločicama kondenzatora.

Porastom napona nepropusne polarizacije slobodni nositelji naboja još se više udaljavaju od granične ravnine PN spoja, što rezultira povećanjem širine barijere i smanjenjem kapaciteta C_T . Karakteristike kapacitivne diode prikazane su na slici 1.18.



Slika 1.18: Ovisnost struje i kapaciteta o zapornome naponu [Izvor: autorski rad]

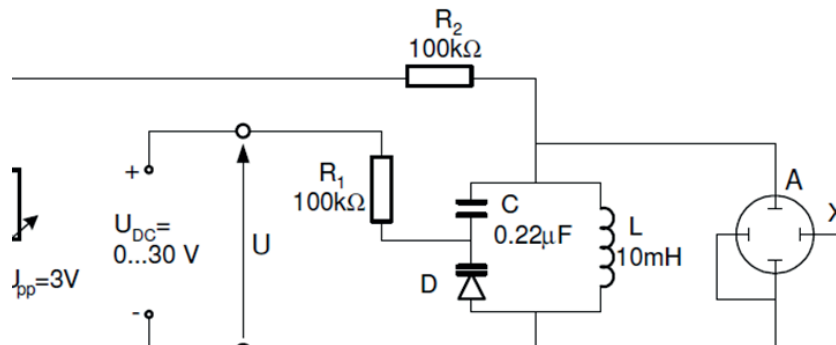
Promjenom napona nepropusne polarizacije od -40 V do -1 V primjećujemo da se kapacitet mijenja od 15 pF do 100 pF. Na istom dijagramu prikazana je i strujna karakteristika koja predstavlja poznatu struju zasićenja uzrokovanu toplinskom generacijom nositelja naboja. Važno je napomenuti da kondenzator nije idealan jer posjeduje određenu vodljivost. Smanjenje ove vodljivosti postiže se upotrebom silicija za izradu kapacitivnih dioda, što rezultira veoma malom strujom zasićenja. Nadomjesna shema kapacitivne diode za visoke frekvencije prikazana je na slici 1.19.



Slika 1.19: Nadomjesna shema kapacitivne diode za visoke frekvencije [Izvor: autorski rad]

Na visokim frekvencijama (više od 100 MHz) paraziti inuktivitet L_d dovoda postaje značajan (reda veličine nano-henrija). Uz to, u seriji se nalazi i otpor r_d , koji čine otpor dovodnih žica i otpor kristala silicija. Ovaj spoj uzrokuje gubitke jer je kapacitivna dioda obično povezana u visokofrekvencijskom titrajnom krugu. Ovi gubici mogu se smanjiti ako se u seriju ili paralelno s kapacitivnom diodom priključi visokokvalitetan kondenzator sa zanemarivom kutom gubitaka. Osim toga, kapacitivnost se znatno mijenja zbog odstupanja prilikom proizvodnje i ovisnosti o temperaturi kapacitivne diode. Međutim, to obično nije

veliki problem, jer krivulja $C_d = f(-U_d)$ zadržava logaritamski karakter i potrebno je samo namjestiti nominalnu vrijednost istosmjernoga napona. Glavna područja primjene kapacitivnih dioda su: automatsko ugađanje oštine kod TV-prijemnika i radioprijemnika, generiranje frekvencijsko-moduliranih signala, promjenljivi R - C i L - C filtri, umnažanje i dijeljenje frekvencije te impulsni sklopovi. Na slici 1.20 prikazan je paralelni rezonantni krug s kapacitivnom diodom. Istosmjerni napon preko otpornika R_1 dovodi se na kapacitivnu diodu tako da je ona nepropusno polarizirana.



Slika 1.20: Rezonantni krug s kapacitivnom diodom [Izvor: autorski rad]

Frekvencija izmjeničnog generatora mijenja se dok se ne ugotovi na rezonantnu frekvenciju kruga. Rezonantna frekvencija paralelnog titrajnog kruga ona je frekvencija kod koje je napon na zaslonu osciloskopa u najvećoj mjeri (kanal A). Ukupni kapacitet titrajnog kruga C_{uk} ovisi o rezonantnoj frekvenciji f_r i induktivitetu zavojnice L te se može izraziti jednadžbom:

$$C_{uk} = \frac{1}{(2\pi \cdot f_r)^2 \cdot L}$$

Jednadžba 1.14: Kapacitet titrajnog kruga

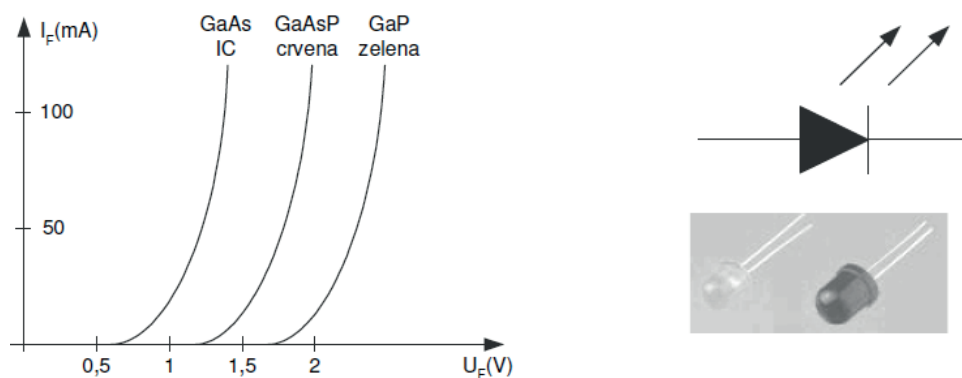
1.5. Led, svjetleća dioda

Svjetleće diode, LED (eng. *light emitting diode*), poluvodički su uređaji koji emitiraju svjetlost kada električna struja prolazi kroz njih. Ova emisija svjetlosti rezultat je procesa rekombinacije elektrona i šupljina unutar poluvodičkog materijala. Boja emitirane svjetlosti ovisi o energetskej razlici između valentnog i vodljivog pojasa unutar poluvodiča. Kako bi se postigla različita boja svjetlosti, koriste se različiti poluvodički materijali i primjese. Evo nekoliko primjera izvedbi LED-a, svjetlećih dioda:

1. **Crvene:** obično se koristi materijal poput aluminij-galij-arsenida (AlGaAs) ili galij-arsenida-fosfida (GaAsP). Emitiraju svjetlost u crvenom dijelu elektromagnetskog spektra.

2. **Žute i narančaste:** također se koristi AlGaAs ili GaAsP, s određenim varijacijama u materijalu i primjesama, kako bi se postigle žute i narančaste boje.
3. **Zelene:** za zelenu svjetlost često se koristi galij-fosfid (GaP) sa specifičnim primjesama kako bi se postigla zelena boja.
4. **Plave:** plava svjetlost emitira se korištenjem materijala kao što je galij-nitrid (GaN), s primjesama indija i drugih materijala.

Boja svjetlosti također ovisi o energetske širini zabranjene zone u poluvodičkom materijalu. Šira energetska zona rezultira svjetlošću niže frekvencije (crvena), dok uža zona rezultira svjetlošću više frekvencije (plava). Različite tehnologije omogućuju proizvodnju različitih vrsta LED-a, uključujući svjetleće trake, površinske montažne LED-ove (SMD LED) i druge oblike koji se koriste u raznim primjenama kao izvor svjetlosti, slika 1.21.



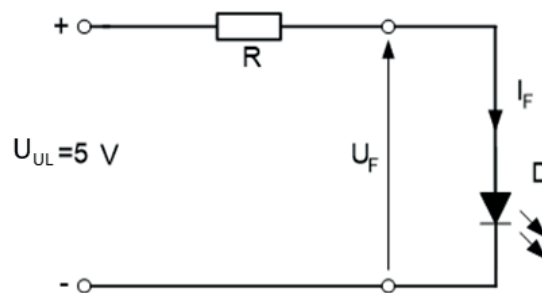
Slika 1.21: Strujno-naponske karakteristike, simbol i primjer izvedbi LED-a [Izvor: autorski rad]

Karakteristike LED-a ključne su za razumijevanje i pravilno upravljanje ovim elektroničkim komponentama, a najvažnije su sljedeće:

1. **Dopušteni reverzni napon** (eng. *reverse voltage*) U_R : to je najveći iznos napona nepropusne polarizacije koji LED može podnijeti prije nego što dođe do probijanja. Ovaj napon obično iznosi nekoliko volti.
2. **Dopuštena struja pri propusnoj polarizaciji** (eng. *forward DC current*) I_F : to je najveći iznos struje koja smije prolaziti kroz LED kad je polarizirana propusno. Ova struja može doseći nekoliko stotina mA.
3. **Dopušteni utrošak snage** (eng. *power dissipation*) P_{tot} : to je ukupna snaga koju LED može konzumirati pri radu. Obično se izražava u mW (milivatima) i može doseći nekoliko vata.
4. **Jakost svjetlosti** (eng. *axial luminous intensity*) I_0 ili I_V : izražava se u kandelama cd uz određenu struju propusne polarizacije ili svjetlosni tok izražen u mW, odnosno lumenima lm.

5. **Pad napona na diodi pri propusnoj polarizaciji** (eng. *forward voltage*) U_F : vrijednost napona U_F ovisi o struji koja prolazi kroz diodu i boji svjetlosti koju emitira, a obično se kreće između 1,3 V i 2 V.
6. **Valna dužina svjetlosti** (eng. *wavelength*): Ovo je valna dužina svjetlosti koju LED emitira pri najvećoj emisiji. To određuje boju svjetlosti koju dioda emitira.
7. **Vrijeme uključivanja i isključivanja**: LED-ovi su brze komponente s vremenima odziva obično u rasponu od nekoliko desetaka do nekoliko stotina nanosekundi. To znači da se brzo mogu uključiti ili isključiti kad se na njih primijeni električna struja.

LED-ovi se primjenjuju kao signalni i kontrolni elementi te kao izvori svjetlosti u komunikacijskim uređajima. Vrijednost struje kroz diodu ograničava se pomoću otpornika R , kao što je prikazano na slici 1.22. Napon U_F predstavlja napon koljena na strujno-naponskoj karakteristici diode U_γ i ovisi o vrsti diode.



Slika 1.22: Ograničavanje struje kroz LED [Izvor: autorski rad]

Primjerice, ako se na slici 1.22 želi ograničiti vrijednost struje I_F kroz diodu na 20 mA, a napon koljena U_γ iznosi 1,7 V, tada će vrijednost otpornika R iznositi:

$$R = \frac{U_{UL} - U_\gamma}{I_F} = \frac{5\text{ V} - 1,7\text{ V}}{20\text{ mA}} = 165\ \Omega.$$

Jednadžba 1.1.15: Računanje vrijednosti otpornika za ograničavanje struje kroz LED

1.6. Fotodioda

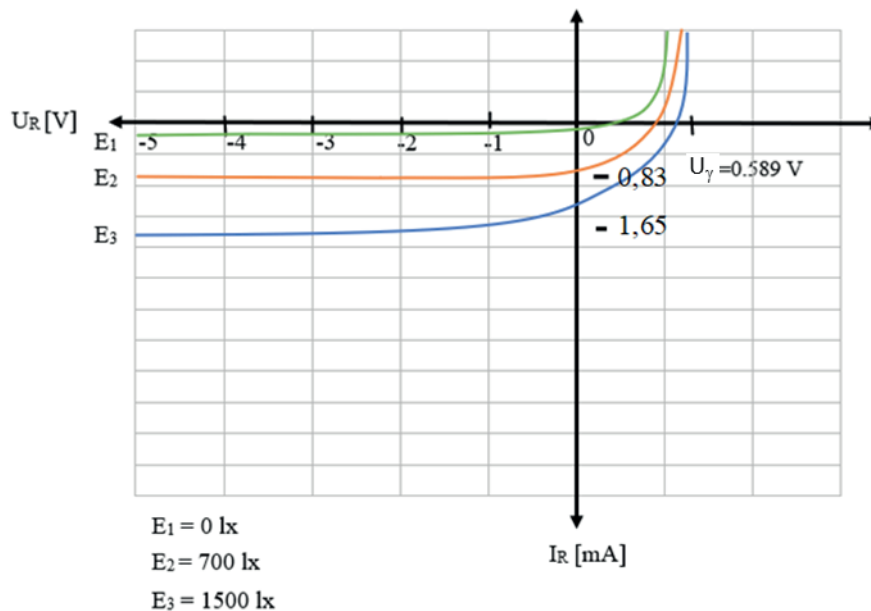
Fotodioda je poluvodički element koji je osjetljiv na svjetlost. Na kućištu se nalazi otvor za osvjetljenje PN spoja. Najčešće se koriste PIN fotodiode ili APD (eng. *avalanche*) fotodiode. Fotodiode rade u području valnih duljina od 190 do 1100 nm. Kod PIN dioda za povećavanje efikasnosti fotodetektora između n - i p - tipa poluvodiča unosi se blago dopirani intrisični sloj. Širina intrisičnog sloja veća je od širine n - i p - sloja, što povećava efikasnost, ali i vrijeme odgovora (eng. *response time*) fotodiode. PIN diode češće se koriste zbog niže

cijene, velike tolerancije na promjene temperature, većeg aktivnog područja i prikladnije su za aplikacije u kojima je prisutan veliki šum. S druge strane, APD fotodiode imaju veću osjetljivost i kraće vrijeme odgovora, čime se povećava komunikacijska brzina. Na slici 1.23 prikazan je simbol i primjer izvedbe fotodiode.

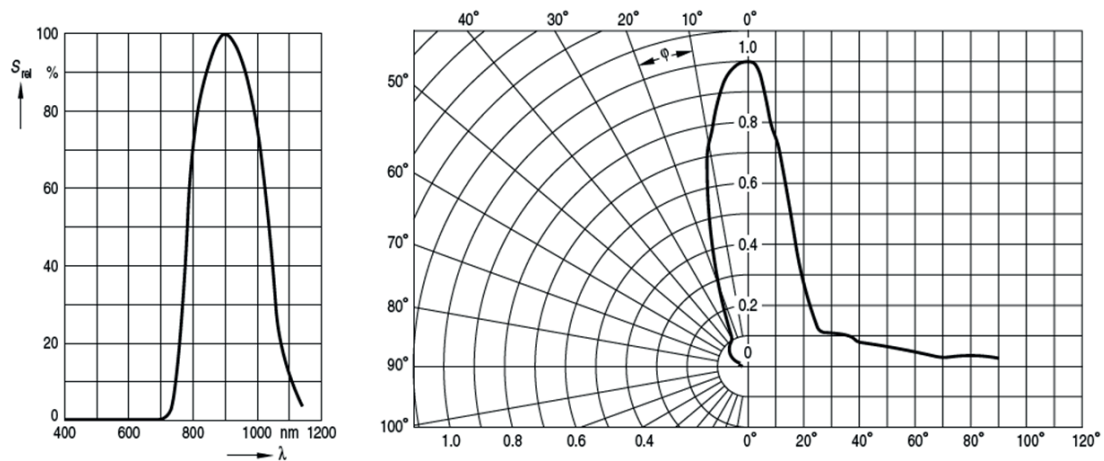


Slika 1.23: Simbol i primjer izvedbe fotodiode [Izvor: autorski rad]

Fotodiode se u strujni krug spaja tako da je zaporno polarizirana. Kada je fotodiode neosvijetljena, njome teče vrlo mala „tamna“ struja (eng. *dark current*) koju čini reverzna struja manjinskih nosilaca naboja. Za silicijske fotodiode tamna struja iznosi nekoliko nanoampera, a za germanijske nekoliko mikroampera. Do znatnog porasta reverzne struje fotodiode dolazi kada se ona osvijetli i porast je struje proporcionalan osvijetljenošću fotodiode. Na slici 1.24 prikazana je strujno-naponska karakteristika fotodiode u ovisnosti o osvijetljenju i priključenom reverznom naponu. Na jakost struje također utječe valna duljina svjetlosti kojom je osvijetljena fotodiode, što predstavlja relativnu spektralnu osjetljivost $S(\%)$ i kutnu osjetljivost, ovisno pod kojim kutom pada svjetlost na fotodiode, slika 1.25.

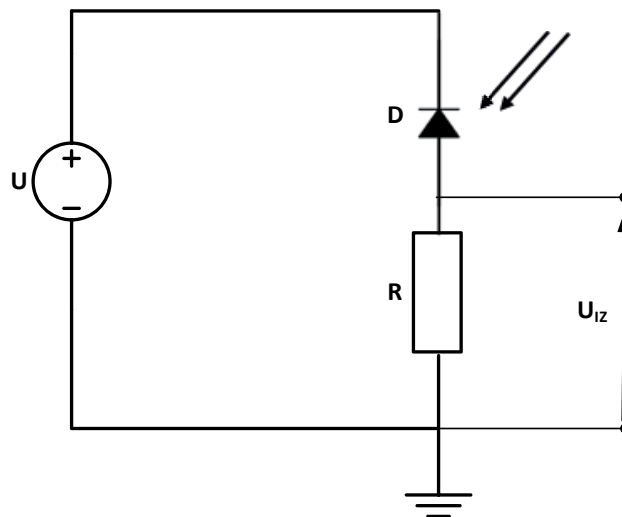


Slika 1.24: Strujno-naponska karakteristika fotodiode [Izvor: autorski rad]



Slika 1.25: Spektralna i kutna osjetljivost fotodiode (Izvor: OSRAM, SFH 2505 FA, 2022)

Fotodioda se može koristiti za uključivanje tranzistorskih sklopki, u fotoveznim elementima (eng. *optocoupler*), u komunikacijskim sustavima za prijem svjetlosnog signala. Na slici 1.26 prikazan je strujni krug za prijem svjetlosnog signala pomoću fotodiode. Kod primjene fotodiode bitno je voditi računa i o dopuštenom naponu reverzne polarizacije koji se smije priključiti te dopuštenom utrošku snage.

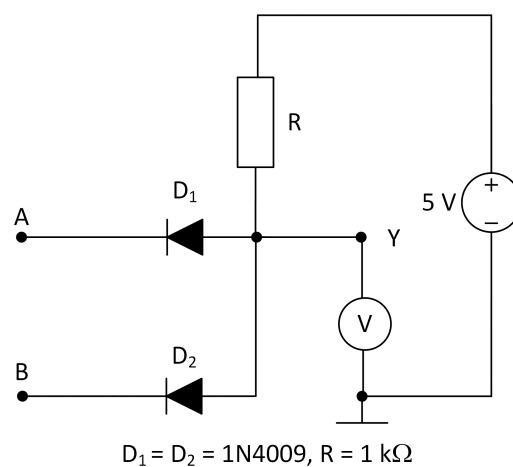


Slika 1.26: Fotodioda kao svjetlosni prijemnik [Izvor: autorski rad]

1.7. Diodna tehnika

1.7.1. Sklop „I” u diodnoj tehnici

Na slici 1.27 prikazan je logički I sklop realiziran u diodnoj tehnici, a u tablici 1.5 naponska stanja. Ako se na oba ulaza sklopa dovede napon od 0 V, obje su diode propusno polarizirane i na izlazu imamo mali pad napona na diodi oko 0,67 V. Ovo stanje na izlazu odgovara logičkoj 0 i ostaje na izlazu sklopa sve dok je na jedan od ulaza doveden napon od 0 V. Kada se na oba ulaza dovede napon od 5 V, obje diode postaju nepropusno polarizirane i na izlazu imamo napon od 5 V, što odgovara logičkoj 1.



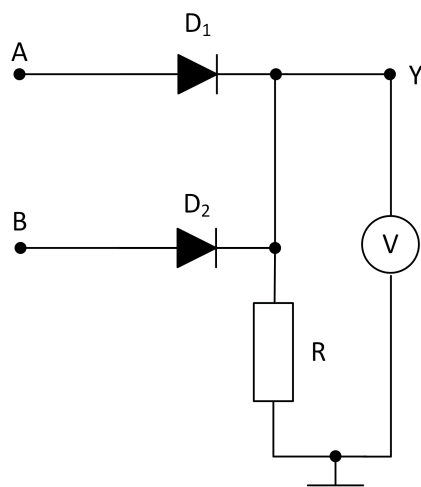
Slika 1.27: Logički I sklop realiziran u diodnoj tehnici [Izvor: autorski rad]

Tablica 1.5: Naponska stanja I sklopa

A (V)	B (V)	Y (V)
0	0	0,67
0	5	0,67
5	0	0,67
5	5	5

1.7.1. Sklop „ILI” u diodnoj tehnici

Na slici 1.28 prikazan je logički ILI sklop realiziran u diodnoj tehnici, a u tablici 1.6 naponska stanja. Ako se na oba ulaza sklopa dovede napon od 0 V, obje su diode nepropusno polarizirane i kroz otpornik R ne teče struja te na izlazu imamo 0 V, što odgovara logičkoj 0. Kada je barem na jednom ulazu napon od 5 V, ta će dioda postati propusno polarizirana i na izlazu imamo napon oko 4,33 V, što odgovara logičkoj 1.



$D_1 = D_2 = 1N4009, R = 1 \text{ k}\Omega$

Slika 1.28: Logički ILI sklop u diodnoj tehnici [Izvor: autorski rad]

Tablica 1.6: Naponska stanja ILI sklopa

A (V)	B (V)	Y (V)
0	0	0
0	5	4,33
5	0	4,33
5	5	4,33

2

POGLAVLJE

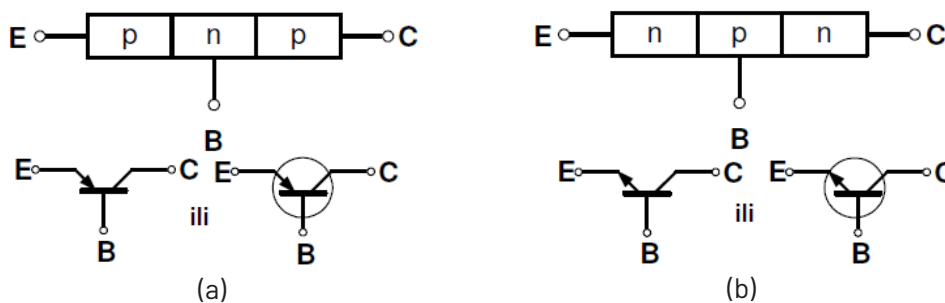
OSNOVNI SKLOPOVI S TRANZISTORIMA

Nakon ovog poglavlja moći ćete:

- objasniti osnovne fizikalne principe koji se odnose na rad bipolarnih i unipolarnih tranzistora
- analizirati osnovne spojeve i područja rada tranzistora
- interpretirati snimljene statičke karakteristike i ograničenja u radu tranzistora
- objasniti moguće primjene tranzistora.

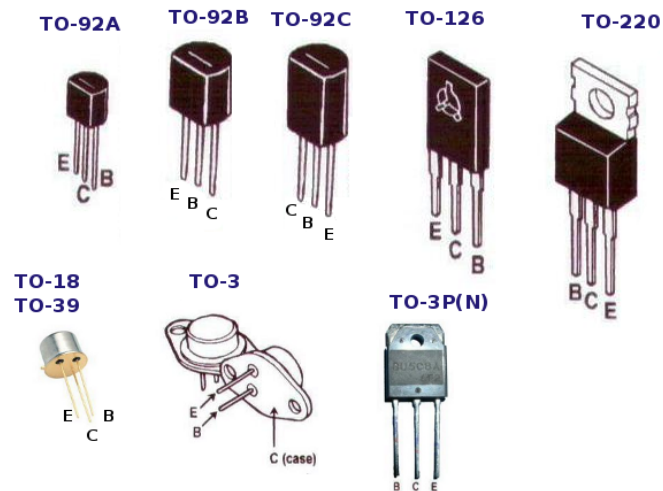
2.1. Bipolarni tranzistor

Tranzistor je aktivni elektronički poluvodički uređaj s glavnim funkcijama pojačavanja signala i generiranja različitih vremenskih oblika. Razvoj tranzistora započeo je 1949. godine kada je Shockley postavio temelje za rad spojnih tranzistora koji se mogu podijeliti na pnp ili npn tipove. Bipolarni tranzistor, kao jedna od važnih vrsta tranzistora, sastoji se od triju elektroda i izrađen je kombinacijom poluvodičkih materijala tipa p i n. Konceptualno, bipolarni tranzistor može se zamisliti kao struktura koja se sastoji od dvaju PN spojeva, tj. kao poluvodička jedinica pnp ili npn tipa. U ovoj strukturi, središnji se sloj naziva bazom (B), dok su druga dva sloja emiter (E) i kolektor (C). Ovu strukturu možete vidjeti na slici 2.1.



Slika 2.1: Građa i simboli bipolarnih tranzistora: a) pnp b) npn [Izvor: autorski rad]

Danas prevladava difuzijsko-planarni tehnološki proces proizvodnje bipolarnih tranzistora, bez obzira jesu li oni samostalne komponente (diskretni tranzistori) ili integrirane komponente unutar monolitnih integriranih krugova (integrirani tranzistori). Primjerice, prilikom izrade diskretnog npn tranzistora prvo se na snažno dopiranu podlogu n-tipa nanosi tanki sloj n-tipa epitaksijalnog materijala debljine između 5 i 15 μm , koji će služiti kao kolektor tranzistora. Nakon toga provodi se difuzija akceptorskih primjesa u epitaksijalni sloj kako bi se formirala baza tranzistora, odnosno PN spoj između baze i kolektora. Zatim se donorske primjese difuziraju u bazu s još većom koncentracijom kako bi se formiralo područje emitera, odnosno PN spoj između emitera i baze. Na slici 2.2 prikazane su različite vrste kućišta (pakiranja) i konfiguracije bipolarnih tranzistora.



Slika 2.2: Različite vrste kućišta i izvedbi bipolarnih tranzistora
(Izvor: <https://www.electrostudy.com/2012/05/transistors-package-to-transistor.html>)

2.1.1. Princip i područje rada bipolarnih tranzistora

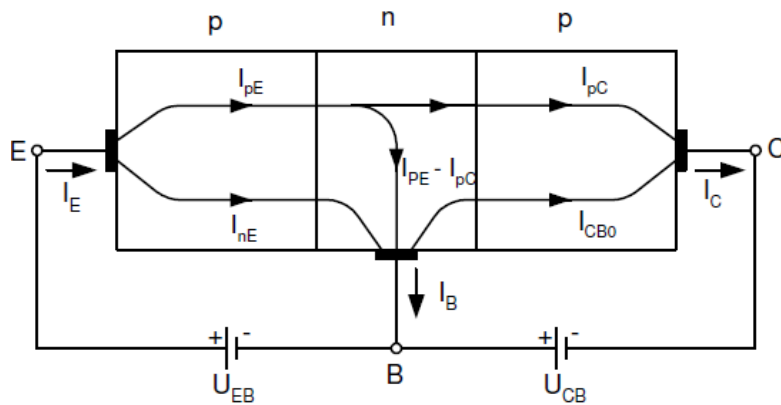
Princip rada bipolarnih tranzistora temelji se na procesu ubrizgavanja slobodnih nosilaca iz emitera u bazu, njihovom transportu kroz izuzetno usko područje baze i sakupljanju na kolektoru. Ključna karakteristika tranzistora prisutnost je obaju tipova nosilaca, i većinskih i manjinskih, stoga se ova komponenta naziva bipolarnim tranzistorom. On se koristi na dva glavna načina:

1. kao linearno pojačalo napona ili struje
2. kao nelinearni prekidač, tada djeluje kao sklopka.

Bipolarni tranzistor može djelovati u četiri različita područja rada, ovisno o polarizaciji spojeva emiter-baza i kolektor-baza:

1. **Normalno aktivno područje:** u ovom je području spoj emiter-baza polariziran propusno, dok je spoj kolektor-baza polariziran nepropusno.
2. **Područje zasićenja:** ovdje su oba spoja, emiter-baza i kolektor-baza, polarizirana propusno.
3. **Područje zapiranja:** u ovom su području oba spoja, emiter-baza i kolektor-baza, polarizirana nepropusno.
4. **Inverzno aktivno područje:** spojevi se ponašaju suprotno od normalnog aktivnog područja, spoj emiter-baza polariziran je nepropusno, dok je spoj kolektor-baza propusno. U ovom se slučaju elektroda kolektora koristi kao emiter.

Kada tranzistor djeluje kao pojačalo, nalazi se u normalnom aktivnom području. Međutim, kada se koristi kao sklopka, prebacuje se iz područja zasićenja u područje zapiranja, i obrnuto. Bipolarni tranzistor ima tri elektrode, što znači da ima tri elektrodne struje: struju emitera, struju baze i struju kolektora. Ove struje sastoje se od elektronskih i šupljinskih struja. Za pnp tranzistor, prikazan na slici 2.3, strelice označavaju stvarne smjerove struja koje odgovaraju gibanju pozitivnog naboja, tj. šupljina.



Slika 2.3: Struje normalno polariziranoga pnp tranzistora [Izvor: autorski rad]

U normalno polariziranom npn tranzistoru sve struje teku u suprotnom smjeru u odnosu na struje u pnp tranzistoru, a polaritet istosmjernih izvora suprotan je. Struja emitera u bipolarnom tranzistoru jednaka je zbroju struje kolektora i struje baze:

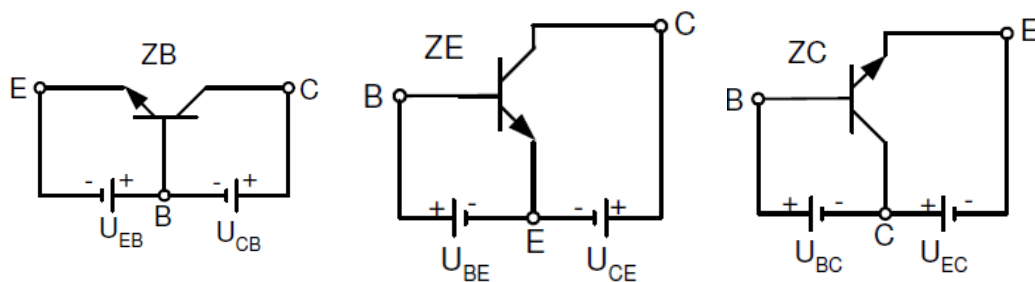
$$I_E = I_B + I_C.$$

Jednadžba 2.1: Odnos struja bipolarnog tranzistora

Bipolarni tranzistor može se koristiti u različitim elektroničkim sklopovima, a može raditi u sljedećim spojevima:

- **spoj zajedničke baze (ZB):** u ovom načinu rada baza je zajednička elektroda za ulazni i izlazni krug tranzistora
- **spoj zajedničkog emitera (ZE):** u ovom slučaju emiter je zajednička elektroda za ulazni i izlazni krug tranzistora
- **spoj zajedničkog kolektora (ZC):** kolektor je zajednička elektroda za ulazni i izlazni krug tranzistora.

Oznaka U_{CE} koristi se za označavanje napona između kolektora i emitera, pri čemu prvo slovo "E" označava da se radi o spoju zajedničkog emitera, slika 2.4.



Slika 2.4: Spojevi bipolarnog tranzistora [Izvor: autorski rad]

U katalogima proizvođača tranzistora često se pružaju ulazne i izlazne karakteristike za spoj zajedničkog emitera (ZE), ponekad i za spoj zajedničke baze (ZB). U spoju zajedničkog emitera, emiter je zajednička elektroda za ulazni i izlazni krug tranzistora. Statičke karakteristike tranzistora, pri danoj temperaturi, u potpunosti određuju međuodnose određenih struja i napona tranzistora, ovisno o tome koji se od navedenih osnovnih spojeva tranzistora koristi. Za spoj zajedničkog emitera važne statičke karakteristike uključuju:

- **struju baze (I_B):** struja koja teče u bazu tranzistora
- **struju kolektora (I_C):** struja koja teče kroz kolektor tranzistora
- **napon između baze i emitera (U_{BE}):** napon koji se primjenjuje između baze i emitera
- **napon između kolektora i emitera (U_{CE}):** napon koji se primjenjuje između kolektora i emitera.

Od dvanaest mogućih kombinacija statičkih karakteristika tranzistora, samo su četiri obično od značaja. Za spoj zajedničkog emitera te četiri familije statičkih karakteristika uključuju:

- a) ulazne karakteristike – struja I_B u funkciji ulaznog napona U_{BE} uz konstantan izlazni napon

$$U_{CE} \rightarrow I_B = f(U_{BE}) \Big|_{U_{CE} = konst.}$$

- b) izlazne karakteristike – struja I_C u funkciji izlaznog napona U_{CE} uz konstantnu ulaznu struju

$$I_B \rightarrow I_C = f(U_{CE}) \Big|_{I_B = konst.}$$

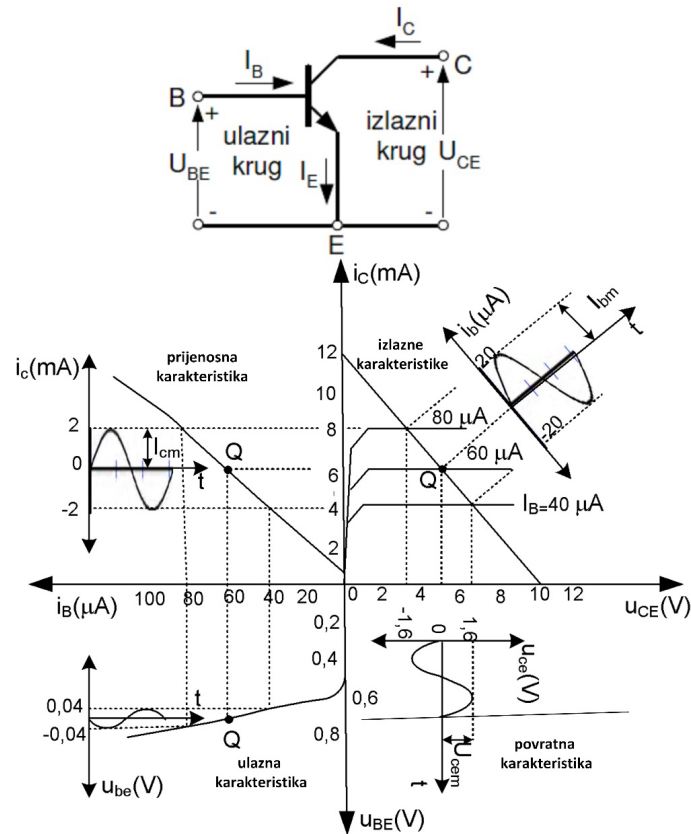
- c) prijenosne karakteristike – struja I_C u funkciji ulazne struje I_B uz konstantan izlazni napon

$$U_{CE} \rightarrow I_C = f(I_B) \Big|_{U_{CE} = konst.}$$

- d) povratne karakteristike – ulazni napon U_{BE} u funkciji izlaznog napona U_{CE} uz konstantnu ulaznu struju

$$I_B \rightarrow U_{BE} = f(U_{CE}) \Big|_{I_B = konst.}$$

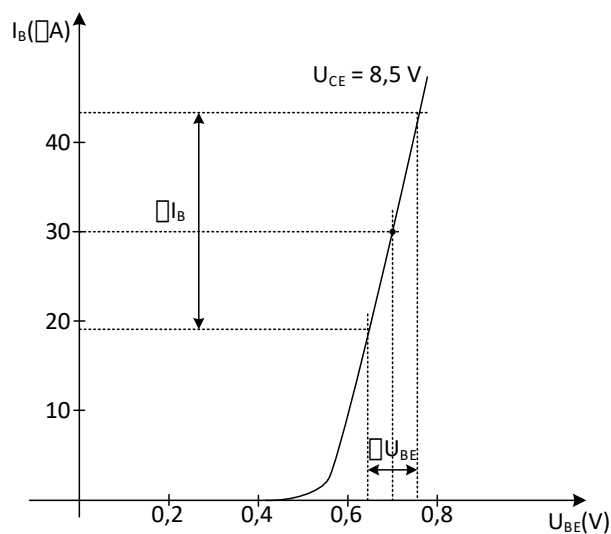
Na slici 2.5 prikazane su statičke karakteristike bipolarnog *npn* tranzistora u spoju zajedničkog emitera (ZE), zajedno s valnim oblicima napona i struje kada tranzistor radi kao pojačalo. Ove karakteristike pružaju informacije o odnosima struja i napona u tranzistoru te o njegovoj sposobnosti pojačavanja signala. Valni oblici napona i struje pomažu u vizualizaciji kako se tranzistor ponaša u stvarnim aplikacijama kao pojačalo.



Slika 2.5: Spoj zajedničkog emitera i statičke karakteristike bipolarnog npn tranzistora [Izvor: autorski rad]

2.1.2. Parametri bipolarnog tranzistora

Iz ulaznih karakteristika bipolarnog tranzistora može se odrediti **istosmjerni ulazni otpor** R_{BE} kao omjer napona U_{BE} i struje I_B , slika 2.6. Za izmjeničnu struju ovaj se otpor naziva **dinamički ulazni otpor** r_{be} , a često se označava s h_{ie} .



Slika 2.6: Ulazna karakteristika bipolarnog npn tranzistora u spoju ZE [Izvor: autorski rad]

Primjer 2.1.

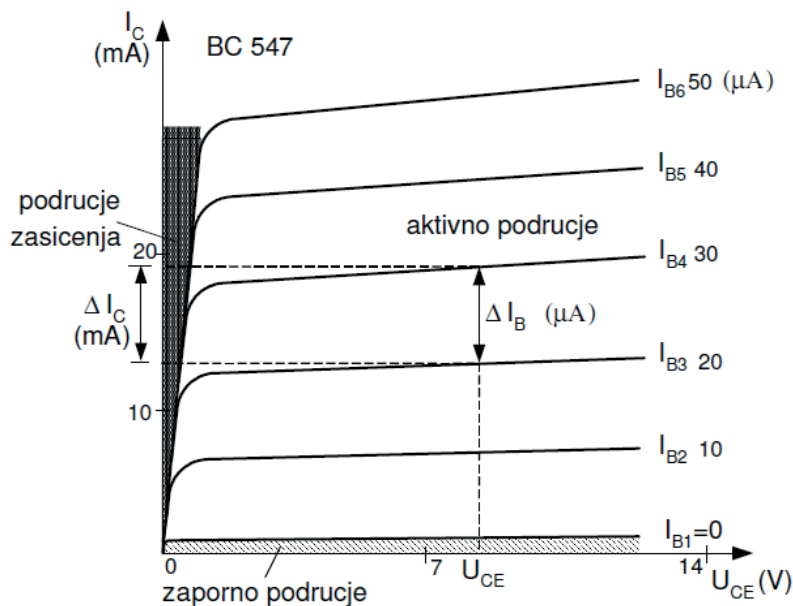
Odrediti ulazne otpore R_{BE} i r_{be} za napon $U_{BE}=0,7\text{ V}$ s karakteristike na slici 2.6.

Rješenje:

$$R_{BE} = \frac{U_{BE}}{I_B} = \frac{0,7\text{ V}}{30\ \mu\text{A}} = 23,33\text{ k}\Omega$$

$$r_{BE} = \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} = \frac{(0,75 - 0,65)\text{ V}}{(43 - 18,5)\ \mu\text{A}} = 4\text{ k}\Omega.$$

Iz prijenosne ili izlaznih karakteristika može se odrediti **faktor istosmjernog strujnog pojačanja** (eng. *D.C. current gain*) kao omjer struje kolektora I_C i struje baze I_B , a označava se s h_{FE} ili b_D . Iz omjera promjene struje kolektora ΔI_C , koje je izazvala promjena struje baze ΔI_B , može se odrediti faktor izmjeničnog strujnog pojačanja (eng. *small-signal current gain*) koji se označava s h_{fe} ili β . Na slici 2.7 prikazane su izlazne karakteristike bipolarnog *npn* tranzistora u spoju zajedničkog emitera. Pored toga, iz izlaznih karakteristika može se odrediti i **izlazni istosmjerni otpor** R_{CE} tranzistora kao omjer napona U_{CE} i struje kolektora I_C . Omjer promjene struje kolektora ΔI_C uzrokovane promjenom napona DU_{CE} naziva se izlazna dinamička vodljivost (eng. *small-signal admittance*) i označava se s h_{oe} . Recipročna vrijednost izlazne vodljivosti izlazni je dinamički otpor tranzistora r_{ce} .



Slika 2.7: Izlazne karakteristike bipolarnog *npn* tranzistora u spoju ZE [Izvor: autorski rad]

Primjer 2.2.

Iz izlaznih karakteristika sa slike 2.7. odrediti ulazne otpore h_{FE} , h_{fe} , R_{CE} i r_{ce} za napon $U_{CE}=8,4\text{ V}$ i struju baze $I_B=30\text{ }\mu\text{A}$. s karakteristike na slici 2.6. Promjena napona U_{CE} od 2 V izazove primjenu struje kolektora I_C od 0,7 mA.

Rješenje:

$$h_{FE} = \frac{I_C}{I_B} = \frac{18,3\text{ mA}}{30\text{ }\mu\text{A}} = 610$$

$$h_{fe} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{(18,3 - 13,1)\text{ mA}}{(30 - 20)\text{ }\mu\text{A}} = 520$$

$$R_{CE} = \frac{U_{CE}}{I_C} = \frac{8,4\text{ V}}{18,3\text{ mA}} = 460\text{ }\Omega$$

$$r_{ce} = \frac{\Delta U_{EC}}{\Delta I_C} = \frac{2\text{ V}}{0,7\text{ mA}} = 2,86\text{ k}\Omega.$$

Prikazane karakteristike i opisani parametri u ovom poglavlju odnose se na bipolarni *npn* tranzistor u *ZE* spoju, ali sve rečeno vrijedi i za bipolarni *pn*p tranzistor u *ZE* spoju uz promijenjene polaritete napona i smjerove struja.

2.1.3. Ograničenja u radu bipolarnih tranzistora

U tvorničkim podacima proizvođači tranzistora pružaju različite informacije kako bi korisnicima omogućili bolje razumijevanje izvedbe i svojstava tranzistora. Ovi podaci obično uključuju:

- **Oblik i dimenzije kućišta:** ovo opisuje vanjski izgled i fizičke dimenzije tranzistora, uključujući broj i raspored priključaka.
- **Faktor strujnog pojačanja:** ovaj se faktor odnosi na omjer struje kolektora i struje baze u tranzistoru. To je ključni parametar za određivanje pojačanja tranzistora.
- **Frekvencijsko područje rada:** ova informacija opisuje frekvencijski raspon u kojem tranzistor normalno može djelovati učinkovito. To je važno za primjene koje uključuju visoke frekvencije.
- **Najveće dopuštene vrijednosti:** ovi podaci uključuju najveće dopuštene vrijednosti za struju, napon, utrošak snage i radnu temperaturu. To je bitno za osiguranje sigurnog i pouzdanog rada tranzistora.
- **Ostale tehničke specifikacije:** proizvođači također pružaju dodatne tehničke informacije, poput uključivanja i isključivanja tranzistora, impedancije ulaza i izlaza te druge specifikacije koje su važne za određene primjene.

Svi ovi podaci pomažu inženjerima i dizajnerima u odabiru pravog tranzistora za svoje specifične aplikacije i osiguravaju da se tranzistor koristi unutar sigurnih i učinkovitih granica. Ograničenja u radu tranzistora ključni su faktori koje inženjeri moraju uzeti u obzir prilikom

dizajniranja elektroničkih krugova i odabira tranzistora za određene aplikacije. Ta ograničenja mogu se podijeliti na nekoliko kategorija:

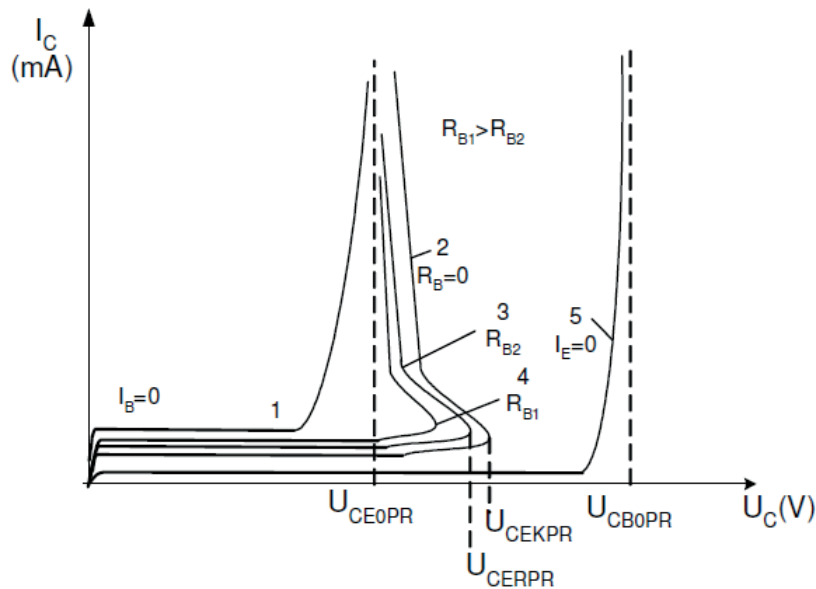
- **Naponska ograničenja:** svaki tranzistor ima najveći iznos dozvoljenog napona među različitim elektrodama, kao što su kolektor-baza i kolektor-emiter. Prekoračenje ovih naponskih granica može dovesti do oštećenja tranzistora ili njegova neispravnog rada.
- **Strujna ograničenja:** ograničenja struje odnose se na najveće iznose dopuštene struje koje tranzistor može podnijeti, uključujući struju kolektora i struju baze. Prekoračenje ovih strujnih ograničenja također može oštetiti tranzistor.
- **Ograničenja snage:** ograničenja snage obično se odnose na najveći iznos snage koju tranzistor može apsorbirati ili disipirati. Ovo je posebno važno za tranzistore koji rade u visokonaponskim i visokofrekvencijskim aplikacijama.
- **Temperaturna ograničenja:** temperatura može značajno utjecati na električne parametre tranzistora, uključujući strujno pojačanje, struje i napone. To se mora uzeti u obzir prilikom dizajniranja i proračuna performansi.
- **Frekvencijska ograničenja:** frekvencijska ograničenja povezana su s brzinom na kojoj tranzistor može prenositi signale. Na visokim frekvencijama tranzistori mogu pokazati pogoršane performanse zbog parazitnih kapacitivnosti i induktiviteta, što rezultira smanjenjem pojačanja, većim kašnjenjem signala i povećanim gubicima.

Pored navedenih ograničenja treba uzeti u obzir i zračenje, uključujući ionizirajuće i neionizirajuće zračenje, koje može imati različite utjecaje na tranzistore, ovisno o vrsti zračenja, dozi i vrsti tranzistora. Evo nekoliko ključnih čimbenika:

- **Ionizirajuće zračenje** (npr. gama-zračenje, rendgensko zračenje): ovakvo zračenje može uzrokovati oštećenja na poluvodičkim materijalima tranzistora, što rezultira promjenama u njegovim električnim karakteristikama. Na primjer, ionizirajuće zračenje može uzrokovati povećanje struje curenja, smanjenje pojačanja i promjene praga napona. Ovo je posebno važno u aplikacijama u kojima su tranzistori izloženi ionizirajućem zračenju, kao što su sateliti ili visokoenergetski eksperimenti.
- **Neionizirajuće zračenje** (npr. ultraljubičasto zračenje, infracrveno zračenje): ovakvo zračenje može uzrokovati povećanje temperature tranzistora, što može utjecati na performanse. Osim toga, dugotrajno izlaganje UV zračenju može uzrokovati oštećenja kućišta tranzistora. To može biti problem u aplikacijama gdje je UV zračenje prisutno, kao što su vanjski senzori.
- **Elektromagnetsko zračenje:** elektromagnetsko zračenje na visokim frekvencijama (RF) i mikrovalna zračenja mogu izazvati međusobnu interferenciju među električnim komponentama tranzistora. Ovo može uzrokovati neželjeno ponašanje i smanjenje performansi tranzistora u komunikacijskim i radijskim uređajima.
- **Doza zračenja:** utjecaj zračenja na tranzistore značajno ovisi o dozi zračenja kojoj su izloženi. Visoke doze zračenja mogu uzrokovati ozbiljna oštećenja.

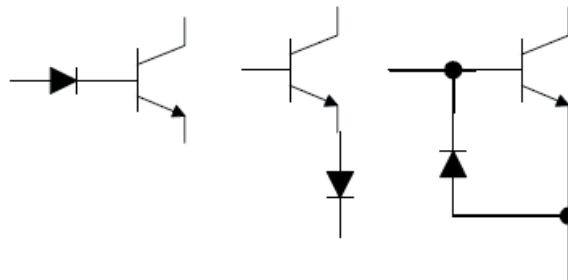
Sva su navedena ograničenja od bitnog značaja za pravilan rad i pouzdanost elektroničkih sklopova koji uključuju tranzistore. Inženjeri moraju pažljivo razmotriti ta ograničenja kako bi osigurali da tranzistori budu korišteni unutar sigurnih granica i da rade pouzdano u svojim namijenjenim aplikacijama.

Na slici 2.8 prikazana su naponska ograničenja za jedan silicijev tranzistor u spojevima ZE i ZB. Mehanizam proboja koji te napone ograničava jest *lavinski proboj*. Iz slike se vidi da krivulje 2, 3 i 4 posjeduju područje negativnoga otpora i ova pojava dosta se događa samo kod silicijevih tranzistora. U praktičnim izvedbama otpor baze uvijek je konačan, čak i ako je otpor vanjskoga kruga u seriji s bazom jednak nuli, ostaje uvijek omski otpor baze r_B . O veličini vanjskog otpora R_B koji se dodaje u seriju s bazom ovisi i probojni napon U_{CE0PR} kao što je prikazano na slici 2.8. Tipična dopuštena vrijednost napona U_{BEM} iznosi oko 5 V.



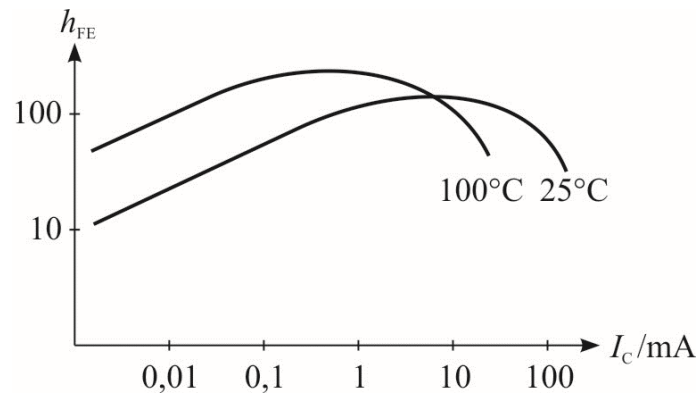
Slika 2.8: Naponska ograničenja bipolarnog npn tranzistora u spojevima ZE i ZB [Izvor: autorski rad]

Iz slike 2.8 također je vidljivo da isti tranzistor u spoju ZB ima znatno veći probojni napon U_{CB0PR} nego u ZE spoju i ne posjeduje područje negativnog otpora. Ako u sklopovima postoji mogućnost pojave većeg napona, potrebno je zaštititi spoj baza-emiter tranzistora kao što je prikazano na slici 2.9.



Slika 2.9: Zaštita spoja baza-emiter [Izvor: autorski rad]

Zbog povećanja temperature povećava se preostala struja kolektora I_{CBO} (slika 2.3). Kod silicijevih tranzistora promjena temperature za $10\text{ }^\circ\text{C}$ utrostručuje vrijednost preostale struje kolektora, što dovodi do značajnog povećanja faktora strujnog pojačanja, slika 2.10.



Slika 2.10: Utjecaj temperature na faktor strujnog pojačanja [Izvor: autorski rad]

Za silicijeve bipolarne tranzistore za napone u zasićenju vrijedi:

- 1 U_{BEzas} (eng. *saturation voltage* V_{BEsat}) iznosi od 0,7 V do 0,8 V
- 2 U_{CEzas} (eng. *saturation volt* V_{CEsat}) iznosi od 0,1 V do 0,3 V, ali može imati i vrijednosti veće od jednog volta kod tranzistora namijenjenih za veće snage.

2.1.4. Bipolarni tranzistor kao sklopka

Električnim sklopkama kontroliramo uključivanje i isključivanje potrošača u strujnom krugu. Kada je sklopka uključena, struja teče kroz strujni krug, a pad napona na sklopki zanemariv je. S druge strane, kada je sklopka isključena, strujni se krug prekida, a sklopka preuzima cijeli priključeni napon (slika 2.11). U elektroničkim sklopovima često se za kontrolu uključivanja i isključivanja struje kroz potrošač koristi tranzistor. Ova kontrola odvija se putem strujnih impulsa, a ne mehaničkim prekidačem. Da bi pad napona na tranzistorskoj sklopki, kada je uključena, bio što manji, tranzistor mora biti u području zasićenja. S druge strane, da bi struja kroz sklopku, kada je isključena, bila u najmanjoj mjeri, tranzistor mora biti u području zapiranja. Stoga, strujni impulsi koji upravljaju tranzistorom prebacivat će ga iz područja zapiranja u područje zasićenja, i obrnuto. Kako bi se smanjilo opterećenje izvora impulsa, potrošnja energije u ulaznom dijelu sklopa mora biti u najmanjoj mjeri. Zbog toga se spoj zajedničkog emitera nameće kao najpogodnija konfiguracija. Spoj zajedničkog emitera zahtijeva ulaznu baznu struju nekoliko redova veličine manju od izlazne kolektorske struje (za faktor β).

Tranzistorska sklopka prikazana je na slici 2.11. Za struju baze $I_B=0$ radna točka tranzistora nalazi se u zapiranju. Tada kroz tranzistor teče zanemariva struja kolektora, a izlazni napon je $U_{CE}=U_{CC}$. U tom slučaju tranzistor djeluje kao isključena sklopka. Bitno je

napomenuti da silicijski tranzistori počinju voditi struju tek kada je vrijednost napona $U_{BE} = 0,5 \text{ V}$. Kada se na ulazu tranzistora primijeni dovoljno veliki napon koji osigurava napon $U_{BE} = U_{BEzas} = 0,7 \text{ V} - 0,8 \text{ V}$, kroz tranzistor će poteći struja baze I_{Bzas} koja će radnu točku tranzistora dovesti u područje zasićenja:

$$I_{Bzas} = \frac{U_{ul} - U_{BEzas}}{R_B}$$

Jednadžba 2.2: Struja zasićenja baze

Tada će kroz kolektor teći najveći iznos struje I_{Czas} koja je jednaka:

$$I_{Czas} = \frac{U_{CC} - U_{CEzas}}{R_C}$$

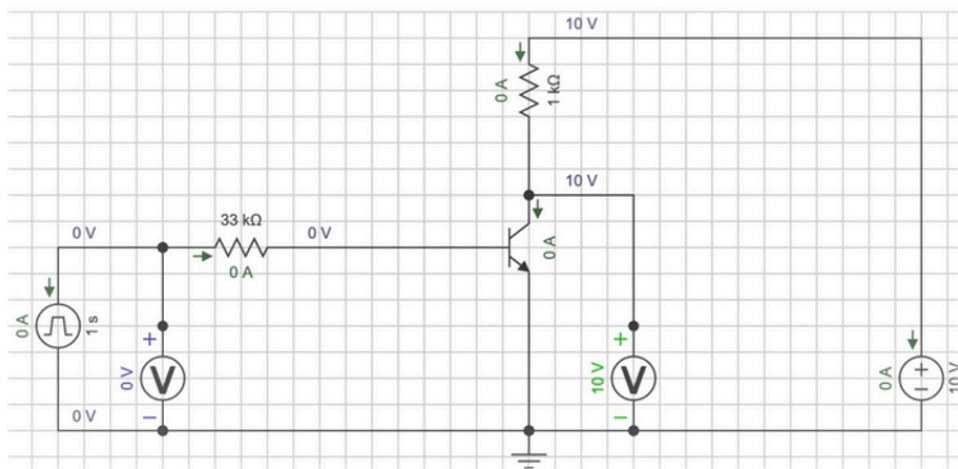
Jednadžba 2.3: Struja zasićenja kolektora

U ovom je slučaju cijeli napon napajanja na otporniku R_C , a izlazni napon zasićenja U_{CEzas} vrlo je nizak, obično između $0,1 \text{ V}$ i $0,3 \text{ V}$ za silicijeve tranzistore. U ovom slučaju tranzistor djeluje kao uključena sklopka. Uvjet koji osigurava da se tranzistor nalazi u zasićenju je:

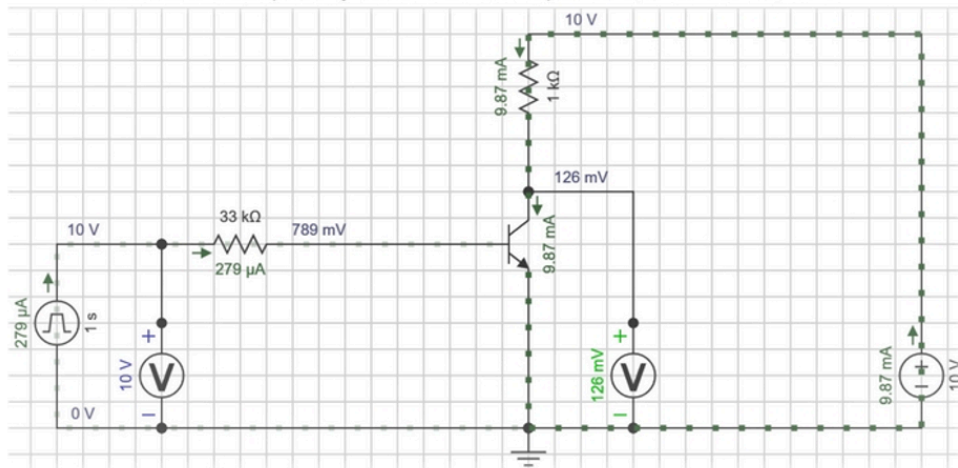
$$I_{Bzas} > \frac{I_{Czas}}{h_{FE}}$$

Jednadžba 2.4: Uvjet zasićenja

Tranzistorska sklopka isključena - na ulazu napon 0 V , a na izlazu 10 V



Tranzistorska sklopka uključena - na ulazu napon 10 V, a na izlazu 0,126 V



Slika 2.11: Tranzistorska sklopka [Izvor: autorski rad]

2.2. Unipolarni tranzistori

Pokušaji kontroliranja prolaska struje kroz poluvodiče pomoću vanjskog električnog polja datiraju iz 1934. godine, kada je Heil razvio osnovnu ideju o takvom tranzistoru. Ova se inovacija temeljila na zakonima elektrodinamike, posebno Gaussovu zakonu koji opisuju odnos između jakosti električnog polja, relativne dielektrične konstante izolatora i gustoće inducirano površinskog naboja u poluvodiču. U kasnim četrdesetim godinama Shockley, Pearson i Bardeen nastavili su eksperimentirati s germanijevim poluvodičem kako bi razvili tranzistor s efektom polja. Unatoč poteškoćama u izvedbi tranzistora, Shockley je 1952. godine razvio i teorijski objasnio spojni tranzistor s efektom polja, poznat kao JFET. Općenito, postoje dva glavna tipa FET-ova:

- **JFET (engl. *Junction Field-Effect Transistor*):** JFET je spojni tranzistor s efektom polja, a struju između izvora i odvoda kontrolira pod utjecajem napona primijenjenog na vratima.
- **MOSFET (engl. *Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor*):** MOSFET je tranzistor s efektom polja s izoliranim vratima, najčešći tip FET-a u modernoj elektronici. Postoje različite varijacije MOSFET-ova, uključujući *n*-kanalne i *p*-kanalne, koje se široko primjenjuju u elektroničkim uređajima.

Razvoj FET-ova igrao je ključnu ulogu u napretku poluvodičke industrije i elektronike općenito, postajući važna komponenta modernih uređaja i elektroničkih sklopova.

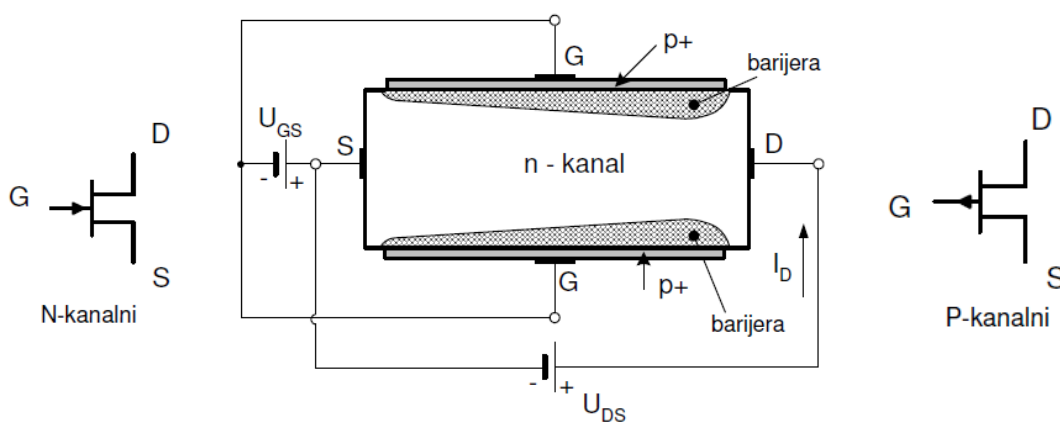
2.2.1. JFET

Tranzistor s efektom polja (JFET) ima niz prednosti u usporedbi s bipolarnim tranzistorima:

- Naponsko upravljanje: za razliku od bipolarnih tranzistora koji se kontroliraju strujom kroz bazu, JFET-ovi se upravljaju naponom na vratima (engl. *gate*). To znači da ne troše struju u upravljačkom krugu, što rezultira većom energetsom učinkovitošću.
- Visoka ulazna impedancija: JFET-ovi imaju vrlo visoku ulaznu impedanciju, što znači da ne opterećuju ulazni naponski izvor. To ih čini idealnim za upotrebu u pojačalima i drugim sklopovima gdje je potrebno u najmanjoj mjeri opterećenje izvora.
- Niska potrošnja energije: kako se struja kroz kanal JFET-a kontrolira naponom na vratima, ovi tranzistori troše vrlo malo energije u stanju mirovanja. To ih čini idealnim za baterijske uređaje i druge aplikacije gdje je važna optimizacija potrošnje energije.
- Mali šum: JFET-ovi generiraju manje šuma u usporedbi s bipolarnim tranzistorima. To ih čini pogodnim za upotrebu u audiopojačalima i visokofrekvencijskoj elektronici gdje je potrebna visoka razina čistote signala.
- Temperaturna stabilnost: karakteristike JFET-a ostaju relativno stalne u širokom rasponu temperatura. To ih čini pouzdanim izborom za upotrebu u iznimnim uvjetima okoline.

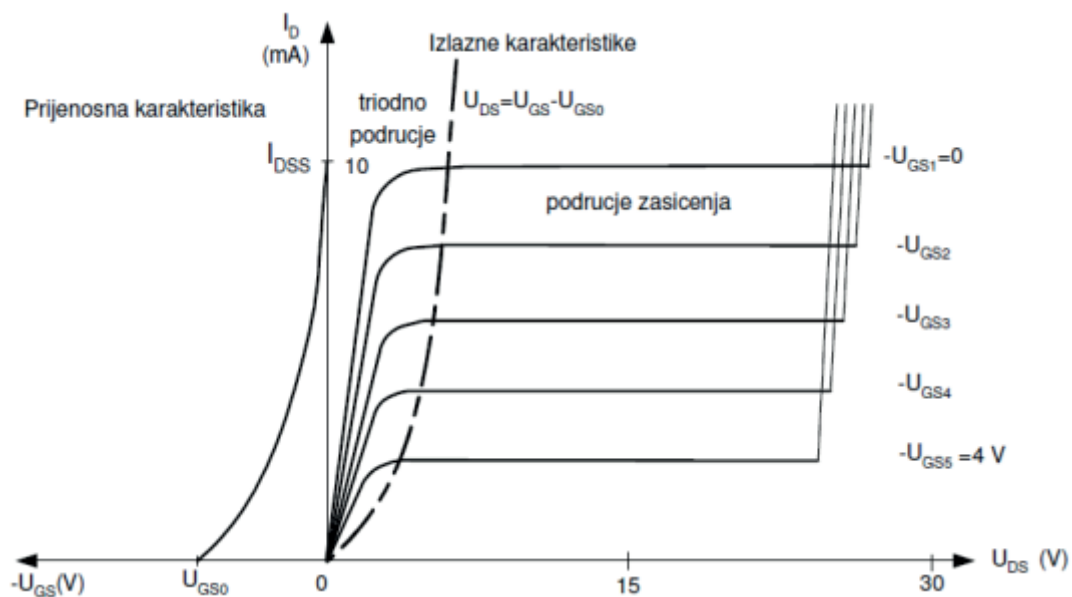
JFET tranzistori dolaze u dvjema osnovnim varijantama: *N*-kanalni i *P*-kanalni. Kod *N*-kanalnog FET elektroni nositelji su naboja u kanalu, dok su kod *P*-kanalnog FET-a šupljine nositelji napona. *N*-kanalni JFET-ovi obično se koriste u sklopovima gdje je potrebna veća struja, dok se *P*-kanalni JFET-ovi obično koriste u sklopovima gdje je potrebna veća ulazna impedancija. Osim *N*-kanalnih i *P*-kanalnih JFET-ova, postoje i JFET-ovi s dvostrukim kanalom koji kombiniraju oba tipa kanala u jednom tranzistoru. Simboli i presjek *N*-kanalnog spojnog FET-a s označenim elektrodama prikazani su na slici 2.12. Elektrode su:

- **izvor S** (engl. *source*): elektroda kroz koju ulaze nositelji naboja u kanal
- **odvod D** (engl. *drain*): elektroda kroz koju izlaze nositelji naboja iz kanala
- **vrata G** (engl. *gate*): elektroda kojom se kontrolira protok nositelja naboja kroz kanal.



Slika 2.12: Simboli JFET-a i presjek *n*-kanalnog spojnog tranzistora [Izvor: autorski rad]

Slika 2.12 prikazuje spojni JFET tranzistor koji se sastoji od n -tipa poluvodiča s umetnutim područjima p -tipa na dvije suprotne strane. Napon U_{GS} polarizira ova dva PN spoja u nepropusnom smjeru, stvarajući barijere koje se šire u n -stranu. Struja I_D teče kroz neutralni dio n -tipa poluvodiča između izvora **S** i odvoda **D**, a ovisi o naponima U_{DS} i U_{GS} . Širina neutralnog kanala ovisi o naponu U_{GS} . Povećanjem napona U_{GS} kanal se sužava, što dovodi do većeg otpora i manje struje I_D . Napon U_{GS0} označava napon dodira pri kojem se kanal zatvara. Radna točka JFET-a određuje se naponima na elektrodama. Slika 2.13 prikazuje prijenosnu karakteristiku i izlazne karakteristike N -kanalnog JFET-a. One opisuju odnos između napona U_{DS} i struje I_D za različite napone U_{GS} . Slične karakteristike postoje i za P -kanalne JFET-ove, s obrnutim polaritetima i smjerovima struja.



Slika 2.13: Prijenosna i izlazne karakteristike n -kanalnog JFET-a [Izvor: autorski rad]

Izlazne karakteristike N -kanalnog JFET-a prikazuju ovisnost struje odnosa I_D o naponu između odvoda i izvora U_{DS} za konstantan napon na vratima U_{GS} . Na tim karakteristikama uočljiva su dva radna područja: triodno područje i područje zasićenja. Granica između triodnog područja i područja zasićenja za određeni napon U_{GS} dana je izrazom $U_{DS} = U_{GS} - U_{GS0}$. U triodnom je području napon U_{DS} nizak, a JFET se ponaša kao linearni otpor čija se vrijednost može kontrolirati promjenom napona U_{GS} . Struja I_D linearno ovisi o naponu U_{DS} . U području zasićenja struja I_D konstantna je i praktički ne ovisi o naponu U_{DS} (u idealnom slučaju). U realnim JFET-ovima može doći do blagog porasta struje I_D u zasićenju. Nagli porast struje I_D kod viših napona U_{DS} rezultat je proboja PN barijere između upravljačke elektrode i kanala u blizini odvoda. Za pojačala se radna točka obično postavlja u područje zasićenja. Razlog tome je konstantna struja I_D u tom području, što olakšava kontrolu i poboljšava stabilnost pojačala. Prijenosna karakteristika definira ovisnost struje I_D o naponu U_{GS} , odnosno $I_D = f(U_{GS})$. U području zasićenja vrijedi:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS0}} \right)^2$$

Jednadžba 2.5: Ovisnost izlazne struje I_D o ulaznom naponu U_{GS}

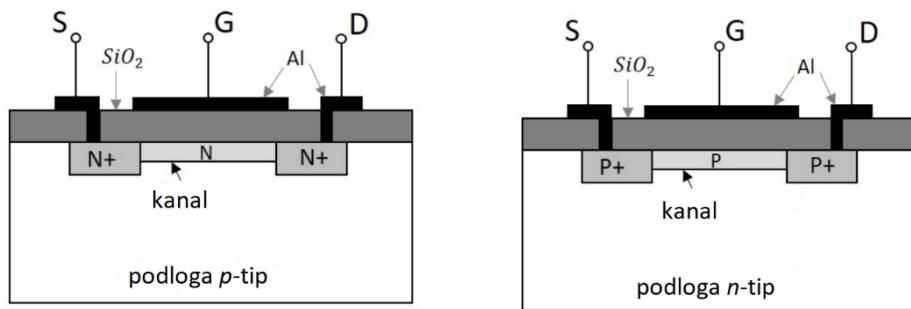
Strmina (engl. *transconductance*) označena s g_m predstavlja ključni parametar za JFET tranzistore jer direktno utječe na njihovo naponsko pojačanje. To je omjer promjene struje odvoda I_D izazvane promjenom napona na vratima U_{GS} uz konstantni napon između odvoda i izvora U_{DS} . Jednostavno rečeno, veća strmina znači i veće naponsko pojačanje. Ulazni dinamički otpor r_{gs} JFET-a obično se smatra beskonačnim. Razlog leži u praktički zanemarioj struji upravljačke elektrode (reda nA). Pošto je upravljačka elektroda zaporno polariziran PN spoj, otpor između vrata i izvora vrlo je visok. To znači da nema značajne struje kroz upravljačku elektrodu i u većini se praktičnih situacija ulazni dinamički otpor može smatrati beskonačnim. Strmina se definirana kao:

$$g_m = \left. \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}} \right|_{U_{DS}=\text{konst.}}$$

Jednadžba 2.6: Strmina JFET-a

2.2.2. Mosfet

MOSFET, odnosno IGFET (engl. *Insulated Gate Field-Effect Transistor*), ima izoliranu upravljačku elektrodu od podloge tankim slojem silicijevog dioksida (SiO_2). To ga razlikuje od JFET-a gdje je upravljačka elektroda u direktnom kontaktu s podlogom. Rad MOSFET-a zasniva se na stvaranju inverzijskog sloja na površini podloge. MOSFET tranzistor može se konstruirati s P -kanalom na n -tipu podloge ili s N -kanalom na p -tipu podloge. To određuje polaritet nositelja naboja i smjer struje kroz tranzistor. Slika 2.14 prikazuje presjek N -kanalnog i P -kanalnog MOSFET-a. Vidljiva je struktura koja uključuje N -kanal i P -kanal, izolirajući sloj SiO_2 i upravljačku elektrodu. Kod N -kanalnog MOSFET-a na lagano dopiranu podlogu p -tipa ubacuju se dva jako dopirana područja n -tipa koja služe kao izvor i odvod. Između ovih dvaju $n+$ područja procesom difuzije formira se N -kanal koji povezuje izvor i odvod. Vrata nisu direktno spojena na poluvodičku podlogu, već na izolator od silicijeva dioksida (SiO_2). Kod P -kanalnog MOSFET-a koristi se slabo dopirana n -podloga u koju se difundiraju dva jako dopirana $p+$ područja koja čine izvor i odvod. Među ovim dvama područjima formira se vodljivi P -kanal. Vrata se opet naslanjaju na tanki sloj izolatora SiO_2 . Ključne značajke MOSFET-a su: izolirana upravljačka elektroda, visoka ulazna impedancija, niska potrošnja energije, mali šum i veće naponsko pojačanje u usporedbi s JFET-om. MOSFET tranzistori ključne su komponente u modernoj elektronici. Njihove prednosti, kao što su izolirana upravljačka elektroda i visoka ulazna impedancija, čine ih idealnim izborom za mnoštvo različitih aplikacija. Primjenjuju se u mikroprocesorima, memorijama, pojačalima signala, sklopkama te analognim i digitalnim sklopovima.



Slika 2.14: Struktura n i p-kanalnog MOSFET-a [Izvor: autorski rad]

Izlazne karakteristike MOSFET-a, slično kao i kod JFET-a (slika 2.13), dijele se na tri područja: triodno područje, područje zasićenja i područje proboja. U triodnom području vrijedi:

$$I_D = K \left[(U_{GS} - U_{GS0}) * U_{DS} - \frac{1}{2} U_{DS}^2 \right] \quad \text{za } U_{DS} < U_{GS} - U_{GS0}$$

gdje je $K = \mu_n \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} \cdot \frac{W}{L}$, a:

- μ_n – površinska pokretljivost slobodnih elektrona u kanalu između uvoda i odvoda
- ϵ_{ox} – dielektrična konstanta
- t_{ox} – debljina sloja silicij-dioksida iznad područja kanala
- W – širina kanala
- L – duljina kanala.

U području zasićenja vrijedi:

$$I_D = \frac{K}{2} (U_{GS} - U_{GS0})^2 \quad \text{uz } U_{DS} \geq U_{GS} - U_{GS0}$$

U području zasićenja pri $U_{GS} = 0$ vrijedi:

$$I_{DSS} = \frac{K}{2} (-U_{GS0})^2 \quad I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS0}} \right)^2$$

Jednadžba 2.7: Struja odvoda za $U_{GS} = 0$

Dvije glavne vrste MOSFET-a su N-kanalni (slika 2.15) i P-kanalni (slika 2.16). Svaki od njih može biti osiromašenog i obogaćenog tipa.

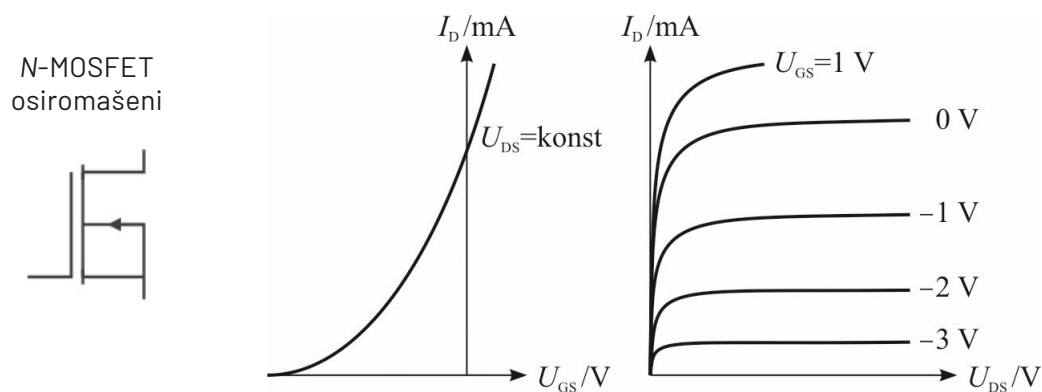
Ključne karakteristike osiromašenog MOSFET-a su:

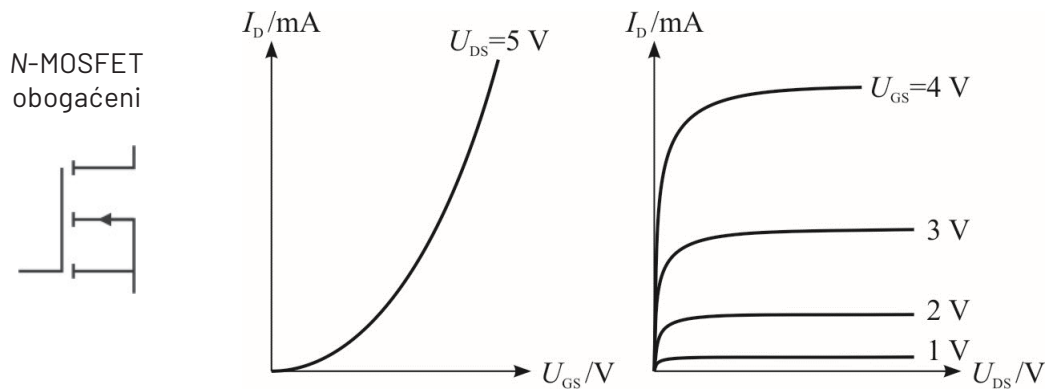
- **inicijalni kanal:** već ima formiran inverzijski kanal na površini podloge, čak i kad je napon na upravljačkoj elektrodi U_{GS} jednak nuli
- **dva načina rada:** osiromašeni MOSFET može raditi i kada se kanal osiromašuje nositeljima naboja (osiromašeni način rada), tj. smanjuje se struja kroza nj te kada kada se kanal obogaćuje nositeljima naboja (obogaćeni način rada), tj. povećava se struja kroza nj
- **napon praga:**
 - za n-kanalni MOSFET napon praga U_{GS0} negativan je
 - za p-kanalni MOSFET napon praga U_{GS0} pozitivan je.

Načini rada osiromašenog MOSFET-a su:

- N-kanalni MOSFET:
 - obogaćeni način rada: U_{GS} je pozitivan i povećava struju kroz kanal
 - osiromašeni način rada: U_{GS} je negativan i smanjuje struju kroz kanal, čak i do potpunog isključivanja
- P-kanalni MOSFET:
 - obogaćeni mod: U_{GS} je negativan i povećava struju kroz kanal
 - osiromašeni mod: U_{GS} je pozitivan i smanjuje struju kroz kanal, čak i do potpunog isključivanja.

Osiromašeni tip MOSFET-a ima prednost što može raditi i kada je napon $U_{GS} = 0$ V, a ima i osiromašeni način rada. Međutim, obogaćeni tip MOSFET-a češći je zbog jednostavnije kontrole struje pomoću pozitivnog napona U_{GS} .



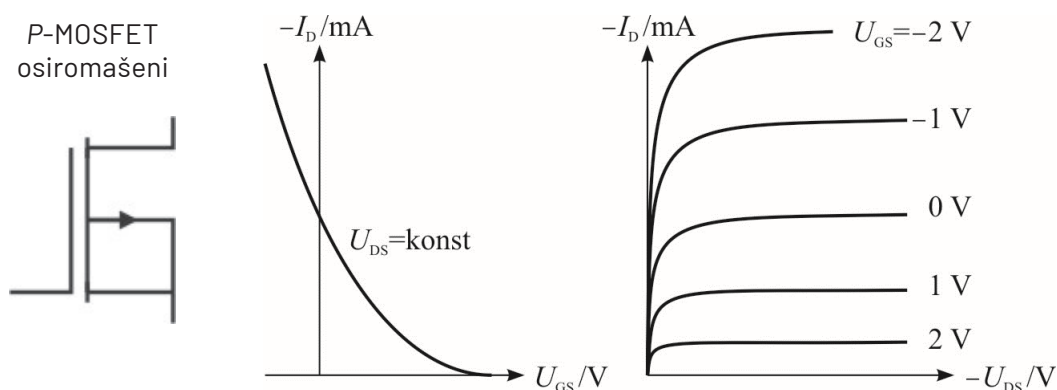


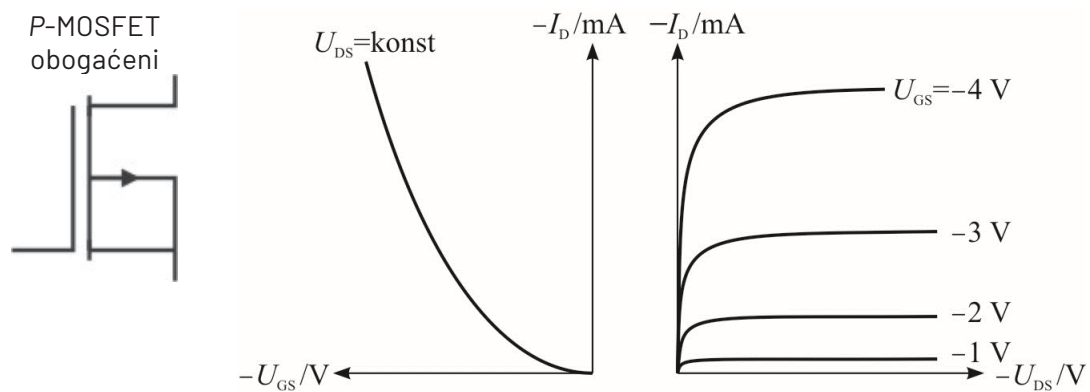
Slika 2.15: Simboli i karakteristike n-kanalnog MOSFET-a [Izvor: autorski rad]

Ključne karakteristike obogaćenog tipa MOSFET-a su:

- **Inicijalni kanal:** nema formiran inverzijski kanal na površini podloge kad je napon na upravljačkoj elektrodi U_{GS} jednak nuli.
- **Jedan način rada:** obogaćeni MOSFET može raditi samo u obogaćenom načinu rada kada je napon U_{GS} veći od napona praga U_{GS0} , jer se tada stvara inverzijski kanal i struja kroz kanal raste sa povećanjem U_{GS} . Osiromašeni način rada ne postoji, jer bez napona U_{GS} nema ni kanala.
- **Napon praga:**
 - za n-kanalni MOSFET napon praga U_{GS0} je pozitivan
 - za p-kanalni MOSFET napon praga U_{GS0} je negativan.

Obogaćeni tip MOSFET-a zahtijeva pozitivan ili negativan napon na U_{GS} (ovisno o vrsti) da bi se stvorio inverzijski kanal i omogućio prolaz struje. Oni imaju jednostavnije upravljanje strujom, ali ne mogu raditi u osiromašenom načinu rada kao što može osiromašeni tip.





Slika 2.16: Simboli i karakteristike p-kanalnog MOSFET-a [Izvor: autorski rad]

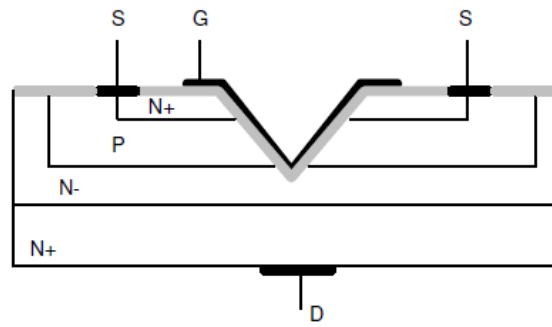
2.2.3. VFET i VMOS

Vertikalni FET (VFET) i vertikalni MOS (VMOS) tranzistori su posebne izvedbe unipolarnih tranzistora snage konstruirani za pojačanje snage. Evo nekoliko ključnih karakteristika VFET tranzistora:

- **vertikalna struktura:** kanal je postavljen vertikalno i usmjeren prema gore s izvorom i odvodom na suprotnim stranama poluvodiča
- **struja upravljačke rešetke:** struja kroz upravljačku rešetku I_G nije zanemariva i kreće se od nekoliko miliampera do ampera kod tranzistora velikih snaga
- **nizak ulazni otpor:** ulazni otpor VFET tranzistora relativno je nizak, obično u rasponu od nekoliko kiloohma
- **visoki napon i velika struja:** najveći iznos napona između odvoda i izvora U_{DS} može doseći nekoliko stotina volti, a najveći iznos struje odvoda I_D može biti nekoliko desetaka ampera, što rezultira ukupnom snagom od nekoliko stotina vata.

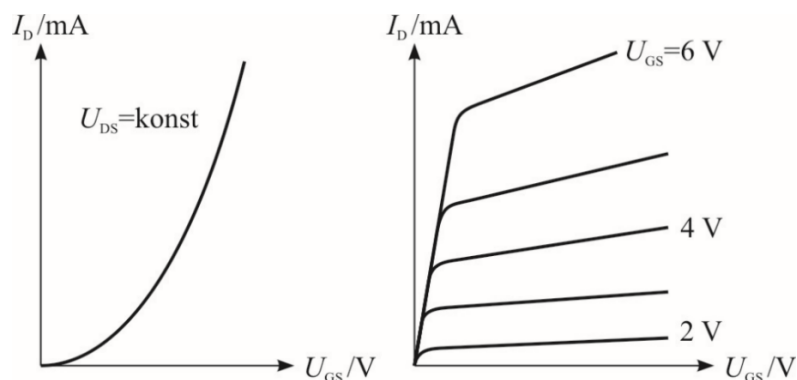
Slika 2.17 prikazuje strukturu VMOS tranzistora, koja se odlikuje sljedećim karakteristikama:

- **napredna verzija FET-a:** VMOS tranzistori predstavljaju unaprijeđenu verziju FET tranzistora s fokusom na poboljšanje performansi
- **povećan omjer W/L:** ključna značajka VMOS tranzistora značajno je veći omjer širine i duljine kanala (W/L) u usporedbi s tradicionalnim FET tranzistorima
- **povećanje struje odvoda:** cilj povećanja W/L omjera postizanje je veće struje odvoda I_D , a širi kanal omogućuje protok veće struje bez dostizanja granice zasićenja
- **tehnološka ograničenja:** tradicionalni unipolarni tranzistori ograničeni su u najmanjem iznosu duljine kanala na oko $3 \mu\text{m}$), a kod VMOS tranzistora umjesto smanjivanja duljine povećava se širina kanala
- **tehnika žlijeba:** VMOS tranzistori koriste tehniku žlijeba za izradu kanala koji proširuje kanal i omogućava veći W/L omjer i veću struju odvoda.



Slika 2.17: Struktura VMOS tranzistora [Izvor: autorski rad]

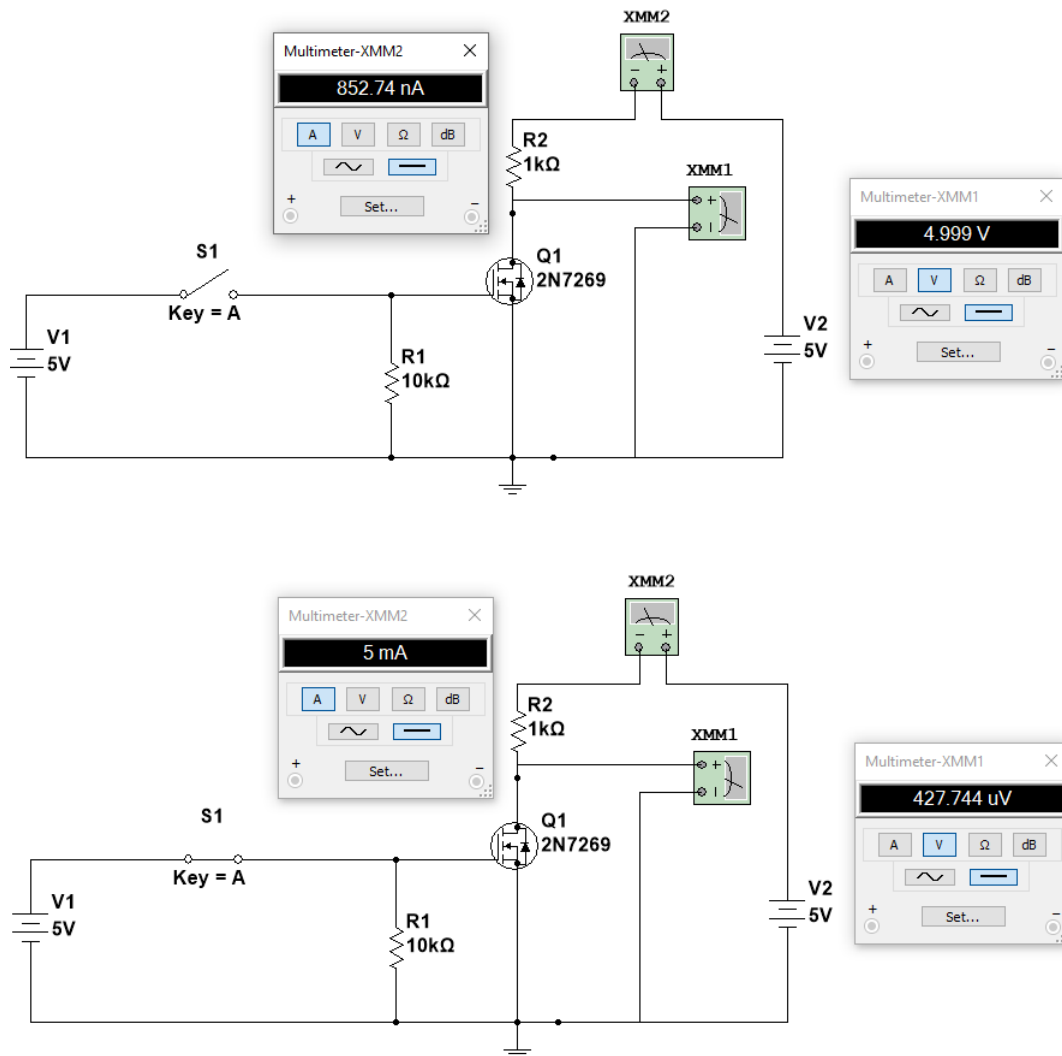
Oba VFET i VMOS tranzistori dizajnirani su za rad u pojačalima snage i drugim primjenama u energetskej elektronici koje zahtijevaju visoke naponske i strujne vrijednosti. Radni naponi U_{DS} kod VMOS tranzistora iznose do 1000 V struje odvoda i do 500 A, uz dozvoljeni utrošak snage i do 2500 W. Na slici 2.18 prikazani su simbol i karakteristike n -kanalnog VMOS tranzistora.

Slika 2.18: Simbol i karakteristike n -kanalnog MOSFET-a [Izvor: autorski rad]

VFET i VMOS imaju mnoge prednosti, kao što su: visoka gustoća snage, niska potrošnja energije i brzo prekidanje, što ih čini idealnim za mnoštvo različitih aplikacija, kao što su: napajači i pretvarači, pojačala snage, motori s promjenjivom brzinom vrtnje, upravljanje rasvjetom i indukcijско grijanje.

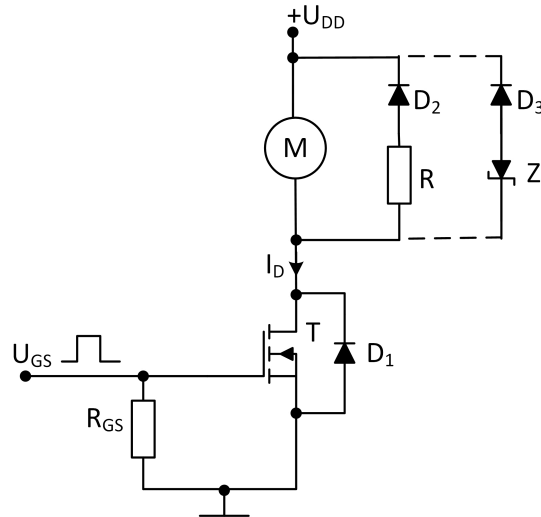
2.2.4. Mosfet sklopka

Slika 2.19 prikazuje princip rada MOSFET sklopke s N -kanalnim tranzistorom. Kada je ulazni napon $U_{GS} = 0$ V (gornja slika), tada se MOSFET ponaša kao otvorena sklopka i kroz sklop teče zanemariva struja ($I_D = 852$ nA), a izlazni je napon $U_{DS} = 5$ V.



Slika 2.19: MOSFET sklopka [Izvor: autorski rad]

Sa slike 2.19 vidljivo je da se radi o N -kanalnom MOSFET-u obogaćenog tipa. Zbog toga je potrebno dovesti pozitivan napon U_{GS} kako bi tranzistor proveo (donja slika). Za napon $U_{GS} = 5\text{ V}$ tranzistor je proveo i sada je sklopka uključena, struja je $I_D = 5\text{ mA}$ uz zanemariv napon $U_{DS} = 427\text{ mV}$. MOSFET sklopka za upravljanje istosmjernim motorom prikazana je na slici 2.20. Kako je opterećenje motora induktivno, potrebno je zaštititi MOSFET tranzistor od induciranog napona iz namotaja motora kada je sklopka isključena. To se radi na sljedeći način: spaja se dioda D_2 koja djeluje kao zamašnjak (engl. *flywheel*) u seriju s otpornikom R i sve skupa paralelno s motorom. Za bolje performanse upravljanja i zaštite, umjesto serijskog spoja diode i otpornika, može se koristiti serijski spoj diode D_3 i Zener diode Z koji čini steznu mrežu (engl. *snubber or clamping network*), kao što je prikazano na slici 2.20. Također, za dodatnu sigurnost kod induktivnih opterećenja može se koristiti dioda D_1 spojena između izvora i odvoda. Ove vrste zaštite MOSFET tranzistora primjenjuju se kod induktivnih opterećenja, kao što su motori, releji, solenoidi, transformatori itd., za sprječavanje prijelaznih pojava.

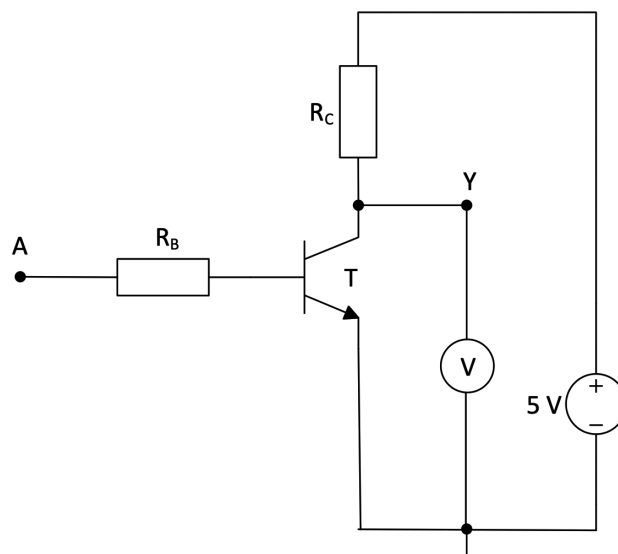


Slika 2.20: MOSFET sklopka s induktivnim opterećenjem [Izvor: autorski rad]

2.3. Tranzistorska tehnika

2.3.1. Logički „NE“ sklop u tranzistorskoj tehnici

Na slici 2.21. prikazan je logički NE sklop, a u tablici 2.1 naponska stanja ovog sklopa. Kada je na ulazu sklopa napon 0 V (logičko stanje 0), radna točka tranzistora nalazi se u zapiranju te tranzistor predstavlja otvorenu sklopku i na izlazu Y je napon napajanja 5 V (logičko stanje 1). Kada se na ulaz dovede napon 5 V (logička 1), radna točka tranzistora ide u zasićenje i tranzistor predstavlja zatvorenu sklopku, a na izlazu je napon $U_{CEzas} = 126 \text{ mV}$ (logička 0).



$T = 2N2222$, $R_B = 10 \text{ k}\Omega$, $R_C = 1 \text{ k}\Omega$

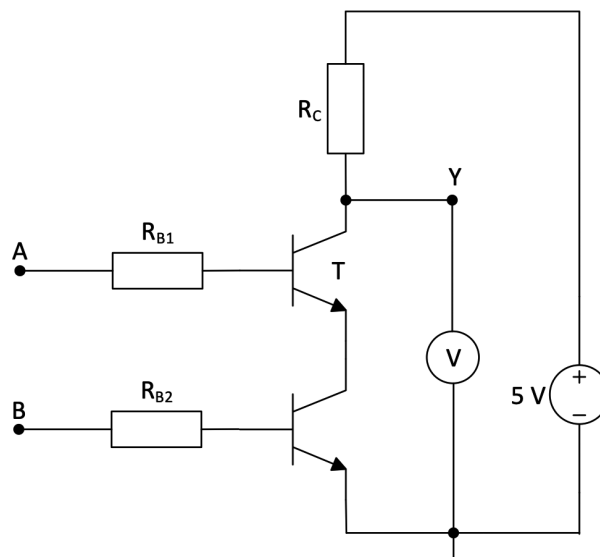
Slika 2.21: Logički NE sklop u tranzistorskoj tehnici [Izvor: autorski rad]

Tablica 2.2: Naponska stanja NE sklopa

A (V)	Y (V)
0	5
5	0,126

2.3.2. Logički „ni“ sklop u tranzistorskoj tehnici

Sklop NI prikazan je na slici 2.22, a u tablici 2.2 naponska stanja ovog sklopa. Ako je na oba ulaza A i B napon 0 V, radne točke obaju tranzistora nalaze se u zapiranju i oni djeluju kao isključene sklopke te je na izlazu Y napon 5 V (logička 1). Ovakvo stanje ostaje sve dok je na jednom od ulaza napon 0 V, jer pripadni tranzistor djeluje kao isključena sklopka koja prekida strujni krug. Samo kada je na oba ulaza A i B doveden napon od 5 V (logička 1), radne točke obaju tranzistora idu u zasićenje i oni djeluju kao uključene sklopke te na izlazu sklopa vrijedi $Y = 2 \cdot U_{CEZas} = 0,252$ V (logička 0).



$$T = 2N2222, R_{B1} = R_{B2} = 10 \text{ k}\Omega, R_C = 1 \text{ k}\Omega$$

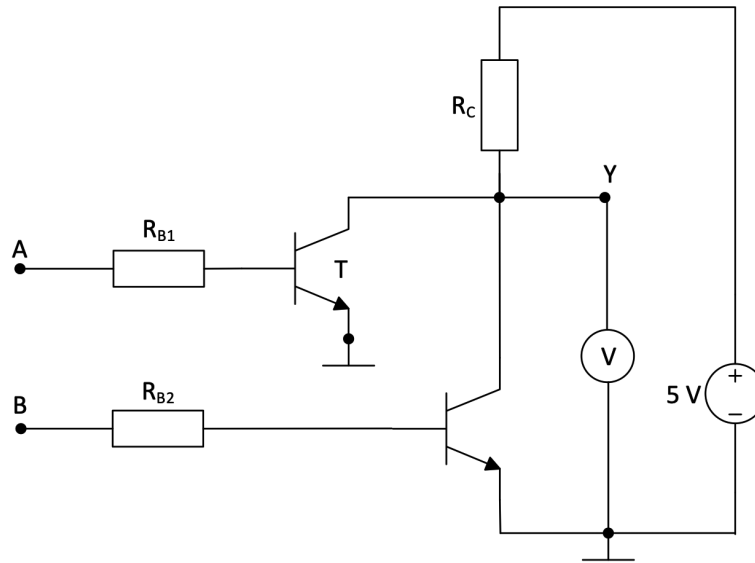
Slika 2.22: Logički NI sklop u tranzistorskoj tehnici [Izvor: autorski rad]

Tablica 2.3: Naponska stanja NI sklopa

A (V)	B (V)	Y (V)
0	0	5
0	5	5
5	0	5
5	5	0,252

2.3.3. Logički „NLI“ sklop u tranzistorskoj tehnici

Sklop NLI prikazan je na slici 2.23, a u tablici 2.3 naponska stanja ovog sklopa. Ako je na oba ulaza A i B napon 0 V, radne točke obaju tranzistora nalaze se u zapiranju i oni djeluju kao isključene sklopke te je na izlazu Y napon 5 V (logička 1). Čim se na jedan od ulaza dovede napon od 5 V (logička 1), radna točka pripadnog tranzistora ide u zasićenje i on djeluje kao uključena sklopka te na izlazu sklopa vrijedi $Y = U_{CEzas} = 0,126$ V (logička 0).



$$T = 2N2222, R_{B1} = R_{B2} = 10 \text{ k}\Omega, R_C = 1 \text{ k}\Omega$$

Slika 2.23: Logički NLI sklop u tranzistorskoj tehnici [Izvor: autorski rad]

Tablica 2.4: Naponska stanja NLI sklopa

A (V)	B (V)	Y (V)
0	0	5
0	5	0,126
5	0	0,126
5	5	0,126



3

POGLAVLJE

OSNOVNI LOGIČKI SKLOPOVI

Nakon ovog poglavlja moći ćete:

- odrediti primjenu brojevnih sustava i kodiranja
- objasniti logička svojstva i simbole osnovnih logičkih sklopova
- objasniti algebarske izraze i tablice stanja osnovnih logičkih sklopova.

3.1. Brojevni sustavi

3.1.1. Rimski i dekadski brojevni sustav

Rimski brojevi koriste drukčiji sustav za predstavljanje brojeva u usporedbi s dekadskim (decimalnim) brojevima koji su danas široko prihvaćeni u većini svijeta. Rimski brojevi koriste ograničen broj znakova za predstavljanje brojeva i imaju nekoliko pravila o tome kako se ti znakovi slažu da bi predstavili različite vrijednosti. Evo osnovnih rimskih znakova i njihovih vrijednosti:

I – 1

V – 5

X – 10

L – 50

C – 100

D – 500

M – 1000.

Pravila za pisanje rimskih brojeva:

kada manji broj ide ispred većeg broja, oduzima se:

IV = 4 jer je ($V - I = 5 - 1 = 4$);

kada manji broj ide iza većeg broja, dodaje se:

VII = 7 jer je ($V + II = 5 + 2 = 7$).

Isti znak ne smije se ponavljati više od tri puta zaredom, npr. XXX = 30 ($10 + 10 + 10$). Ima iznimaka za ovu zadnju pravilnost, posebno kod viših brojeva.

Dekadski sustav, koji se danas najčešće koristi, temelji se na deset brojki (0 – 9) i poziciji svake brojke (jedinice, desetice, stotine, tisućice itd.) kako bi se stvorile različite vrijednosti. Ovaj sustav omogućuje mnogo preciznije i jednostavnije matematičke operacije, za razliku od rimskog sustava koji nije bio prikladan za matematičke izračune. Rimski su brojevi više korišteni za označavanje rednih brojeva (I, II, III, IV itd.) i u povijesnim i arhitektonskim kontekstima, nego za izračune i matematiku.

Primjer 3.1.

Raščlani broj 275 na stotice, desetice i jedinice.

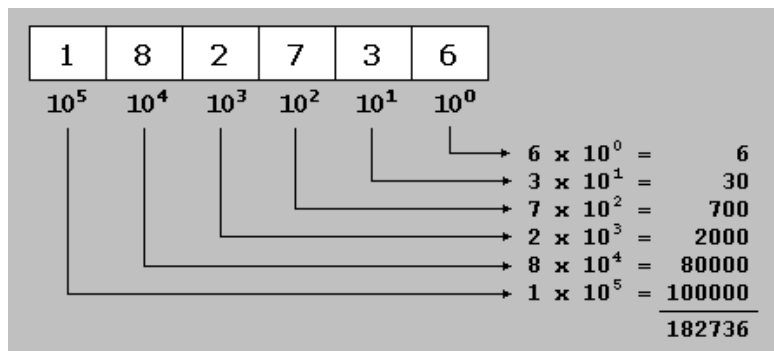
Rješenje:

Broj 275 nije ekvivalentan $2 + 7 + 5$, već se može raščlaniti kao $200 + 70 + 5$:

$$\begin{array}{r} 200 \\ + 70 \\ + 5 \\ \hline 275 \end{array}$$

i stoga je prvi znak 2 ekvivalent 200 (2×100), drugi znak 7 ekvivalent je 70 (7×10) te, naposljetku, zadnji znak odgovara vrijednosti 5 (5×1).

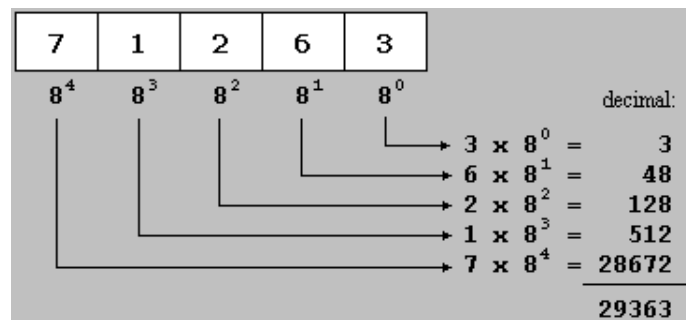
Za predstavljanje dekadskih vrijednosti može se pretpostaviti da je svaka znamenka produkt sebe same pomnožene s 10^x , gdje x odgovara mjestu na kojemu se znamenka nalazi, počevši od desna s 10^0 , iza kojega slijedi 10^1 , 10^2 , itd. (slika 3.1).



Slika 3.1: Dekadski brojevni sustav [Izvor: autorski rad]

3.1.2. Oktalni i heksadekadski brojevni sustav

Kao što dekadski brojevni sustav ima bazu 10, oktalni brojevni sustav uključuje samo znamenke od 0 do 7 pa je stoga baza sustava 8. Razmotrimo na primjeru sa slike 3.2 pretvorbu oktalnog broja 71263 u dekadski broj 29363.



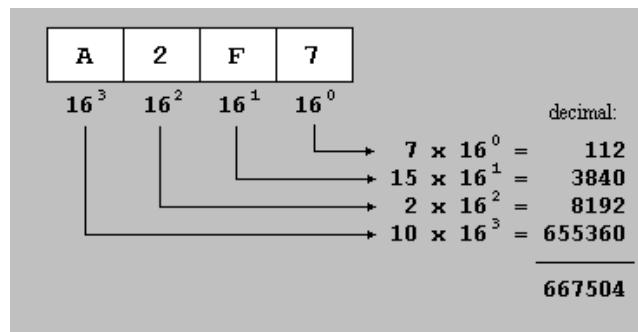
Slika 3.2: Pretvorba oktalnog broja u dekadski [Izvor: autorski rad]

Kao što dekadski brojevi imaju 10 različitih znamenki za prezentaciju, i oktalni brojevi imaju 8, heksadekadski brojevi imaju 16 različitih znamenki: brojeve od 0 do 9 i slova A, B, C, D, E i F koja služe za predstavljanje 16 različitih potrebnih simbola, tablica 3.1.

Tablica 3. 1: Heksadekadski brojevni sustav

hexadecimal	decimal	hexadecimal	decimal
0	0	0x8	8
0x1	1	0x9	9
0x2	2	0xA	10
0x3	3	0xB	11
0x4	4	0xC	12
0x5	5	0xD	13
0x6	6	0xE	14
0x7	7	0xF	15

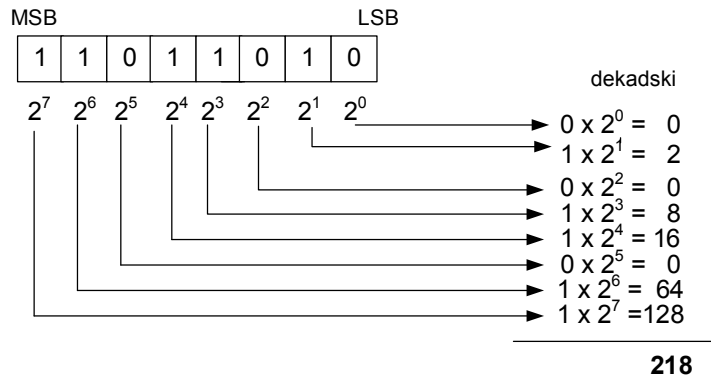
Na slici 3.3 prikazan je primjer pretvorbe heksadekadskog broja A2F7 u dekadski broj 667504.



Slika 3.3: Pretvorba heksadekadskog u dekadski broj [Izvor: autorski rad]

3.1.3. Binarni brojevni sustav

Binarni sustav koristi se za predstavljanje informacija unutar računala, kao što su brojevi, znakovi, slike, zvukovi i mnoge druge vrste podataka. Računalni procesori koriste binarni sustav za obradu podataka, a digitalni uređaji, poput hardverskih i softverskih komponenti, komuniciraju putem niza binarnih signala. Binarni brojevni sustav jest sustav koji se koristi za predstavljanje brojeva pomoću samo dviju znamenki: 0 i 1. Jedna se binarna znamenka naziva **bit**, što je skraćeno od engleskih riječi *binary digit*. Na slici 3.4 prikazan je primjer pretvorbe binarnog broja 11011010 u dekadski broj 218.



Slika 3.4: Pretvorba binarnog u dekadski broj [Izvor: autorski rad]

Također, u binarnome nizu bitan je redoslijed bitova, kratica LSB (eng. *Least Significant Bit*) označava **bit najmanjeg značaja** a MSB (eng. *Most Significant Bit*) označava **bit najvećeg značaja**. Oktalni i heksadekadski brojevi imaju veliku prednost u svijetu bitova pred decimalnim brojevima, još pogotovo time što su njihove baze (8 i 16) potencije broja 2 (2^3 i 2^4), što omogućava lakšu konverziju u binarni sustav. Za pretvorbu binarnog broja u oktalni potrebno je samo razdvojiti binarne vrijednosti u grupe od tri člana počevši s desna na lijevo:

11 011 010

te ih nadalje prevesti u bazu po 8 i to svaku grupu zasebno:

11 011 010

3 3 2

što za rezultat daje broj 332. Za pretvorbu u heksadekadski sustav potrebno je istim procesom razdvojiti binarne brojeve u grupe od četiri člana s desna na lijevo:

1101 1010

D A

i rezultat je heksadekadski broj 0xDA. Kako se danas računala temelje na bajtovima sastavljenim od 8 binarnih bitova, što se najpogodnije predstavlja heksadekadskim brojevima, heksadekadski kod specijalno je zanimljiv u računalskoj znanosti. Kada se sa skupinom od četiriju bitova radi kao s cjelinom, često se koristi naziv **nibl** (*nibble*).

Pretvaranje dekadskoga broja u binarni najlakše je napraviti preko ostataka dijeljenja s 2.

Primjer 3.2.

Broj **57** pretvori u binarni broj.

Rješenje:

57 : 2 = 28

1

28 : 2 = 14

0

14 : 2 = 7

0

7 : 2 = 3

1

3 : 2 = 1

1

1 : 2 = 0

1

Sada rezultat dobijemo tako što čitamo ostatke dijeljenja **odozdo** prema **gore** (↑), 111001 (binarno), 57 (dekadski).

Na opisani način možemo prikazati pozitivne cijele brojeve u binarnom sustavu. Problem predstavlja prikaz negativnih cijelih brojeva. Kako bismo prikazali negativne cijele brojeve, koristit ćemo komplement binarnog broja. Običan komplement binarnoga broja (komplement jedinice) dobije se zamjenom svih jedinica nulom, i obratno. Primjerice, za binarni broj

1101 imamo sljedeći komplement 0010. Običan komplement nije pogodan za izražavanje cijelih brojeva, jer nije jednoznačno određena vrijednost nule. Naime, običan komplement od 0000 iznosi 1111 i samim time 0 nije jednoznačno određena. Običan komplement poslužit će za jednostavno izračunavanje punoga komplementa za prikaz negativnih brojeva. Pun komplement ili komplement dvojke izračuna se tako da se najprije izračuna običan komplement pa mu se doda jedinica. Komplement dvojke omogućuje jednoznačno određivanje nule pa je stoga izabran za predstavljanje cijelih brojeva, a ne običan komplement.

Primjer 3.3.

Izračunajte puni komplement za brojeve 6 i 0 u 8-bitnoj notaciji.

Rješenje:

komplement dvojke broja 6:

<u>00000110</u>	+ 6
1111001	običan komplement od + 6
+ 1	dodaj 1
<u>1111010</u>	- 6 u komplementu dvojke

komplement dvojke broja 0:

<u>0000000</u>	0
1111111	običan komplement od 0
+ 1	dodaj 1
<u>0000000</u>	0 u komplementu dvojke

U navedenom primjeru punoga komplementa od 0, jedinica predstavlja deveti bit i stoga se u 8-bitnom sustavu odbacuje pa rezultat opet predstavlja nulu.

3.1.4. ASCII i Unicode

Na svojim nižim razinama računala rade na principu nula i jedinica. Upotrebom sekvenci nula i jedinica računalo obrađuje brojeve u binarnom sustavu. Nadalje, ne postoji tako evidentan način za predstavljanje slova nulama i jedinicama te se iz te svrhe ukazala potreba za upotrebom specifičnih kodova kao što je ASCII (eng. *American Standard Code for Information Interchange*) kod. ASCII kod je tablica, odnosno lista koja sadrži sva slova abecede i još veliku većinu dodatnih znakova, u kojoj je svaki znak predstavljen nekim slijedom brojeva. Na primjer, ASCII kod za predstavljanje velikog slova „A“ uvijek se predstavlja brojem 65, koji se pak lako prikazuje upotrebom nula i jedinica u binarnoj notaciji (1000001). Standardan ASCII kod definira kodove za 128 znakova. Prva 32 znaka su kontrolni kodovi koji se ne mogu tiskati, a ostalih 96 mogu, tablica 3.2.

Tablica 3. 2: Osnovni ASCII kod

*	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
0	NUL	SOH	STX	ETX	EOT	ENQ	ACK	BEL	BS	TAB	LF	VT	FF	CR	SO	SI
1	DLE	DC1	DC2	DC3	DC4	NAK	SYN	ETB	CAN	EM	SUB	ESC	FS	GS	RS	US
2		!	"	#	\$	%	&	'	()	*	+	,	-	.	/
3	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	:	;	<	=	>	?
4	@	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
5	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	[\]	^	_
6	`	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o
7	p	q	r	s	t	u	v	w	x	y	z	{		}	~	

Ova tablica organizirana je na način da se iz nje mogu znakovi lako iščitati u heksadekadskom sustavu:

- brojevi redaka predstavljaju prvu znamenku
- brojevi stupaca predstavljaju drugu znamenku.

Na primjer, znak „A“ postavljen je u četvrtome retku i prvome stupcu te se kao heksadekadski broj predstavlja 0x41 (65). Kao dodatak 128 standardnom ASCII kodu, većina uređaja imaju dodatnih 128 znakova koji formiraju prošireni ASCII kod (koji idu od 128 do 255). Ovaj prošireni ASCII skup znakova zavisn je o platformi, što znači da varira od jednoga uređaja do drugoga ili pak među različitim operativnim sustavima. Najčešće upotrebljavani prošireni ASCII skup znakova jesu OEM i ANSI. Također, u cilju standardizacije razvijen je Unicode standard za razmjenu podataka usmjeren na prikaz slova na način neovisan o jeziku, računalnom programu ili računalnoj platformi. Unicode koristi 16 bitova za prikaz znakova, što omogućuje ukupno $2^{16} = 65536$ znakova. Dio Unicode znakova može se naći u tablici 3.3, a više o samom kodu na poveznici <https://www.unicode.org/standard/standard.html>.

Tablica 3. 3: Dio Unicode tablice

Unicode	Znak	Oktalno	Heksa	Značenje
U+003A	:	58	072	dvije točke
U+003B	;	59	073	točka zarez
U+003C	<	60	074	manje
U+003D	=	61	075	jednako
U+003E	>	62	076	veće

Unicode	Znak	Oktalno	Heksa	Značenje
U+003F	?	63	077	upitnik
U+0040	@	64	0100	pri (eng. at)
U+0041	A	65	0101	veliko slovo A
U+0042	B	66	0102	veliko slovo B
U+0043	C	67	0103	veliko slovo C
U+0044	D	68	0104	veliko slovo D
U+0045	E	69	0105	veliko slovo E

3.2. Logički sklopovi

Logički sklopovi temelje se na primjeni Booleove algebre. Ova algebra predstavlja sustav teorema koji koriste simboličku logiku da bi opisali skupove elemenata i odnose među njima, a naziv je dobila prema engleskom matematičaru Georgeu Booleu (1815.-1864.). Kod primjene ove logike podaci mogu imati samo dva stanja: točno T (engl. *true*) i netočno F (engl. *false*). Na osnovi ovoga definiran je binarni brojevni sustav.

3.2.1. Sklop NE

Najjednostavniji logički sklop obavlja logičku operaciju NE (eng. *NOT*) koja se još naziva negacija ili inverzija, a opisana je algebarskim izrazom:

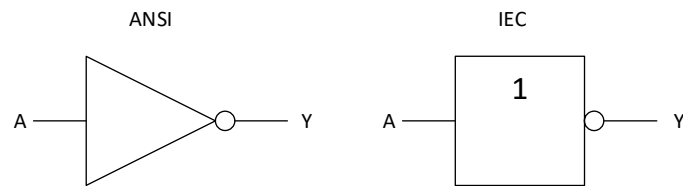
$$Y = \bar{A}.$$

Jednadžba 3.1: Logička operacija negacije

Ovaj sklop na izlazu daje suprotno stanje od onoga na ulazu sklopa. U tablici 1. dana su logička stanja sklopa NE, a simboli na slici 3.5 prema ANSI (eng. *American National Standards Institute*) i IEC (eng. *International Electrotechnical Commission*) standardima.

Tablica 3. 4: Logička stanja NE sklopa

A	Y = \bar{A}
0	1
1	0



Slika 3.5: Simboli NE sklopa [Izvor: autorski rad]

3.2.2. Sklop I

Logički sklop I (eng. *AND*) obavlja algebarsku operaciju konjunkcije koja se još može nazvati i logičko množenje, a dana je algebarskim izrazom:

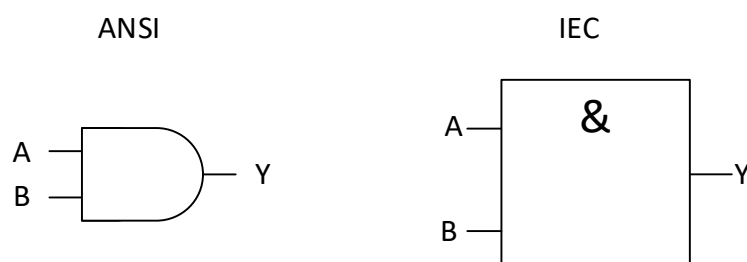
$$Y = A \cdot B.$$

Jednadžba 3.2: Logička operacija konjunkcije

Ovaj sklop na izlazu daje stanje 1 samo ako su svi ulazi u stanju 1, a može biti izveden s dva ili s više ulaza. U tablici 3.5 dana su logička stanja sklopa I, a simboli na slici 3.6.

Tablica 3. 5: Logička stanja I sklopa

A	B	Y=A · B
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1



Slika 3.6: Simboli logičkog I sklopa [Izvor: autorski rad]

3.2.3. Sklop ILI

Logički sklop ILI (eng. *OR*) obavlja algebarsku operaciju disjunkcije koja se još može nazvati i logičko zbrajanje, a dana je algebarskim izrazom:

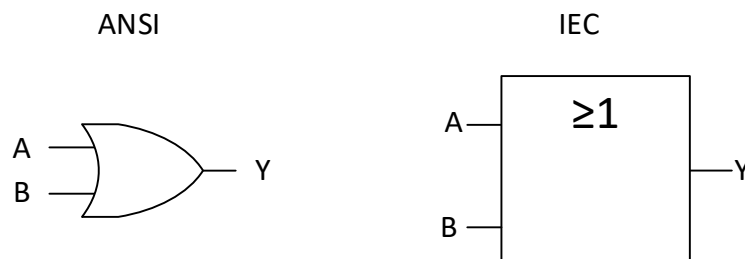
$$Y = A + B.$$

Jednadžba 3. 3: Logička operacija disjunkcije

Ovaj sklop na izlazu daje stanje 1 ako je bilo koji od ulaza u stanju 1, a može biti izveden s dvama ili s više ulaza. U tablici 3.6 dana su logička stanja sklopa ILI, a simboli na slici 3.7.

Tablica 3. 6: Logička stanja ILI sklopa

A	B	Y = A + B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1



Slika 3.7: Simboli logičkog ILI sklopa [Izvor: autorski rad]

3.2.4. Sklop NI

Spajanjem logičkog sklopa I sa sklopom NE dobije se logički sklop NI (eng. *NAND*). Ovaj sklop obavlja logičku operaciju NI koja je dana algebarskim izrazom:

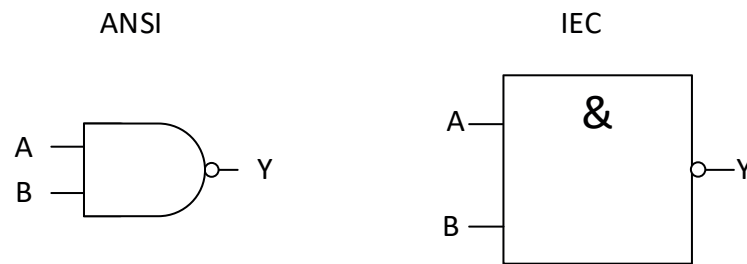
$$Y = \overline{A \cdot B}.$$

Jednadžba 3. 4: Logička operacija NI

Ovaj sklop na izlazu daje stanje 1 ako je na bilo kojem ulazu stanje 0, a ako su svi ulazi u stanju 1, na izlazu daje stanje 0. Sklop NI može biti izveden s dvama ili s više ulaza i u tablici 3.7 dana su logička stanja sklopa NI, a simboli na slici 3.8.

Tablica 3. 7: Logička stanja NI sklopa

A	B	Y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0



Slika 3.8: Simboli NI sklopa [Izvor: autorski rad]

3.2.5. Sklop NILI

Spajanjem logičkog sklopa ILI sa sklopom NE dobije se logički sklop NILI (eng. *NOR*). Ovaj sklop obavlja logičku operaciju NILI koja je dana algebarskim izrazom:

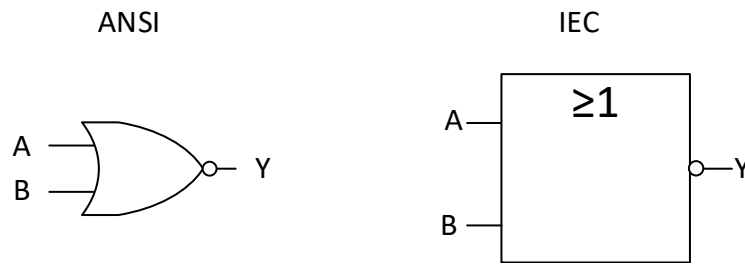
$$Y = \overline{A + B}.$$

Jednadžba 3. 5: Logička operacija NILI

Ovaj sklop na izlazu daje stanje 0 ako je na bilo kojem ulazu stanje 1, a ako su svi ulazi u stanju 0, na izlazu daje stanje 1. Sklop NILI može biti izveden s dvama ili s više ulaza i u tablici 3.8 dana su logička stanja sklopa NI, a simboli na slici 3.9.

Tablica 3. 8: Logička stanja NILI sklopa

A	B	Y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0



Slika 3.9: Simboli NILI sklopa [Izvor: autorski rad]

3.2.6. Sklop XOR

Logički sklop ekskluzivno ILI (eng. *XOR*) dobiven je kombinacijom ILI, I i NE sklopova, kako je prikazano na slici 3.10. Ovaj sklop obavlja logičku operaciju XOR koja je dana algebarskim izrazom:

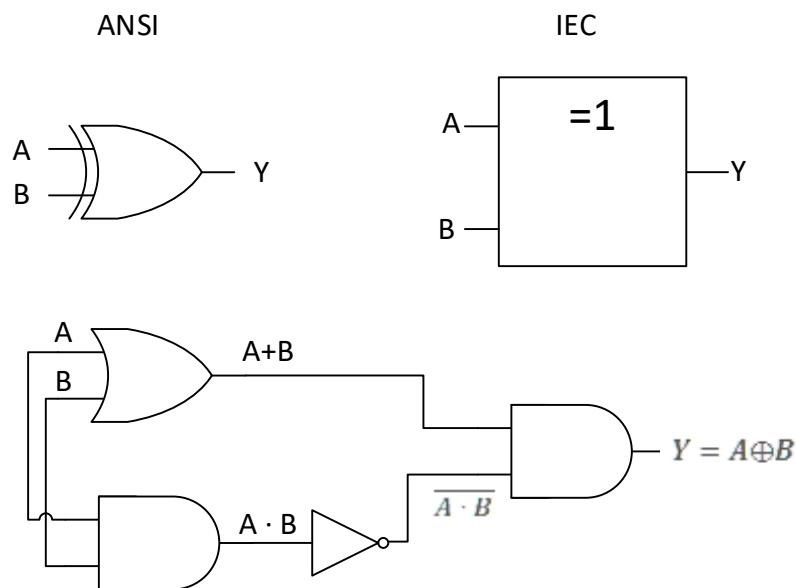
$$Y = (A + B) \cdot \overline{A \cdot B} = A \oplus B.$$

Jednadžba 3. 6: Logička operacija XOR

XOR sklop na izlazu daje stanje 0 ako su oba ulaza u stanju 0 ili stanju 1, a ako je jedan od ulaza u stanju 0 i drugi u stanju 1, tada je na izlazu sklopa stanje 1. Logički sklop XOR može biti izveden s dvama ili s više ulaza i u tablici 3.9 dana su logička stanja XOR sklopa, a simboli i izvedba na slici 3.10.

Tablica 3. 9: Logička stanja XOR sklopa

A	B				Y
0	0	0	0	1	0
0	1	1	0	1	1
1	0	1	0	1	1
1	1	1	1	0	0



Slika 3.10: Simboli i izvedba logičkog sklopa XOR [Izvor: autorski rad]

3.2.7. Sklop XNOR

Kada na izlaz XOR sklopa spojimo NE sklop, dobijamo XNOR sklop. Ovaj sklop obavlja logičku operaciju XNOR koja je dana algebarskim izrazom:

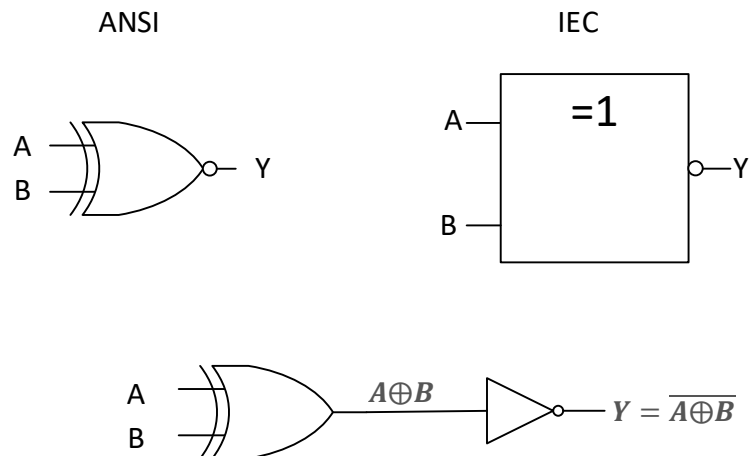
$$Y = \overline{A \oplus B}.$$

Jednadžba 3. 7: Logički izraz XNOR sklopa

XNOR sklop na izlazu daje stanje 1 ako su oba ulaza u stanju 0 ili stanju 1, a ako je jedan od ulaza u stanju 0 i drugi u stanju 1, tada je na izlazu sklopa stanje 0. Logički sklop XNOR može biti izveden s dvama ili s više ulaza i u tablici 3.10 dana su logička stanja XNOR sklopa, a simboli i izvedba na slici 3.11.

Tablica 3. 10: Logička stanja XNOR sklopa

A	B	Y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	1



Slika 3.11: Simboli i izvedba logičkog sklopa XNOR [Izvor: autorski rad]

3.3. Minimizacija logičkih izraza i sklopova

Postupci minimizacije logičkih izraza koriste se kako bi se pojednostavnili složeni logički izrazi, čime se olakšava analiza i implementacija logičkih funkcija. Minimizacija logičkih izraza ima za cilj smanjiti broj operatora i varijabli u izrazu, što olakšava analizu, implementaciju i optimizaciju logičkih funkcija. Ovisno o složenosti izraza i preferencijama, različiti postupci mogu biti primijenjeni za postizanje željenih rezultata. U tablici 3.11 dana su pravila za minimizaciju logičkih izraza.

Tablica 3. 11: Pravila za pojednostavljivanje logičkih izraza

1.	komutativnost	$A + B = B + A$	$A \cdot B = B \cdot A$
2.	asocijativnost	$(A + B) + C = A + (B + C)$	$(A \cdot B) \cdot C = A \cdot (B \cdot C)$
3.	distributivnost	$A \cdot (B + C) = A \cdot B + A \cdot C$	$A + (B \cdot C) = (A + B) \cdot (A + C)$
4.	neutralni element	$A + 0 = A$ $A + A = A$	$A \cdot 1 = A$ $A \cdot A = A$
5.	komplementarnost	$A + \bar{A} = 1$	$A \cdot \bar{A} = 0$
6.	De Morganovi zakoni	$\overline{(A + B)} = \bar{A} \cdot \bar{B}$	$\overline{(A \cdot B)} = \bar{A} + \bar{B}$
7.	involutivnost (idempotentnost negacije)	$\bar{\bar{A}} = A$	
8.	anihilacija	$A + 1 = 1$	$A \cdot 0 = 0$
9.	apsorpcija	$A \cdot (A + B) = A$	$A + A \cdot B = A$

Primjer 3.4.

Pojednostavni logički izraz: $Y = A \cdot B + A \cdot \bar{B} + A \cdot C + C$.

Rješenje:

$$Y = A \cdot B + A \cdot \bar{B} + A \cdot C + C$$

$$= A \cdot (B + \bar{B}) + A \cdot C + C \text{ (distributivnost, komplementarnost)}$$

$$= A \cdot 1 + A \cdot C + C \text{ (neutralni element)}$$

$$= A \cdot (1 + C) + C \text{ (distributivnost, anihilacija)}$$

$$= A \cdot 1 + C \text{ (neutralni element)}$$

$$= A + C$$

Primjer 3.5.

Pojednostavni logički izraz: $Y = (A + B) \cdot C + (A + D) \cdot C$.

Rješenje:

$$Y = (A + B) \cdot C + (A + D) \cdot C$$

$$= A \cdot C + B \cdot C + A \cdot C + D \cdot C \text{ (distributivnost)}$$

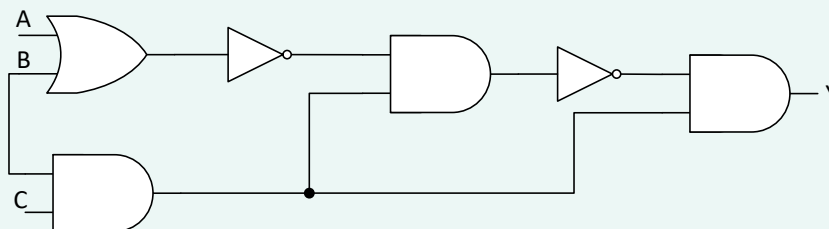
$$= A \cdot C + A \cdot C + B \cdot C + D \cdot C \text{ (komutativnost)}$$

$$= A \cdot C + B \cdot C + D \cdot C \text{ (neutralni element)}$$

$$= (A + B + D) \cdot C$$

Primjer 3.6.

Za sklop prikazan na slici napiši logički izraz, tablicu stanja, pojednostavni logički izraz te nacrtaj pojednostavljeni sklop i napiši njegovu tablicu stanja.



Rješenje:

Logički izraz:

$$Y = A + B \cdot B \cdot C \cdot B \cdot C$$

Tablica stanja:

A	B	C	Y
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	1
1	0	0	0
1	0	1	0
1	1	0	0
1	1	1	1

Minimizacija:

$$Y = A + B \cdot B \cdot C \cdot B \cdot C$$

$$= A \cdot B \cdot B \cdot C \cdot B \cdot C \text{ (De Morganovo pravilo)}$$

$$= 0 \cdot B \cdot C \text{ (komplementarnost)}$$

$$= B \cdot C$$

Rezultat minimizacije predstavlja logički I sklop.



A	B	Y = A · B
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1



4

POGLAVLJE

SKLOPOVI S TRANZISTORIMA

Nakon ovog poglavlja moći ćete:

- analizirati način rada, svojstva i primjenu tranzistora te obrazložiti rezultate mjerenja na tranzistorskim pojačalima u simulacijskom programu i/ili u stvarnim uvjetima
- izraditi tranzistorsko pojačalo prema projektnom zadatku uz interpretaciju rezultata izmjerenih i izračunatih električnih vrijednosti
- izračunati električne vrijednosti u statičkoj analizi i pojačanja pojačala u dinamičkoj analizi
- izraditi oscilator i stabilizator napona prema projektnom zadatku te analizirati način rada i primjenu tranzistora kod oscilatora i stabilizatora.

4.1. Tranzistorska pojačala

Tranzistorska pojačala projektiraju se tako da za rezultat daju pojačanje napona, struje ili snage signala. Pojačanje (eng. *gain*) A općenito je odnos izlazne vrijednosti prema odgovarajućoj ulaznoj vrijednosti. Električni signal koji se pojačava (ulazni) može biti strujni ili naponski pa je i pojačani (izlazni) signal također strujni ili naponski. Idealni strujni ili naponski izvor predaju trošilu konstantnu struju ili napon, neovisno o iznosu otpora koji je spojen na izlazu pojačala. Idealno strujno ili naponsko pojačalo ovisni je idealni strujni ili naponski izvor u izlaznom krugu koji je upravljani strujom ili naponom. Pri tomu faktori strujnog pojačanja A_i i naponskog pojačanja A_v ne ovise o otporu trošila i frekvenciji signala, a da bi signal bio pojačan, moraju biti veći od jedinice. Ulazni otpor u idealno strujno pojačalo jest $R_{ul} = 0$, a izlazni je otpor $R_{iz} = \infty$, dok je kod idealnog naponskog pojačala ulazni otpor $R_{ul} = \infty$, a izlazni otpor $R_{iz} = 0$ (Kovačević, 2010).

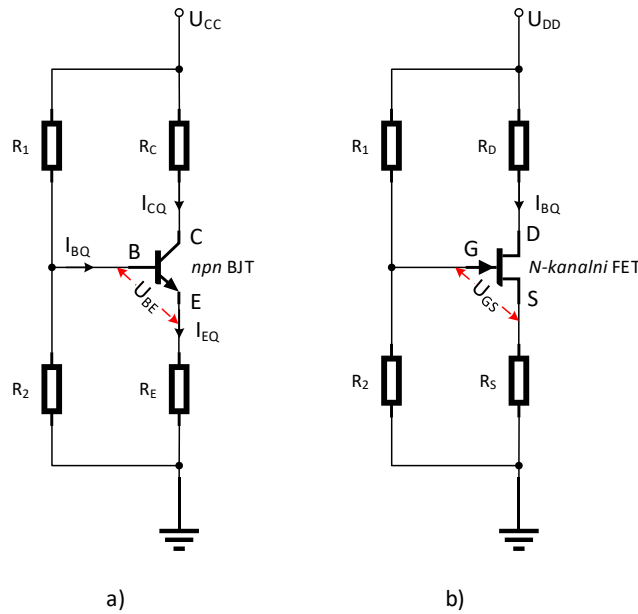
Kada je korisni signal slab, on se najprije pojačava pomoću pojačala malog signala. Takvi se uređaji mogu realizirati kao sklopovi s bipolarnim tranzistorima (eng. *bipolar junction transistors*) i kao sklopovi s unipolarnim tranzistorima (eng. *field effect transistors*), ili kao kombinacija obaju tipova komponenti. Navedena se pojačala izvode u diskretnom obliku ili kao integrirani krugovi. Opseg frekvencija unutar kojeg se signal može pojačati ovisi o tome jesu li kondenzatori uključeni u projektirani sklop pojačala i o kapacitetima koji su bitni samim tranzistorima.

Da bi do izražaja došlo pojačavajuće djelovanje aktivnih komponenata, moraju se pod djelovanjem istosmjernih napona i struja dovesti do odgovarajućeg radnog područja. Kako je snaga sadržana u izlaznom signalu u pravilu osjetno veća od snage ulaznog signala, unutar bloka pojačala mora se crpiti neka dodatna snaga. To je istosmjerna snaga dobivena iz istosmjernog izvora potrebnog za izbor položaja statičke radne točke. Dio te snage troši se za održavanje tranzistora u radnom području i za toplinske gubitke, a ostatak se troši za povećanje nivoa naponskog ili strujnog signala.

4.1.1. Izbor položaja statičke radne točke pojačala

Prvi korak pri projektiranju i analizi pojačala određivanje je statičkih uvjeta rada pojačala. Mreža za postavljanje statičkih uvjeta sadržava istosmjerni izvor i pasivne komponente kao što su otpornici i kondenzatori koji „okružuju“ tranzistor. Time se omogućuje postavljanje potrebnih istosmjernih nivoa na tranzistoru, odnosno definiranju statičke radne točke. Treba također voditi računa da zbog prevelikih istosmjernih nivoa struja ne prijeđe prag u najvećeg iznosa dopuštene snage. U dinamičkim uvjetima svojstva pojačala ovise o izboru radne točke (Kovačević, 2010).

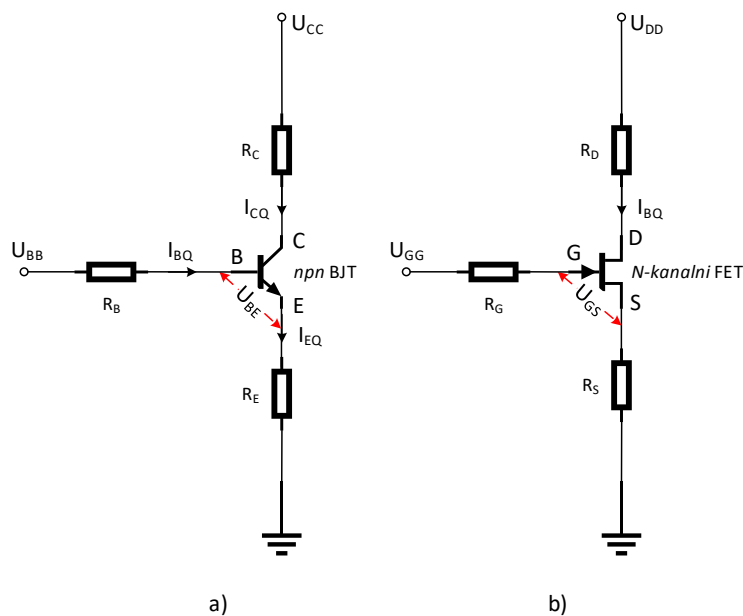
Za određivanje statičkih radnih uvjeta odabrat ćemo tipičnu izvedbu kruga pojačala s bipolarnim tranzistorima, koja sadrži naponski djelitelj na ulazu i emitterski otpornik, prikazan na slici 4.1.



Slika 4.1: Krug za postavljanje statičkih uvjeta rada a) bipolarnih tranzistora, b) unipolarnih tranzistora [Izvor: autorski rad]

Naponskim dijeljenjem otpornika R_1 i R_2 određuju se potrebni prednaponi. Otpor R_E poboljšava stabilnost statičke radne točke, ali se uz porast ulaznog otpora smanjuje naponsko i strujno pojačanje.

Za određeni napon napajanja U_{CC} i odabir otpornika R_1 , R_2 i R_E , postavljanje radne točke Q znači određivanje vrijednosti U_{CEQ} , I_{CQ} i $I_{BQ} = I_{CQ}/h_{FE}$ pa se zbog toga može slika 4.1 pojednostavniti uvođenjem Theveninovog ekvivalenta, koje je prikazano na slici 4.2.



Slika 4.2: Theveninovi ekvivalenti [Izvor: autorski rad]

gdje je:

$$R_B = \frac{R_1 * R_2}{R_1 + R_2} \quad \text{i} \quad U_{BB} = U_{CC} * \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

Jednadžba 4.1

Primjeni li se *II Kirchhoffov zakon* na ulazni krug, vrijedi:

$$U_{BB} = R_B * I_B + U_{BE} + R_E * I_E.$$

Jednadžba 4.2

Kako je $I_E = I_B + I_C$, a za rad u aktivnom području rada je $I_C = h_{FE} * I_B$, dobije se nakon uvrštavanja u gornju relaciju:

$$U_{BB} - U_{BE} = R_B * I_B + R_E * (I_B + h_{FE} * I_B).$$

Jednadžba 4.3

Za zadane parametre istosmjernih napona, otpora i odabranog tranzistora statička radna točka određena je vrijednostima bazne struje:

$$I_B = I_{BQ} = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B + (1 + h_{FE}) * R_E}.$$

Jednadžba 4.4

Kolektorske struje:

$$I_C = I_{CQ} = h_{FE} * I_{BQ}$$

Jednadžba 4.5

I napona kolektor – emiter prema *II Kirchhoffovom zakonu* za izlazni krug ujedno je i jednadžba statičkog radnog pravca:

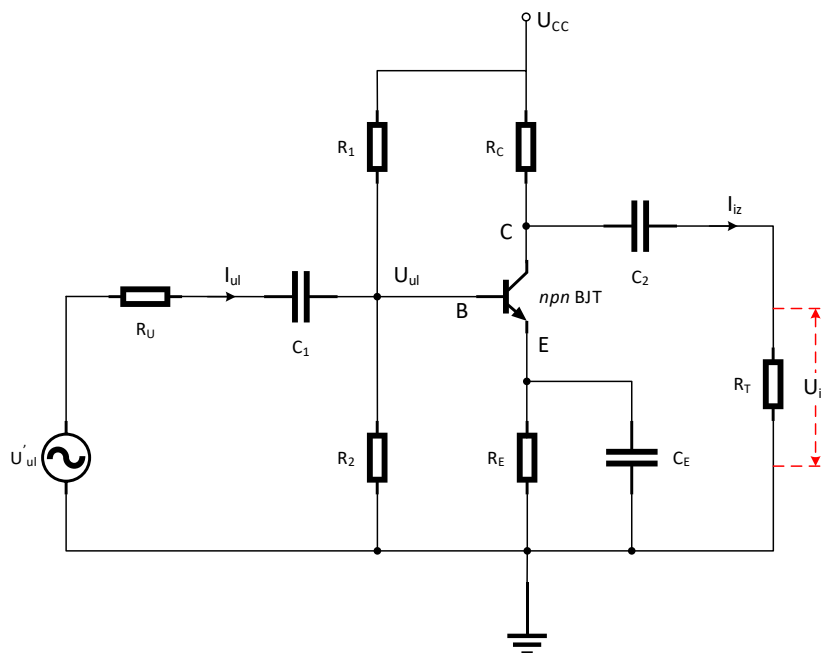
$$U_{CE} = U_{CEQ} = U_{CC} - R_C * I_C - R_E * (I_B + I_C).$$

Jednadžba 4.6

4.1.1.1. Modeli pojačala

Kada se žele analizirati dinamički uvjeti, uz djelovanje izmjeničnih signala, može se javiti problem nelinearnosti koju unosi tranzistor. Nelinearnost se odražava na izobličenje pojačanog signala pa se time gubi korisnost pojačanja. Želimo li konstruirati linearno pojačalo, njegov rad moramo ograničiti na rad u uvjetima malog signala, tako da se ukupno radno područje tranzistora točno ograniči na aktivno područje. Ekvivalentni modeli, bez obzira na nivo složenosti, uvijek sadržavaju određenu aproksimaciju. Njihova upotrebljivost je limitirana na određeno područje rada s obzirom na očekivane opsege promjena električnih veličina kao što su struja, napon, snaga, frekvencija, otpor (Kovačević, 2010).

Navest ćemo neke od modela pojačala za male signale. Oni vrijede za male promjene ulazno – izlaznih varijabli. Razmotrimo kako će se superponirati izmjenična komponenta na postojeće istosmjerne radne uvjete. Postupak ćemo opisati na primjeru pojačala sa zajedničkim emiterom, prikazanog na slici 4.3.



Slika 4.3: Pojačalo sa zajedničkim emiterom [Izvor: autorski rad]

Izmjenični generator prikazuje se kao ekvivalentni idealni naponski izvor U'_{ul} sa serijskim spojenim unutarnjim otporom R_u . Najjednostavniji način superponiranja izmjenične komponente jest da se serijski izmjeničnom izvoru spoji vezni, odnosno blokirajući kondenzator C_1 . Svrha mu je da onemogući djelovanje istosmjerne veze generatora i pojačala. Kondenzator predstavlja otvoreni krug za istosmjernu struju pa dodavanje izmjeničnog izvora neće imati utjecaja na radnu točku Q , odnosno na postavljene istosmjerne uvjete. Ako se uzme dovoljno velika vrijednost kapaciteta, kapacitivna reaktancija može biti dovoljno mala za očekivani opseg frekvencija, tako da se kondenzator ponaša kao kratki spoj za izmjenične signale koji je generiran s izvora U'_{ul} .

Može se zaključiti da izmjenični izvor pribraja izmjeničnu komponentu postojećim strujama i naponima tranzistora. Pojačalo općenito na izlazu može biti opterećeno nekim trošilom R_T , koje je također kapacitivno spregnuto na pojačalo kondenzatorom C_2 . Paralelno emitterskom otporniku vezuje se dodatni kondenzator C_E visokog kapaciteta. Njegova je uloga da kratko spoji emitterski otpor za izmjenični signal pa je u izmjeničnim uvjetima emiter uzemljen. Time je sačuvano djelovanje emitterskog otpornika u smislu stabilizacije radne točke, a istovremeno je izbjegnuto smanjivanje pojačanja.

Model s h -parametrima

Model s h -parametrima predstavlja tranzistor kao sklop s 4 stezaljke (četveropol, eng. *four terminal network*) koji nam omogućuje veću točnost u proračunu pojačanja. Ovim se modelom povezuju ulazni i izlazni naponi i struje preko odgovarajućih jednadžbi četveropola. Model s *hibridnim* ili h -parametrima često se primjenjuje u analizi tranzistora. Koeficijenti hibridnih parametara u jednadžbama općenito su:

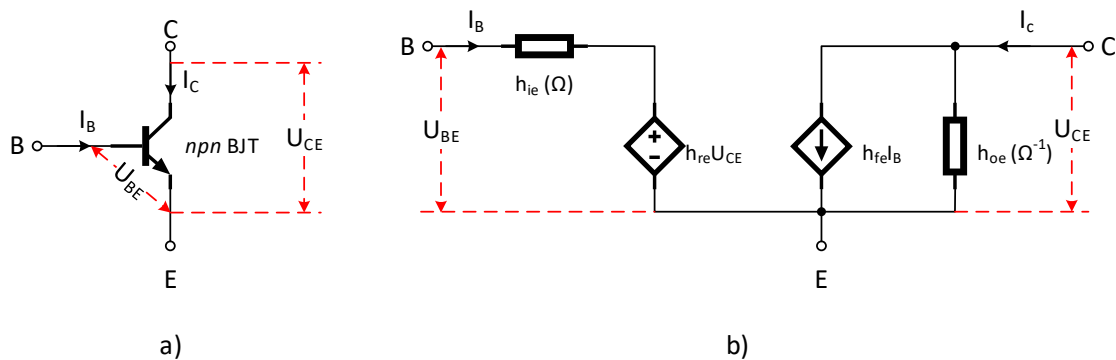
$$U_{ul} = h_{11} * I_{ul} + h_{12} * U_{iz}$$

Jednadžba 4.7

$$I_{iz} = h_{21} * I_{ul} + h_{22} * U_{iz}$$

Jednadžba 4.8

Simbol bipolarnog tranzistora i njegov hibridni model u spoju sa zajedničkim emiterom (ZE) prikazan je na slici 4.4. Na slici je prikazan model: $U_{ul} = U_{BE}$, $U_{iz} = U_{CE}$, $I_{ul} = I_B$, $I_{iz} = -I_C$, a parametri hibridnog modela su: $h_{11} = h_{ie}$, $h_{12} = h_{re}$, $h_{21} = h_{fe}$, $h_{22} = h_{oe}$. Oznaka „e” u h -parametrima ukazuje da se parametri odnose na tranzistor u spoju zajedničkog emitera.



Slika 4.4: a) Bipolarni tranzistor, b) njegov model s h -parametrima [Izvor: autorski rad]

Iz pokusa praznog hoda i kratkog spoja definiraju se h -parametri:

$$h_{ie} = \left. \frac{U_{BE}}{I_B} \right|_{U_{CE}=0} \quad (\Omega) \text{ je ulazni otpor kratkog spoja}$$

Jednadžba 4.9

$$h_{re} = \left. \frac{U_{BE}}{U_{CE}} \right|_{I_B=0} \quad \text{je inverzno naponsko pojačanje otvorenog kruga}$$

Jednadžba 4.10

$$h_{fe} = \left. \frac{I_C}{I_B} \right|_{U_{CE}=0} \quad \text{je strujno pojačanje kratkog spoja}$$

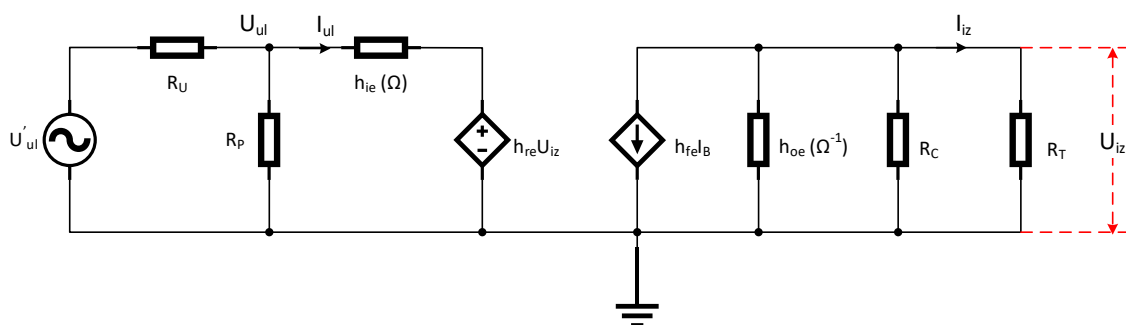
Jednadžba 4.11

$$h_{oe} = \left. \frac{I_C}{U_{CE}} \right|_{I_B=0} \quad (\Omega^{-1}) \text{ je izlazna vodljivost otvorenog kruga}$$

Jednadžba 4.12

Diferencijalni koeficijenti za odabranu radnu točku jesu h -parametri, a mogu se odrediti iz karakteristika tranzistora ili su navedeni u katalogima za pripadne tranzistore.

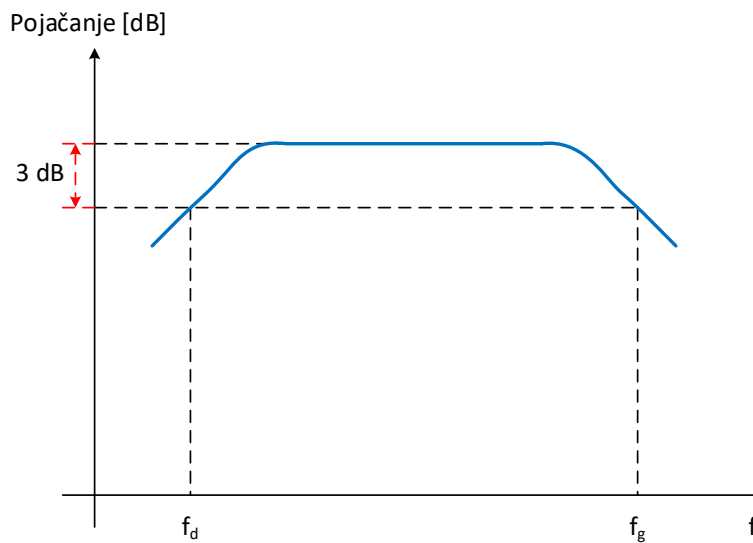
Ako se u ekvivalentni izmjenični krug ubaci h -parametarski model, dobije se krug koji je prikazan na slici 4.5.



Slika 4.5: Tranzistorska ZE pojačala s h -parametarskim modelom tranzistora [Izvor: autorski rad]

4.1.1.2. Frekvencijski odziv

Frekvencijski odziv važna je karakteristika svakog pojačala. U analizi je često potrebno odrediti frekvencijski odziv pojačala. Taj se odziv određuje kao funkcija ovisnosti izlazne amplitude i faze o frekvenciji za sve frekvencije ulaznih signala. Posebno je od interesa poznavanje *propusnog pojasa pojačala*, koji se definira kao opseg frekvencija za koje se dobije najveći iznos pojačanja. Propusni je pojas ograničen *gornjom graničnom frekvencijom* (f_g) i *donjom graničnom frekvencijom* (f_d). Granične se frekvencije definiraju kao frekvencije na kojem naponsko pojačanje opadne za ili 3 dB, u odnosu na najveću vrijednost. Na slici 4.6 prikazan je tipični frekvencijski odziv pojačala.



Slika 4.6: Frekvencijski odziv pojačala [Izvor: autorski rad]

Pojačanje i frekvencija obično su prikazani u logaritamskoj skali umjesto u linearnoj skali i to radi preglednosti u prikazu karakteristika. Osim toga, naponsko pojačanje (A_U), strujno pojačanje (A_I) i pojačanje snage (G) u praksi se obično izražavaju u decibelima (dB), pri čemu je:

$$A_U = 20 \log \frac{U_{iz}}{U_{ul}} \quad (dB) \quad ; \quad A_I = 20 \log \frac{I_{iz}}{I_{ul}} \quad (dB) \quad ; \quad G = 10 \log \frac{P_{iz}}{P_{ul}} \quad (dB).$$

Jednadžba 4.13

4.1.1.3. Mjerenje parametara pojačala

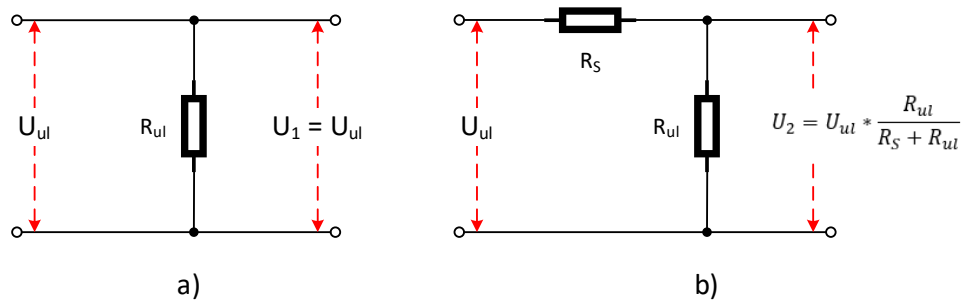
Ulazni otpor

Ulazni otpor je:

$$R_{ul} = \frac{U_{ul}}{I_{ul}}$$

Jednadžba 4.14

Ulazni se otpor određuje indirektnim mjerenjima, temeljem mjerenja dvaju napona. Pomoćni otpornik R_S spaja se serijski na ulaz pojačala, čime ostvarujemo odgovarajući pad napona na ulaznom naponu. Zato je potrebno izvesti dva mjerenja prema slici 4.7:



Slika 4.7: Indirektno mjerenje ulaznog napona [Izvor: autorski rad]

Napon na ulaznom otporu prije uključivanja otpora R_S na shemi a) napon je U_1 , a s priključenim serijskim otpornikom izmjereni je napon U_2 na shemi b). Obje izmjerene vrijednosti povezuje relacija:

$$U_2 = U_1 * \frac{R_{ul}}{R_S + R_{ul}}$$

Jednadžba 4.15

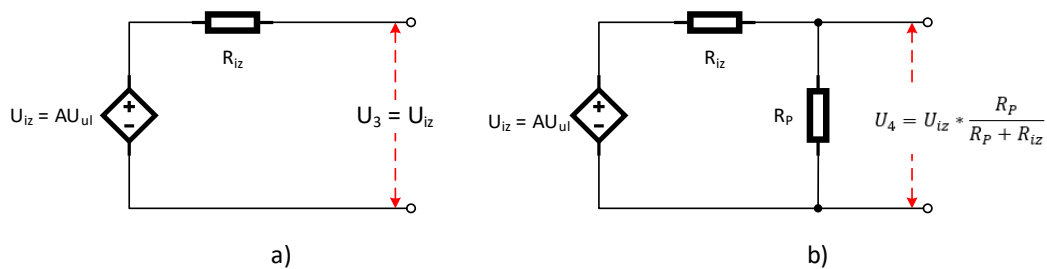
Za poznate vrijednosti izmjerenih napona U_1 i U_2 i serijskog otpora R_S , temeljem gornje relacije može se odrediti ulazni otpor.

$$R_{ul} = R_S * \frac{U_2}{U_1 - U_2} = \frac{R_S}{\frac{U_1}{U_2} - 1}$$

Jednadžba 4.16

Izlazni otpor

Ranije je navedeno da se izlazni otpor može odrediti kao omjer napona otvorenog kruga i struje kratkog spoja. Budući da mjerenje u uvjetima kratkog spoja može biti opasno po elemente pojačala, unutarnji otpor može se odrediti tako da se izlaz pojačala optereti otpornikom poznate vrijednosti R_p . Potrebno je izvršiti dva mjerenja prema slici 4.8 tako da bi se mogao odrediti Theveninov ekvivalent U_{iz} i R_{iz} .



Slika 4.8: Indirektno mjerenje izlaznog otpora [Izvor: autorski rad]

Obje izmjerene vrijednosti povezuje relacija:

$$U_4 = U_{iz} * \frac{R_p}{R_p + R_{iz}}$$

Jednadžba 4.17

Za poznate vrijednosti izmjerenih napona U_3 i U_4 i poznavanje paralelnog otpora R_p , temeljem gornje relacije može se odrediti izlazni otpor:

$$R_{iz} = R_p * \frac{U_3 - U_4}{U_4} = R_p * \left(\frac{U_3}{U_4} - 1 \right).$$

Jednadžba 4.18

4.1.2. Sklopovi pojačala s bipolarnim tranzistorima

Za pojačanje struje (eng. *current gain*), napona (eng. *voltage gain*) i snage (eng. *power gain*) koriste se pojačala s bipolarnim tranzistorima. Pojačala se razlikuju u trima osnovnim spojevima, ovisno o tome koja je od elektroda tranzistora zajednička ulaznom i izlaznom krugu. Ti spojevi su:

- pojačalo u spoju zajedničkog emitera (eng. *common – emitter amplifier*)
- pojačalo u spoju zajedničkog kolektora (eng. *common – collector amplifier*)
- pojačalo u spoju zajedničke baze (eng. *common – base amplifier*).

Naponsko i strujno pojačanje i ulazni i izlazni otpori osnovna su značajka pojačala, kao i frekvencijsko područje rada i fazni odnosi signala ulaza i izlaza pojačala (Paunović, 2000).

Strujno pojačanje A_i omjer je izlazne struje pojačala i_{iz} , odnosno struja koja teče kroz otpor trošila i ulazne struje i_{ul} .

$$A_i = \frac{i_{iz}}{i_{ul}} \quad A_i = 20 \log \frac{i_{iz}}{i_{ul}} [dB]$$

Jednadžba 4.19

Naponsko pojačanje A_u omjer je izlaznog napona u_{iz} , tj. izmjenični napon na otporu tereta) i ulaznog napona u_{ul} .

$$A_u = \frac{u_{iz}}{u_{ul}} \quad A_u = 20 \log \frac{u_{iz}}{u_{ul}} [dB]$$

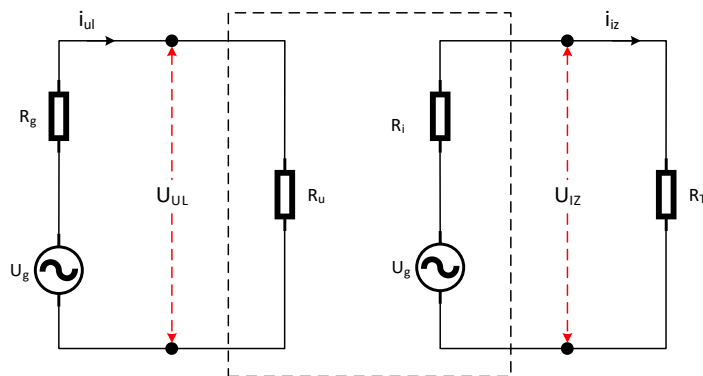
Jednadžba 4.20

Pojačanje snage A_p omjer je izlazne snage P_{iz} koja se dobije na otporu trošila i privedene snage signala na ulazu P_{ul} .

$$A_p = \frac{P_{iz}}{P_{ul}} \quad A_p = 10 \log \frac{P_{iz}}{P_{ul}} [dB]$$

Jednadžba 4.21

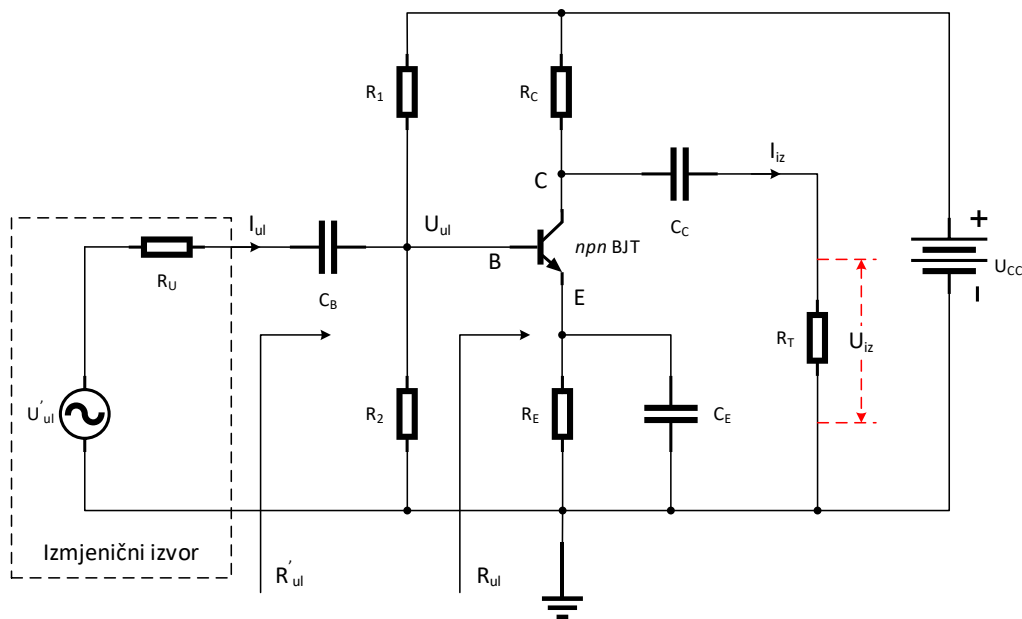
Pojačanje pojačala iz praktičnih razloga izražava se u decibelima [dB].



Slika 4.9: Osnovne značajke naponskog pojačala [Izvor: autorski rad]

4.1.2.1. Pojačalo u spoju zajedničkog emitera

Kod pojačala u spoju zajedničkog emitera (eng. *common – emitter amplifier*) emitterski je dio kruga zajednički za ulazni i izlazni dio pojačala (Kovačević, 2010), prikazano na slici 4.10.



Slika 4.10: Pojačalo sa zajedničkim emiterom [Izvor: autorski rad]

Do pomicanja položaja radne točke pojačala dolazi zbog mogućnosti neželjene promjene iznosa napona napajanja i zbog temperature. Spajanjem otpornika R_E u krug emitera postićemo stabilniju radnu točku pojačala. Umjesto otpornika R_B , struju baze određuje otporno dijelilo R_1 i R_2 , prikazano na slici 4.2.

Temperaturna stabilnost sklopa ovisi o odnosu otpora R_C/R_E , kao i o R_1 i R_2 . Ulazni izmjenični napon prikazan je u obliku ekvivalentnog naponskog izvora, koje još zovemo i Theveninov ekvivalent, koji zamjenjuje mrežu na koju je pojačalo priključeno ili prethodni stupanj

složenog uređaja. Pojačani izlazni izmjenični napon U_{iz} napon je na otporu trošila R_T . Otpor R_T može prikazivati ulaznu impedanciju u sljedeći stupanj u kaskadi pojačala. Kondenzatori C_B , C_C i C_E određeni su tako da predstavljaju kratki spoj za najmanje frekvencije koje su od interesa, a s druge strane blokiraju istosmjerne napone i struje da prijeđu iz jednog dijela kruga u drugi. Budući da onemogućuju međusobnu spregu pojedinih dijelova kruga, ovi se kondenzatori zovu vezni (eng. *coupled*) ili blokirajući. Kondenzator za premošćivanje (eng. *bypass*) C_E , dovoljno velikog kapaciteta, premošćuje otpornik R_E . Izmjenična struja teče kroz kondenzator C_E pa je zanemariv pad napona na otporu emitera. Time je omogućeno pojačanje pojačala.

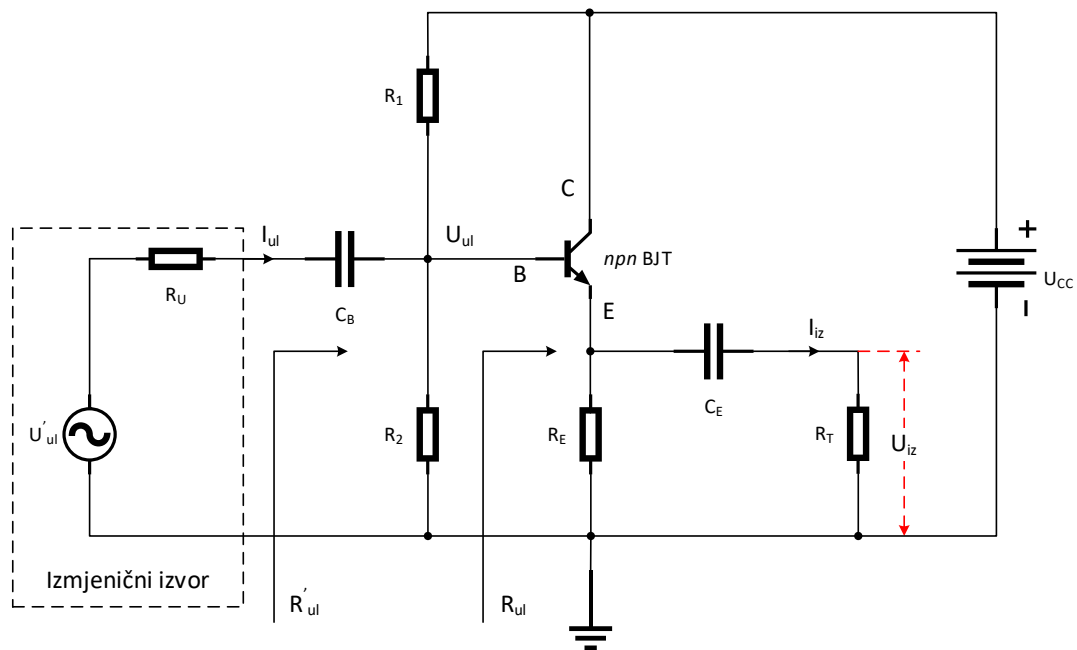
Temeljem poznavanja elemenata ekvivalentnog kruga za male izmjenične signale mogu se izračunati bitni parametri pojačala R_{ul} , R_{iz} , A_V i A_I . Dobiveni se rezultati mogu usporediti s onima koji su rezultat mjerenja pripadnih veličina za iste radne uvjete.

Spoj zajedničkog emitera ima svojstvo inverzije izlaznog napona u odnosu na ulazni signal pa su strujno i naponsko pojačanje negativni. Iznos strujnog i naponskog pojačanja može biti značajno velik pa se spoj sa zajedničkim emiterom može upotrijebiti i za pojačanje snage. Spoj sa zajedničkim emiterom najpogodniji je za izvedbu strujnog pojačala, jer mu strujno pojačanje ne ovisi značajno o otporu priključenog trošila, a to je bitna karakteristika strujnog pojačala. Naponsko pojačanje raste s porastom otpora trošila, dakle ovisi o trošilu, što ga udaljava od svojstva idealnog naponskog pojačala. Ulazni je otpor malen i opada s porastom otpora trošila, a izlazni je otpor velik i opada s porastom unutarnjeg otpora generatora na ulazu pojačala.

Primjer tipične uporabe pojačala u spoju zajedničkog emitera u univerzalnim je sklopovima za naponsko i strujno pojačanje u niskofrekvencijskom i visokofrekvencijskom području.

4.1.2.2. Pojačalo u spoju zajedničkog kolektora

Pojačalo u spoju zajedničkog kolektora (eng. *common – collector amplifier*) zove se još i emitersko slijedilo (naponsko slijedilo). Navedeno pojačalo ima kolektor kao zajednički krug za ulazni i izlazni dio pojačala (Kovačević, 2010), prikazano na slici 4.11.



Slika 4.11: Pojačalo sa zajedničkim kolektorom [Izvor: autorski rad]

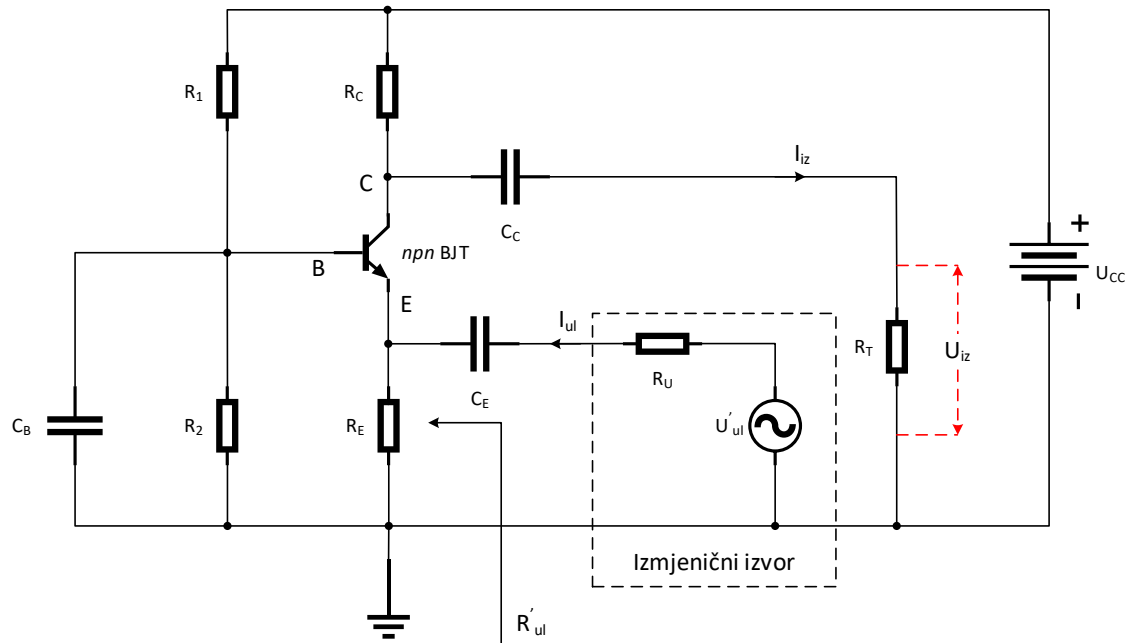
Kolektor je spojen izravno na kolektorski istosmjerni napon, što znači da je uzemljen za izmjenični signal. Vrijednosti otpornika R_1 , R_2 i R_E određuju se za statičke uvjete. Vezni kondenzatori C_B i C_E odabiru se dovoljno velikima da predstavljaju kratki spoj za najniže frekvencije ulaznog signala. Izlazni se napon uzima s trošila R_T . Naponsko pojačanje u spoju zajedničkog kolektora pojačala pozitivno je i približno jednako jedinici, s tim da nikada ne prelazi jedan. Promjena napona na ulazu izaziva gotovo jednaku promjenu napona na izlazu pojačala. Izlazni napon „slijedi“ promjene ulaznog napona s jednakom fazom pa se naziva još i emitorsko slijedilo. S druge strane, strujno je pojačanje pozitivno i puno veće od jedinice, jer je $R'_{ul} \gg R_T$.

Ulazni otpor u spoju zajedničkog kolektora može biti vrlo velik, veći od spoja zajedničke baze i emitera, a izlazni otpor vrlo malen, manji nego u zajedničke baze i emitera. To je svojstvo temeljno korisno svojstvo pojačala u spoju zajedničkog kolektora koje omogućuje njegovu uporabu kao međustupnja, odnosno izolacijskog pojačala. Uloga mu je da međusobno izolira dva kruga, primjerice kada se izvor velikog otpora želi priključiti na trošilo manjeg otpora. U biti, ova vrsta spoja omogućuje elektroničku transformaciju otpora (impedancije). Bez gubitaka napona transformira veliki ulazni na mali izlazni otpor. To znači da emitorsko slijedilo ne opterećuje izvor signala kada mu se na izlazu priključi impedancija male vrijednosti.

Primjer tipične uporabe pojačala u spoju zajedničkog kolektora ulazna su niskofrekvencijska pojačala i izolacijska pojačala (transformator impedancije).

4.1.2.3. Pojačalo u spoju zajedničke baze

Pojačalo u spoju zajedničke baze (eng. *common - base amplifier*) ima bazu kao zajednički krug za ulazni i izlazni dio pojačala (Kovačević, 2010), prikazano na slici 4.12.



Slika 4.12: Pojačalo sa zajedničkom bazom [Izvor: autorski rad]

Vrijednosti otpornika R_1 , R_2 , R_E i R_C određuju se za statičke uvjete. Kondenzatori C_B , C_C i C_E odabiru se dovoljno velikima da predstavljaju kratki spoj za najniže frekvencije ulaznog signala koje su od interesa. Izlazni se napon uzima s kolektora uzduž trošila R_T .

Izlazna (kolektorska) struja manja je od ulazne (emitorske) struje za malu struju baze pa je strujno pojačanje α uvijek malo manje od jedinice. Pojačalo prima ulaznu struju pri malo impedanciji i daje praktički jednaku izlaznu struju ($A_i \approx 1$) na velikoj impedanciji. Zbog toga se pojačalo sa zajedničkom bazom ponekad zove i strujno slijedilo. Zbog visokog izlaznog otpora sklopa struja kroz priključeno trošilo ne ovisi o otporu trošila pa se pojačalo sa zajedničkom bazom može smatrati idealnim ovisnim strujnim izvorom. Naponsko je pojačanje pozitivno (ulazni i izlazni naponi su u fazi) i veće je od jedinice. Kako izlazna struja ne ovisi o otporu trošila, moguće je izborom velikog otpora trošila ostvariti velika naponska pojačanja, što se temelji na velikoj razlici dinamičkih otpora ulaznog i izlaznog kruga. U spoju sa zajedničkom bazom ulazni otpor vrlo je malen u odnosu na prethodna dva spoja. Izlazni otpor kod spoja sa zajedničkom bazom vrlo je velik za razliku od prethodnih dvaju spojeva.

Kapacitet kolektor - baza ne opterećuje izvor signala pa ovaj sklop, za razliku od prethodnih spojeva, ima vrlo veliku gornju graničnu frekvenciju.

Primjeri tipične uporabe pojačala u spoju zajedničke baze u sklopovima su oscilatora i visokofrekvencijskim pojačalima.

4.1.3. Sklopovi pojačala s unipolarnim tranzistorima

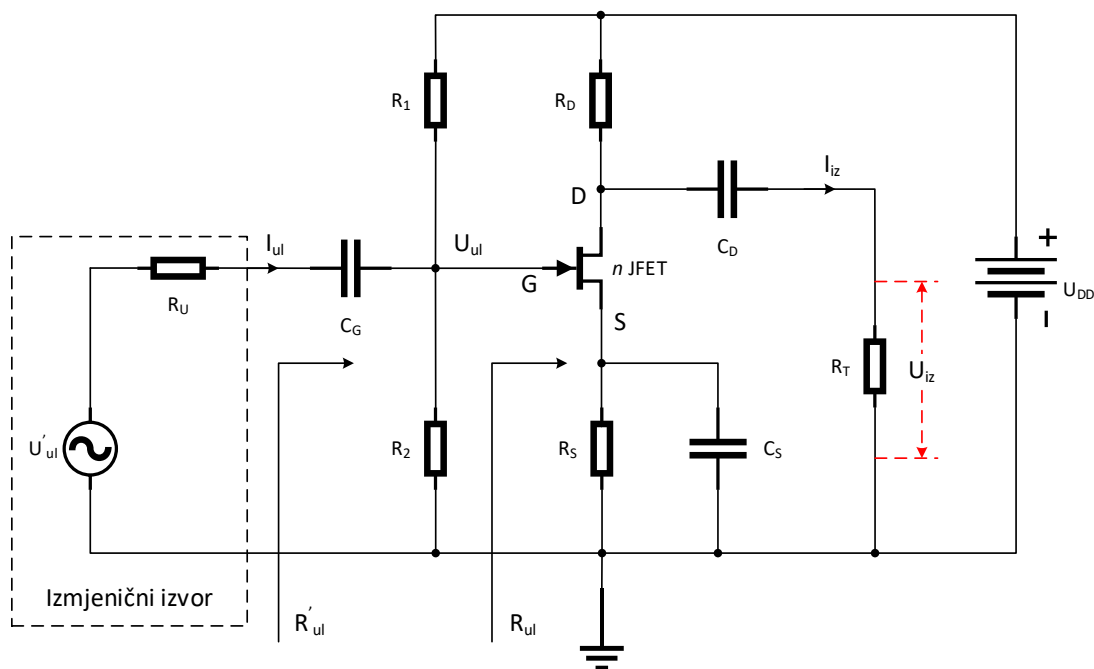
Kao i kod pojačala s bipolarnim tranzistorima, temeljni sklopovi pojačala s FET-ovima ime-
nuju se po elektrodi koja djeluje kao zajednička referentna točka za ulazni i izlazni napon-
ski signal (Paunović, 2000). Spojevi pojačala s unipolarnim tranzistorima su:

- pojačalo u spoju zajedničkog uvoda (eng. *common – source amplifier*)
- pojačalo u spoju zajedničkog odvoda (eng. *common – drain amplifier*)
- pojačalo u spoju zajedničke upravljačke elektrode (eng. *common – gate amplifier*).

Razmatrat će se temeljni spojevi sa spojnim n -kanalnim FET-ovima (JFET), a veći dio za-
ključka može se primijeniti i na spojevima s MOSFET pojačalima.

4.1.3.1. Pojačalo u spoju zajedničkog uvoda

Pojačalo u spoju zajedničkog uvoda (eng. *common – source amplifier*) ima uvod kao zajed-
nički krug za ulazni i izlazni dio pojačala (Kovačević, 2010), prikazano na slici 4.13.



Slika 4.13: Pojačalo s JFET-om u spoju zajedničkog uvoda [Izvor: autorski rad]

Otporima R_1 , R_2 , R_S i R_D određena je statička radna točka. Kondenzatori C_G , C_D i C_S moraju se odabrati dovoljno velikima da djeluju kao kratki spoj i za najmanju vrijednost frekvencije ulaznog signala koja je u radnom području sklopa. Otpornik R_S ima ulogu stabilizatorskog djelovanja, što znači da smanjuje rasipanja položaja statičke radne točke. Otpornik isto-
vremeno izaziva i pad naponskoga pojačanja. Kondenzator C_S paralelno je spojen otpor-
niku R_S koji kratko spaja izmjenični signal. Ulazna impedancija kod unipolarnih tranzistora

vrlo je velika ($R_{ul} \gg$). Ulazni otpor u pojačalu određen je otporima kojima se definiraju prednaponi u istosmjernim uvjetima:

$$R'_{ul} = \frac{R_1 * R_2}{R_1 + R_2}$$

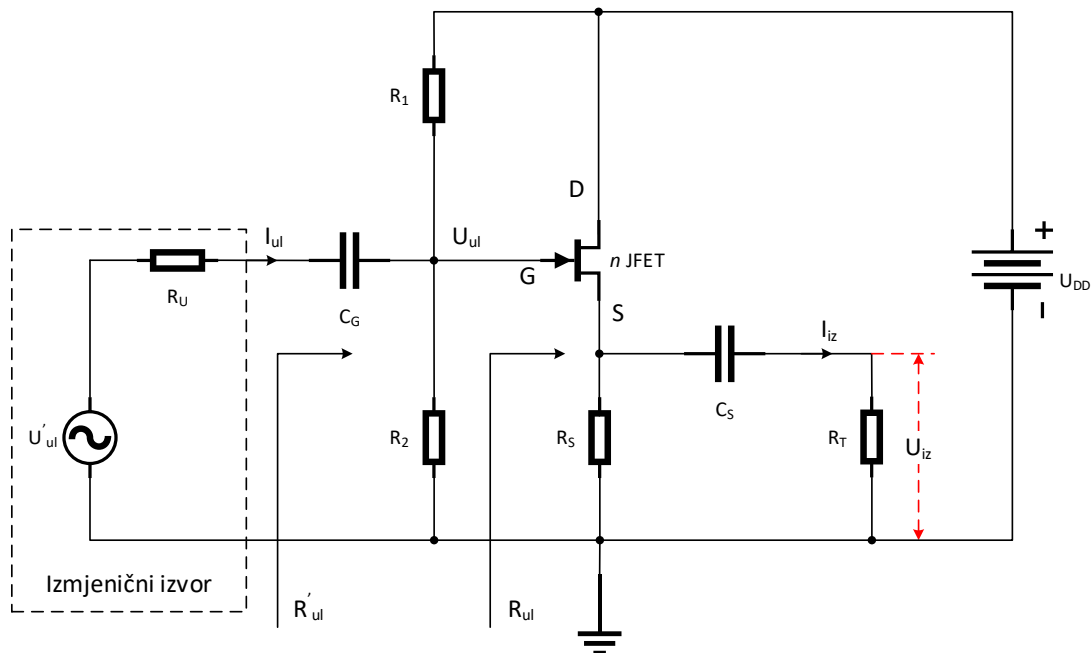
Jednadžba 4.22

Odgovarajućim vrijednostima otpora R_1 i R_2 mogu se postići vrlo visoke vrijednosti ulaznog otpora. Naponsko je pojačanje negativno i veće je od jediničnoga, raste s porastom otpora trošila i sklop okreće fazu za 180° . Uz to, i strujno pojačanje može biti vrlo veliko, što ukazuje na mogućnost pojačanja snage.

Primjeri tipične uporabe pojačala u spoju zajedničkog uvoda u uobičajenim su sklopovima za naponsko i strujno pojačanje u niskofrekvencijskom i visokofrekvencijskom području.

4.1.3.2. Pojačalo u spoju zajedničkog odvoda

Pojačalo u spoju zajedničkog odvoda (eng. *common - drain amplifier*) ima odvod kao zajednički krug za ulazni i izlazni dio pojačala (Kovačević, 2010), prikazano na slici 4.14.



Slika 4.14: Pojačalo s JFET-om u spoju zajedničkog odvoda [Izvor: autorski rad]

Otpor trošila R_T u krugu je uvoda. Odvod je spojen izravno na istosmjerni napon pa je odvod za izmjenični signal uzemljen. Otporima R_T , R_2 i R_S određena je statička radna točka. Vezni

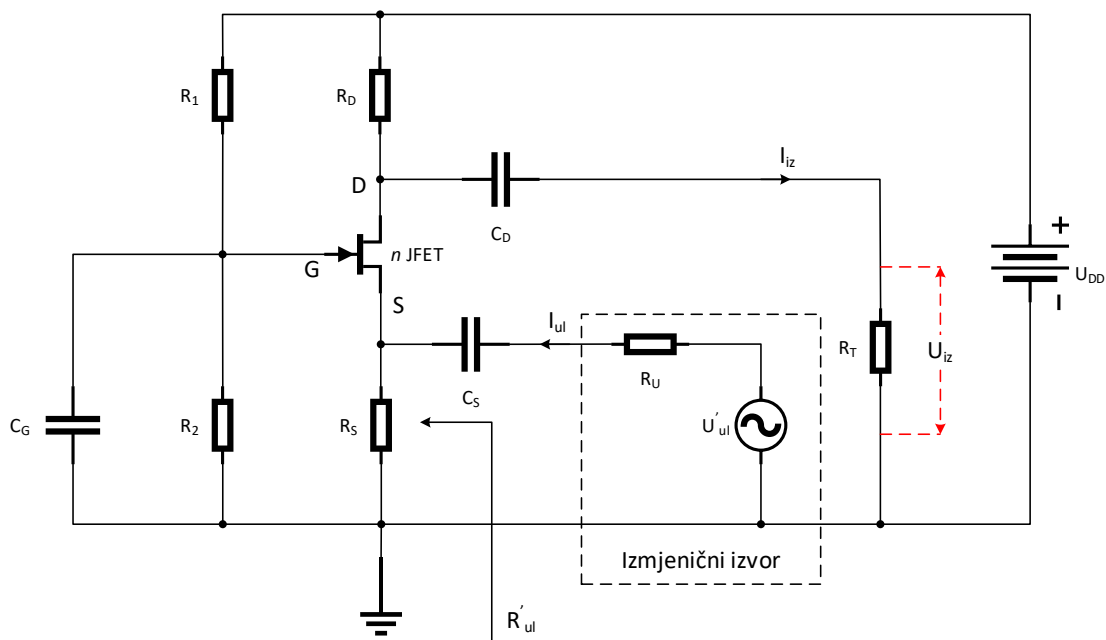
kondenzatori C_G i C_S moraju imati dovoljno veliku vrijednost da djeluju kao kratki spoj i za najmanju frekvenciju ulaznog signala.

U većini slučajeva ovaj je tip pojačala $A_V \approx 1$ tj. $U_{iz} \approx U_{ul}$. Može se kazati da napon na trošilu „slijedi“ ulazni napon pa se spoj sa zajedničkim odvodom zove i odvodno slijedilo. Ulazni je otpor u spoju zajedničkog odvoda velik, a izlazni otpor malen. Ovo se pojačalo koristi kao izolacijsko pojačalo za povezivanje visokootpornog izvora s niskootpornim trošilom, uz zanemariv gubitak naponskog signala. Svojstva su mu slična kao i bipolarnom pojačalu u spoju zajedničkog kolektora, odnosno emitterskog slijedila. Strujno pojačanje može biti vrlo veliko.

Primjeri tipične uporabe pojačala u spoju zajedničkog odvoda u predpojačalima su i izolacijskim pojačalima (transformatori impedancije).

4.1.3.3. Pojačalo u spoju zajedničke upravljačke elektrode

Pojačalo u spoju zajedničke upravljačke elektrode (eng. *common – gate amplifier*) ima upravljačku elektrodu kao zajednički krug za ulazni i izlazni dio pojačala (Kovačević, 2010), prikazano na slici 4.15.



Slika 4.15: Pojačalo s JFET-om u spoju zajedničke upravljačke elektrode [Izvor: autorski rad]

Otpor trošila R_T spojen je na krug odvoda. Zajednička upravljačka elektroda uzemljena je za izmjenični signal preko kondenzatora C_G . Otporima R_1 , R_2 , R_S i R_D određena je statička radna točka. Kondenzatori C_D i C_S moraju se odabrati dovoljno velikim da djeluju kao kratki spoj za sve frekvencije ulaznog signala za koje je predviđen rad pojačala.

Naponsko je pojačanje pozitivno i raste s otporom trošila. Strujno pojačanje manje je od jedan. Ulazni je otpor vrlo malen u odnosu na spoj sa zajedničkim uvodom i odvodom, dok je izlazni otpor vrlo velik u odnosu na prethodna dva spoja.

Primjeri tipične uporabe pojačala u spoju zajedničke upravljačke elektrode u sklopovima su za mjerne svrhe i antenskim pojačalima s prilagođenje snage.

4.1.4. Kaskadna pojačala

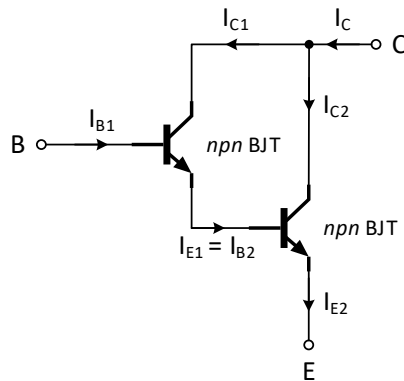
Temeljni sklopovi s bipolarnim i unipolarnim tranzistorima često daju ograničene rezultate naponskih i strujnih pojačanja. Ako je faktor pojačanja jednog pojačala nedovoljan za zahtijevanu primjenu, mogu se dvije ili više takvih komponenti međusobno povezati pa se ukupni faktor pojačanja dobije množenjem pojedinačnih. Od najveće je praktične važnosti poseban način spajanja pojedinih blokova (stupnjeva), poznat kao *kaskadni spoj* sastavljen od nekoliko sukcesivnih stupnjeva jednakih ili različitih blokova (Kovačević, 2010).

Kaskadni spoj realizira se na sljedeći način: generator izmjeničnog signala priključuje se na ulaz prvog stupnja, a izlaz prvog stupnja spojen je na ulaz drugog stupnja. Izlazne stezaljke drugog stupnja priključuju se na ulazne stezaljke sljedećeg stupnja itd., do n -tog stupnja u općem obliku. Zadnji (izlazni) stupanj spojen je na trošilo. Pri tomu su izlazni naponi i struje jednog stupnja istovremeno ulazne veličine drugog stupnja, a opteretni otpor jednog stupnja ulazni je otpor drugog stupnja. Svi stupnjevi priključeni su na zajednički istosmjerni izvor koji im osigurava položaj statičke radne točke u linearnom području. Kada su u kaskadi *pnp* i *nnp* tranzistori ili n -kanalni i p -kanalni FET-ovi, potreban je i dodatni istosmjerni izvor suprotnog polariteta.

U praksi se koristi veći broj tipova kaskadnih pojačala s izmjeničnom ili istosmjernom vezom. Primjerice, izmjenično *emitorski spregnuto pojačalo* jest pojačalo s dvama stupnjevima u kojemu jedan tranzistor radi u spoju zajedničkog kolektora, a drugi u spoju zajedničke baze.

4.1.4.1. Darlingtonov spoj

Specijalna vrsta vrlo često korištenog kaskadnog spoja s istosmjernom vezom je *Darlingtonov spoj*. Posebnim spajanjem dvaju tranzistora dobije se u biti jedan tranzistor s vrlo velikim strujnim pojačanjem. Jedan tipičan primjer Darlingtonovog para s bipolarnim tranzistorom *nnp* tipa (Kovačević, 2010), prikazan je na slici 4.16.



Slika 4.16: Darlingtonov spoj tranzistora [Izvor: autorski rad]

Ulazna je struja izmjenična struja efektivne vrijednosti I_{B1} ,

$$I_{C1} = h_{fe1} * I_{B1} \quad ; \quad I_{E1} = (1 + h_{fe1}) * I_{B1} \approx h_{fe1} * I_{B1} \approx I_{C1},$$

Jednadžba 4.23

gdje je $h_{fe1} \gg 1$ strujno pojačanje prvog tranzistora.

Kako je emitorska struja ulaznog jednaka baznoj struji izlaznog tranzistora $I_{E1} = I_{B2}$, kolektorska struja tranzistora T_2 je:

$$I_{C2} = h_{fe2} * I_{B2} \approx h_{fe2} * h_{fe1} * I_{B1},$$

Jednadžba 4.24

gdje je h_{fe2} strujno pojačanje drugog tranzistora.

Ukupna kolektorska struja Darlingtonovog para, ako je poznato da je i $h_{fe2} \gg 1$, postaje:

$$I_C = I_{C1} + I_{C2} \approx h_{fe1}(1 + h_{fe2}) * I_{B1} \approx h_{fe1} * h_{fe2} * I_{B1}.$$

Jednadžba 4.25

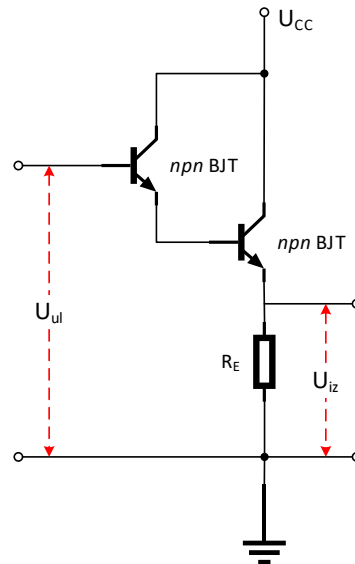
Izlazi da je ukupno strujno pojačanje kombiniranog tranzistora približno jednako umnošku pojedinačnih faktora strujnog pojačanja:

$$A_I \approx h_{fe1} * h_{fe2}.$$

Jednadžba 4.26

Ukupno pojačanje znatno je veće od pojačanja pojedinih tranzistora Darlingtonova para. U spoju zajedničkog emitera ulazni otpor Darlingtonova spoja ima ulazni otpor jednak dvostrukom ulaznom otporu prvog tranzistora.

Darlingtonov par u spoju zajedničkog kolektora (emitorsko slijedilo) prikazan je na slici 4.17.



Slika 4.17: Emitorsko slijedilo u Darlingtonovom spoju [Izvor: autorski rad]

Karakteristike spoja emitorskog slijedila naponsko su pojačanje $A_V \approx 1$ i strujno pojačanje $A_I \approx h_{fe1} \cdot h_{fe2}$. Ovaj se spoj odlikuje vrlo velikim ulaznim otporom pa se upotrebljava za povećanje ulaznog otpora bipolarnih tranzistora.

4.1.5. Pojačala snage

Pojačala koja su predviđena isporučiti snage signala koje su znatno veće od uobičajenih nazivaju se *pojačala snage*. To su izlazna pojačala koja opskrbljuju trošilo s određenom snagom. Aktuatori su uređaji koji pretvaraju električnu snagu u mehanički rad, mogu biti zvučnici, servomotori, ventili itd., služe kao opteretni otpor (trošilo). Dodatni je uvjet da se snaga isporučuje uz što manju potrošnju istosmjernog izvora koji napaja sklop. Također je potrebno reducirati iznos nelinearnih izobličenja (Kovačević, 2010).

Kada su sklopovi realizirani u obliku integriranih krugova, poput operacijskih pojačala, proizvođač umjesto izlazne snage obično daje vrijednost *maksimalne disipacije snage*. To je najveća vrijednost snage koja se smije pretvoriti u toplinu prije nego dođe do pregrijavanja pojačala. Korisnik mora izračunati očekivanu disipaciju snage u primijenjenom sklopu i biti siguran da neće prijeći specificiranu najveću vrijednost disipacije snage. Dozvoljena disipacija snage ovisi i o načinu hlađenja pojačala. Funkciju hlađenja može obavljati zrak, ali se pojačalo može spojiti i na hladilo. Tako se primjerice nekom operacijskom pojačalu sa zračnim hlađenjem disipacija može povećati s 50 mW na 750 mW s priključenim hla-

dilom. Disipirana snaga nije isto što i snaga isporučena trošilu. U određivanju disipirane snage treba uzeti u obzir i odgovarajuće stezaljke vezane na vanjske istosmjerne izvore napajanja. Jedan dio snage generiran s izvora napajanja „pokriva“ razliku snage izlaznog i ulaznog signala, jer je temeljni zadatak pojačala da pojača snagu. Drugi dio isporučene snage pretvara se u toplinske gubitke unutar sklopa pojačala. Snaga ulaznog signala praktički je uvijek zanemariva u odnosu na snagu generiranu s izvora napajanja.

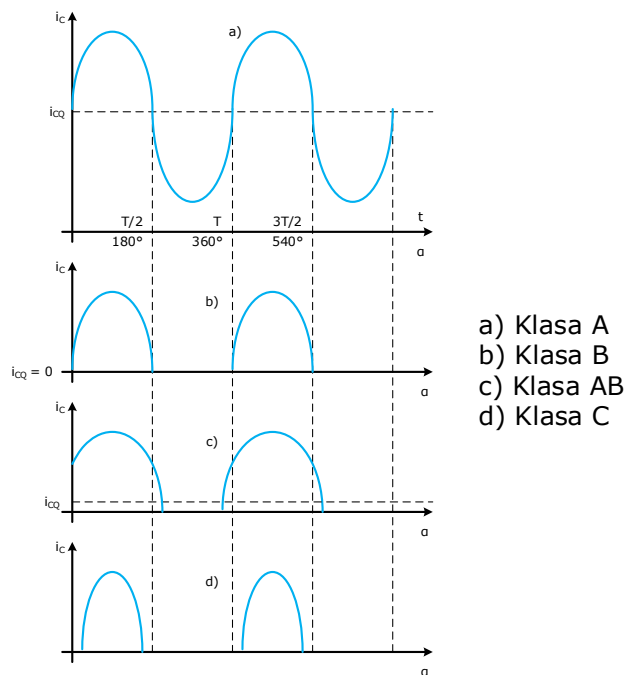
Disipirana snaga P_g (snaga gubitaka) razlika je snage izvora napajanja, ulazne snage P_{ul} i predane snage na izlazu pojačala P_{iz} (snaga izlaznog signala):

Korisnost pojačala $\eta = P_{iz} / P_{ul}$ ovisi o načinu rada pojačala i zbog toplinskih gubitaka može biti znatno manja od 1 (100 %).

Projektiranje sklopa pojačala ovisi o željenoj radnoj frekvenciji, izlaznoj snazi, vrsti modulacije, radnom ciklusu i raspoloživom izvoru napajanja.

Općenito se pojačala snage mogu svrstati u klase rada, ovisno o modulaciji, tj. o položaju statičke radne točke elementa u polju izlaznih karakteristika. Klasa rada ne određuje vrste elementa za pojačanje, već isključivo položaj statičke radne točke, odnosno kut vođenja. Promatra li se valni oblik izlazne struje kako je prikazano na slici 18, klase rada pojačala određene su kutom vođenja:

- klasa **A**, kut vođenja je 360°
- klasa **B**, kut vođenja je 180°
- klasa **AB**, kut vođenja je između 180° i 360°
- klasa **C**, kut vođenja je manji od 180° .



Slika 4.18: Valni oblici struje kolektora za različite klase rada pojačala [Izvor: autorski rad]

4.1.5.1. Pojačala snage klase A

Za pojačala koja rade u klasi A radno područje tranzistora smješteno je u potpunosti u aktivnom (linearnom) području (Kovačević, 2010).

Tranzistor ne smije prijeći ni u zaporno ni u područje zasićenja pa se najveći dozvoljeni izmjenični signal postiže ako je statička radna točka u sredini među dvama graničnim područjima. Pojačala ovog tipa imaju najmanja izobličenja, ali kroz tranzistor uvijek teče istosmjerna struja, neovisno o signalu. Čak i kada nema ulaznog signala, troši se snaga istosmjernog izvora i dio snage disipira na tranzistoru. Zato je iskoristivost ovog tipa pojačala niska i za tipični sklop iznosi najviše 25 %. Pri tome je potrebna snaga disipacije na tranzistoru najmanje dvostruko veća od najvećeg iznosa izlazne snage, što je dodatno loše svojstvo pojačala klase A.

Efikasnost se može povećati na 50 % primjenom transformatorske veze između izlaznog kruga tranzistora i trošila. Transformator omogućuje prilagođenost impedancije trošila, čime se ostvaruje najveći iznos prijenosa snage s tranzistora na trošilo.

Pojačala klase A koriste se kao pogonski sklopovi (driveri) u kaskadnim pojačalima snage i moraju davati vrlo čiste signale, jer bi se moguća izobličenja pojačavala na idućim stupnjevima pojačala.

4.1.5.2. Pojačala snage klase B

Bolja svojstva pojačanja snage u odnosu na klasu A mogu se dobiti s pojačalima klase B. Statička radna točka mora biti postavljena u zaporno područje. Tranzistor je otvoren u jednoj polovici ciklusa i prenosi samo jednu poluperiodu izmjeničnog signala. Za vrijeme druge poluperiode tranzistor ne vodi. Kolektorska struja u statičkoj je radnoj točki $I_{CO} = 0$ (Kovačević, 2010).

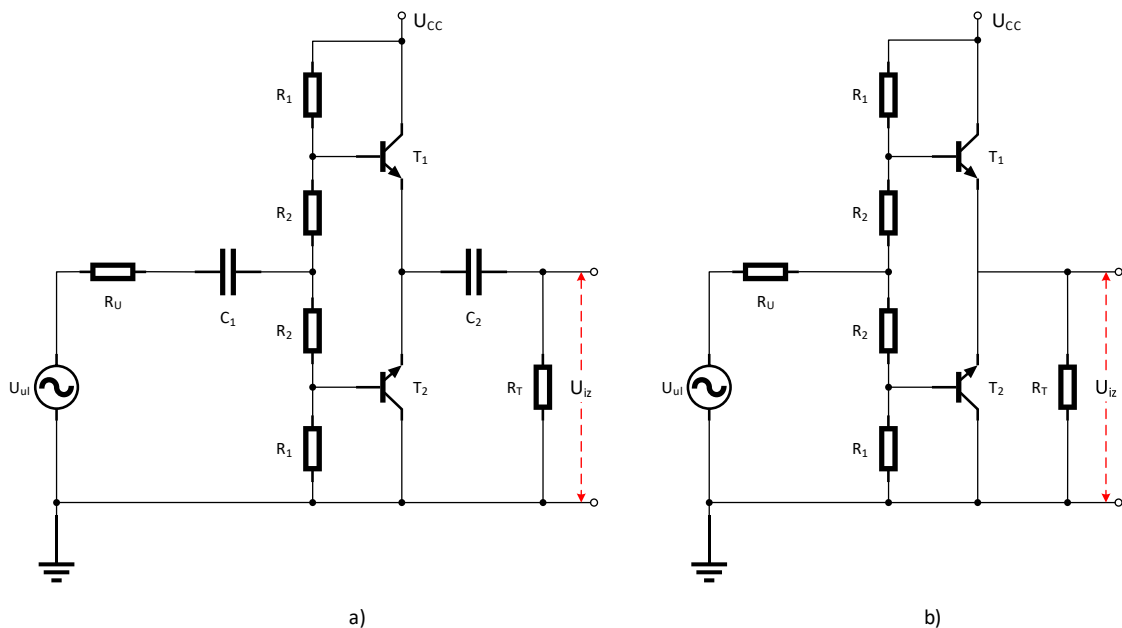
Dodatan izvor nelinearnih izobličenja može biti i neusklađenost karakteristika tranzistora. Ako tranzistori nisu u potpunosti komplementarni, nastala izobličenja mogu se reducirati tako da se umjesto tranzistora T_1 i T_2 upotrijebe odgovarajući Darlingtonovi spojevi.

Jedan primjer izvedbe protutaktnog pojačala klase B s izmjeničnom, odnosno istosmjernom spregom prikazan je na slici 4.19.

Vežni kondenzatori C_1 i C_2 , prikazani na slici 4.19 a), koji blokiraju istosmjernu komponentu, mogu se izbjeći realizacijom sklopa prema slici 4.19 b). Kolektor tranzistora T_2 nije spojen na referentni, nego na napon napajanja $-U_{CC}$. Radi simetrije kruga istosmjerni potencijali u čvorovima a i b jednaki su nuli pa nema istosmjernog pada napona na otporima R_T i R_U . Kroz spomenute otpore ne teče istosmjerna struja, što eliminira potrebu za spajanjem blokirajućeg kondenzatora.

Pojačala klase B imaju bitno bolja svojstva od pojačala klase A, kako u pogledu iskoristivosti tako i u odnosu na zahtijevanu mogućnosti disipiranja snage na tranzistorima. Najveći iznos snage izlaznog signala P_{iz} pojačala klase B pet je puta veći od najvećeg iznosa snage P_{Dmax} disipirane na svakom od tranzistora.

Pojačala klase B superiorna su i u odnosu na iskoristivost snage. Opterećenje kolektorskih baterija nije konstantno kao u klasi A. Kako je $I_{C0} = 0$, istosmjerni izvor nije opterećen kada nema ulaznog signala. Opterećenje izvora raste linearno s amplitudom struje trošila, a snaga izlaznog signala raste s kvadratom struje kroz trošilo. Za rezultat se dobije iznos maksimalnog koeficijenta korisnosti: $\eta_{max} = 78,5\%$ što je znatno bolja efikasnost nego pojačalo u klasi A koje ima do 25 %.



Slika 4.19: Primjer protutaktnog pojačala klase B sa i bez veznih kondenzatora [Izvor: autorski rad]

Protutaktna pojačala klase B koriste se kao izlazni stupnjevi u velikom broju pojačala s integriranim krugovima, kao što su primjerice monolitna operacijska pojačala. Ne moraju biti izvedena samo kao protutaktna emitorska slijedila. Moguće su i konfiguracije protutaktnih pojačala sa spojem zajedničkog emitera, kao i protutaktna pojačala koja rade s dvama *npn* tranzistorima.

4.1.5.3. Pojačala snage klase O

Statička radna točka locirana im je unutar zapornog područja ($ICQ = 0$). Struja kolektora teče kraće od jedne poluperiode. Dok je u klasama A i B vrijeme vođenja fiksno, odnosno cijela poluperioda ili cijela perioda, u klasi C vrijeme je vođenja promjenjivo. Analiza pojačala klase C provodi se u vremenskoj ili faznoj domeni. Efikasnost im je veća nego u pojačalu klase B. Namjena im je pojačanje snage u visokofrekvencijskom području. Gotovo se uvijek koristi za pojačanje faze ili frekvencije moduliranog signala i to posebno kada se zahtijeva visoka iskoristivost uložene snage (Kovačević, 2010).

4.1.6. Oscilatori s tranzistorima

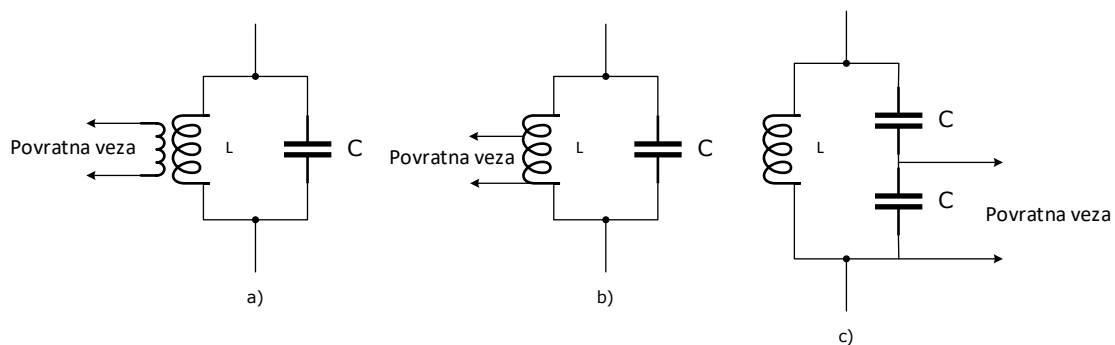
Oscilator je elektronički sklop koji generira izlazni signal određene frekvencije. Dizajnirani su tako da pretvaraju istosmjerni signal u izmjenični (Paunović, 2000). Oscilatori se sastoje od triju dijelova, a to su:

- pojačala
- titrajni krug, dio za određivanje frekvencije
- mreže povratne veze.

Pojačala se sastoje od aktivnih elektroničkih komponenti koje su u prethodnim poglavljima obrađene. Mogu se sastojati od bipolarnih i unipolarnih tranzistora, specijalnih vrsta dioda, a postoje i izvedbe s elektronskim cijevima.

Titrajni krug, dio koji određuje frekvenciju, generira signal određene frekvencije koju zovemo rezonantna frekvencija.

Povratna veza može se ostvariti na nekoliko načina, na slici 4.20 su prikazani.

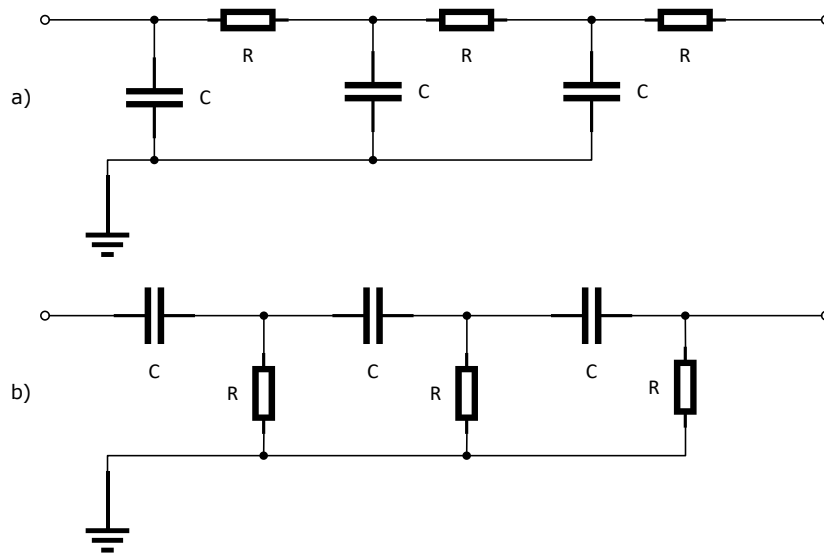


Slika 4.20: Povratna veza [Izvor: autorski rad]

Oscilatori su sklopovi koji na izlazu daju izmjenični napon bez ulaznog signala. Priključeni napon napajanja može se smatrati ulaznim naponom koji oscilator pretvara u izmjenični. Izlazni napon može biti sinusoidnog i nesinusoidnog oblika, kao što su pilasti, pravokutni oblik i sl. Oscilatori sinusoidnog napona nazivaju se harmonički oscilatori, a nesinusoidnog oblika zovu se relaksacijski oscilatori. Izvedbe oscilatora međusobno se razlikuju prema grani povratne veze. Povratna veza može biti izvedena pomoću mreže otpornika i kondenzatora koja će predstavljati RC mrežu pa se nazivaju i RC oscilatori, pomoću spoja kondenzatora i zavojnice koja će predstavljati LC mrežu pa se nazivaju i LC oscilatori. Oscilatori s kristalom kvarca čine treću skupinu oscilatora.

4.1.6.1. RC oscilator

Kod RC oscilatora pozitivna povratna veza ostvaruje se pomoću mreže otpornika i kondenzatora. Mreža može biti napravljena kao niski propust RC mreža i kao visoki propust CR mreža, kako je prikazano na slici 4.21.

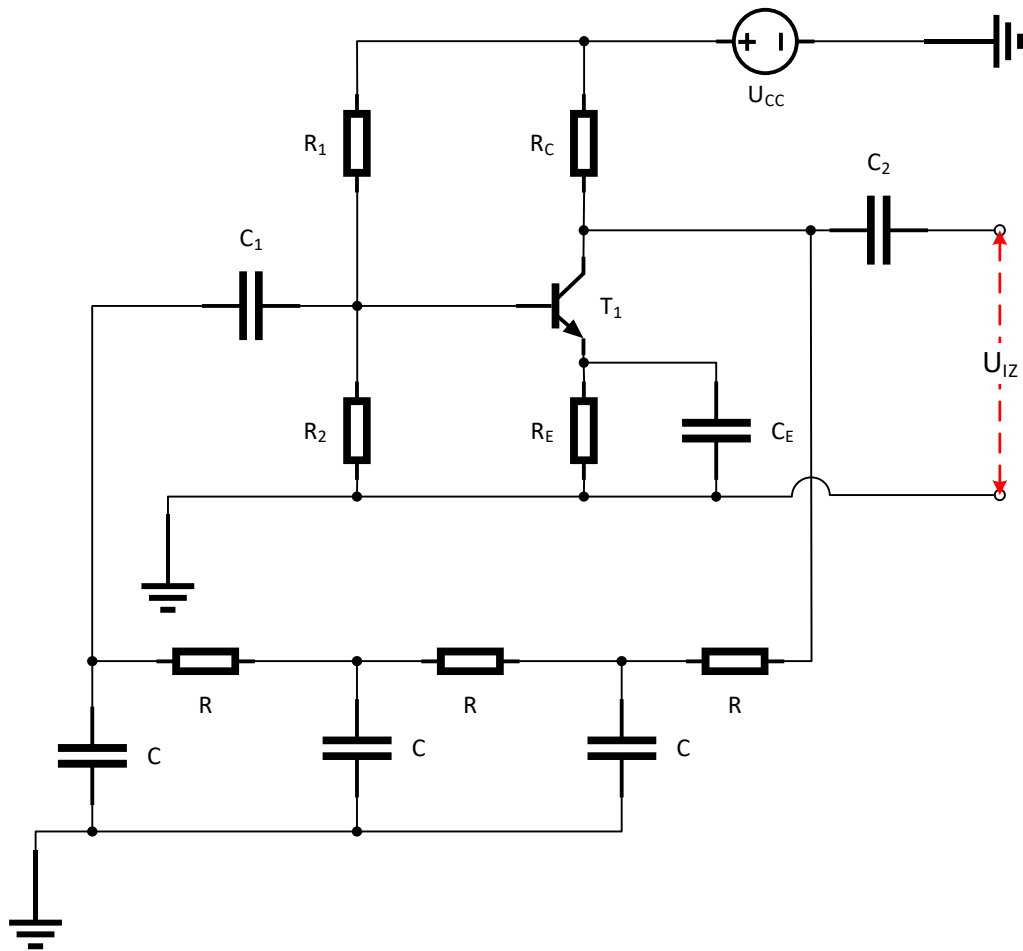


Slika 4.21: Elementi povratne veze RC oscilatora [Izvor: autorski rad]

Za oscilator izveden pomoću RC mreže, kojeg još nazivamo i RC oscilator s faznim pomakom unazad, kako je prikazano na slici 4.22, frekvenciju izlaznog napona možemo izračunati preko relacije:

$$f_i = \frac{\sqrt{6}}{2 * \pi * R * C}$$

Jednadžba 4.27

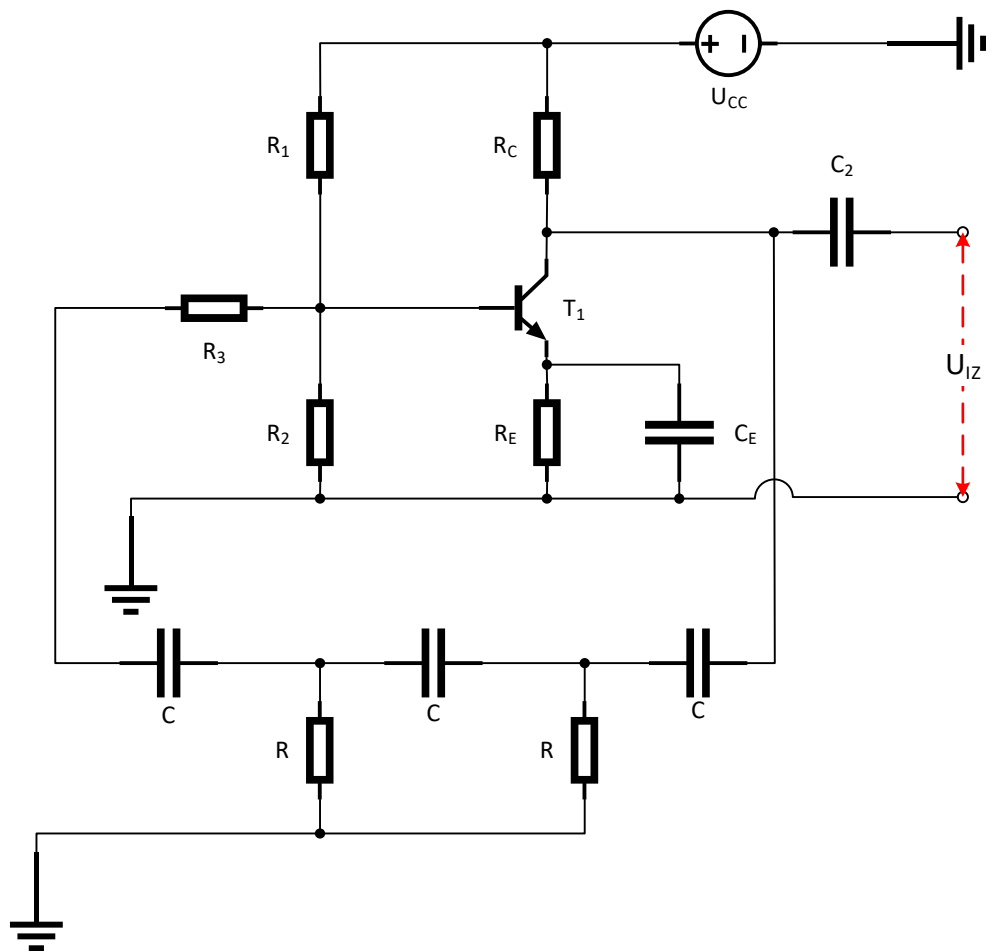


Slika 4.22: RC oscilator s RC mrežom u grani povratne mreže [Izvor: autorski rad]

Kod oscilatora izvedenoga pomoću CR mreže, koji se naziva RC oscilator s faznim pomakom unaprijed, što je prikazano na slici 4.23, zbroj otpora R_3 i ulaznog otpora pojačala $R_u = R_1 \parallel R_2 \parallel r_{be}$ treba biti jednak vrijednosti R . Frekvencija izlaznog napona može se izračunati prema izrazu:

$$f_i = \frac{1}{2 * \pi * R * C * \sqrt{6}}$$

Jednadžba 4.28



Slika 4.23: RC oscilator s CR mrežom u grani povratne veze [Izvor: autorski rad]

Koeficijent povratne veze RC i CR mreže jest $1/29$. Stoga je potrebno da naponsko pojačanje kod RC oscilatora bude najmanje $A_v = 29$. Da bi se postiglo potrebno naponsko pojačanje i time uvjet za osciliranje, faktor pojačanja tranzistora mora biti dovoljno velik:

$$h_{fe} > 23 + 29 * \frac{R}{R_C} + 4 * \frac{R_C}{R}.$$

Jednadžba 4.29

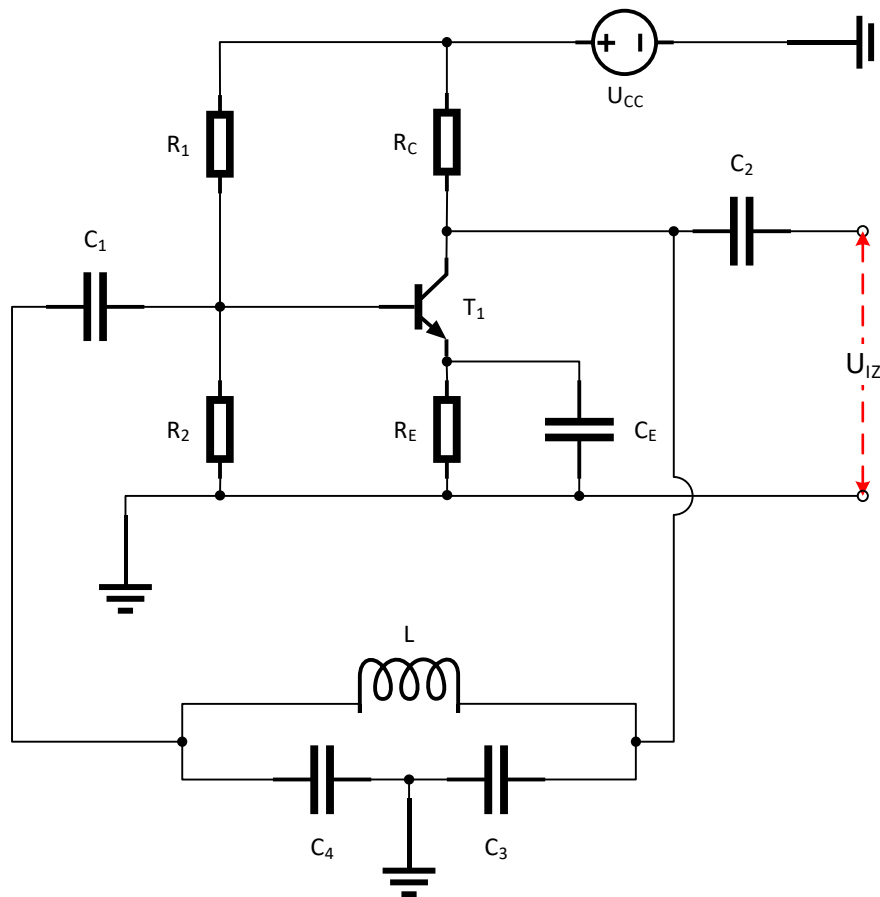
Izborom vrijednosti otpora R_C postiže se potrebno naponsko pojačanje kako bi bio zadovoljen uvjet za osciliranje napona. Promjena frekvencije izlaznog napona postiže se istodobnom promjenom kapaciteta C svih kondenzatora u mreži.

4.1.6.2. LC oscilator

LC oscilatori primjenjuju se za područje viših frekvencija. Titrajni krug kojim se ostvaruje povratna veza može biti s kapacitivnim djelilom ili s induktivnim djelilom. Također, male vrijednosti otpora R i kondenzatora C kod RC oscilatora mogu biti nepraktične za realizaciju. Najpoznatiji LC oscilatori su: Colpitts, Hartley, Clapp i Armstrong.

Colpitts oscilator

Kod Colpittsova oscilatora povratna veza ostvaruje se pomoću titrajnog kruga s kapacitivnim djelilom, kako je prikazano na slici 4.24.



Slika 4.24: Colpittsov oscilator [Izvor: autorski rad]

Na kondenzator C_3 izlazni je napon, uz dovoljno veliki C_2 da čini kratki spoj za izlazni napon, a na kondenzatoru C_4 napon povratne veze U_f . Prema tome, koeficijent povratne veze možemo prikazati pomoću izraza:

$$\beta = \frac{U_f}{U_i} = \frac{X_{C4}}{X_{C3}} = \frac{C_3}{C_4}.$$

Jednadžba 4.30

Kako je uvjet za osciliranje $\beta * A_U > 1$, slijedi da naponsko pojačanje pojačala mora biti najmanje:

$$A_U \geq \frac{C_4}{C_3}.$$

Jednadžba 4.31

Frekvencija izlaznog napona ovisi o elementima zavojnice L i kondenzatorima C_3 i C_4 :

$$f_i = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{L * C_T}}$$

Jednadžba 4.32

C_T ukupni je kapacitet serijskog spoja kondenzatora C_3 i C_4 .

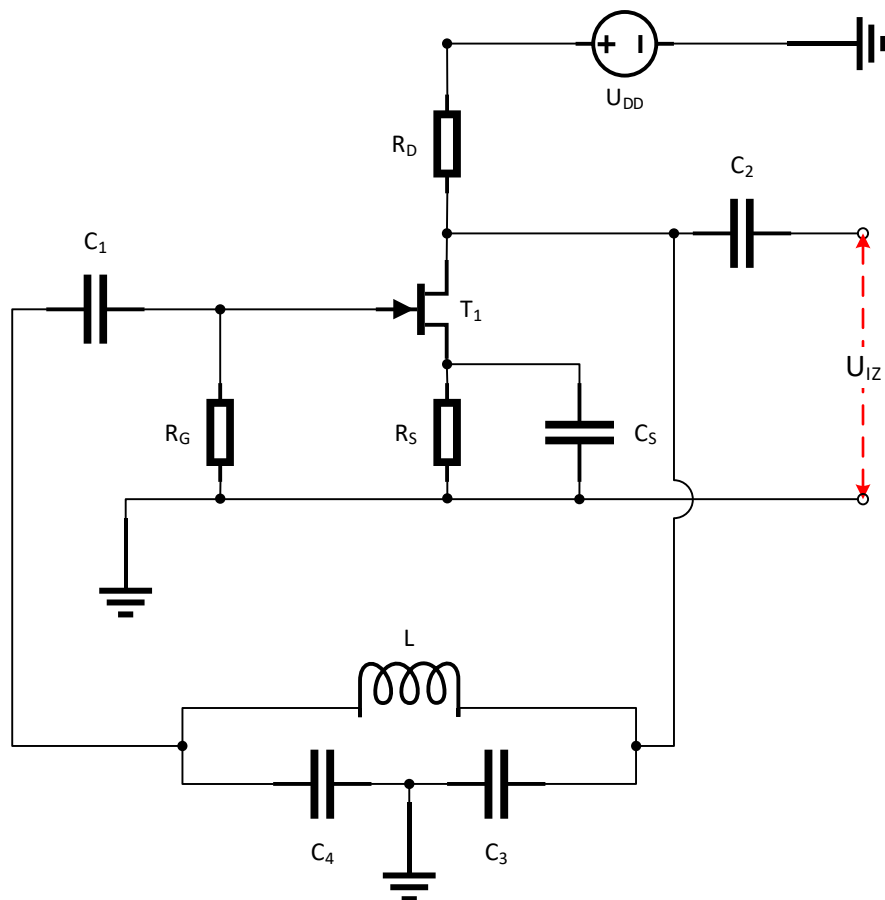
Colpittsov oscilator upotrebljava se za visoke frekvencije iznad 100 MHz u radioprijamnicima i TV prijamnicima.

Ulazni otpor pojačala djeluje kao otpor tereta titrajnog kruga u grani povratne veze i smanjuje njegov *faktor dobrote* Q , tj. omjer rezonantne frekvencije i širine pojasa. Ako je faktor dobrote titrajnog kruga niži od 10, njegov utjecaj na rezonantnu frekvenciju titrajnog kruga, dakle i na frekvenciju izlaznoga napona, više nije zanemariv. U tom je slučaju frekvencija izlaznoga napona:

$$f_i = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{L * C_T}} = \sqrt{\frac{Q}{Q + 1}}.$$

Jednadžba 4.33

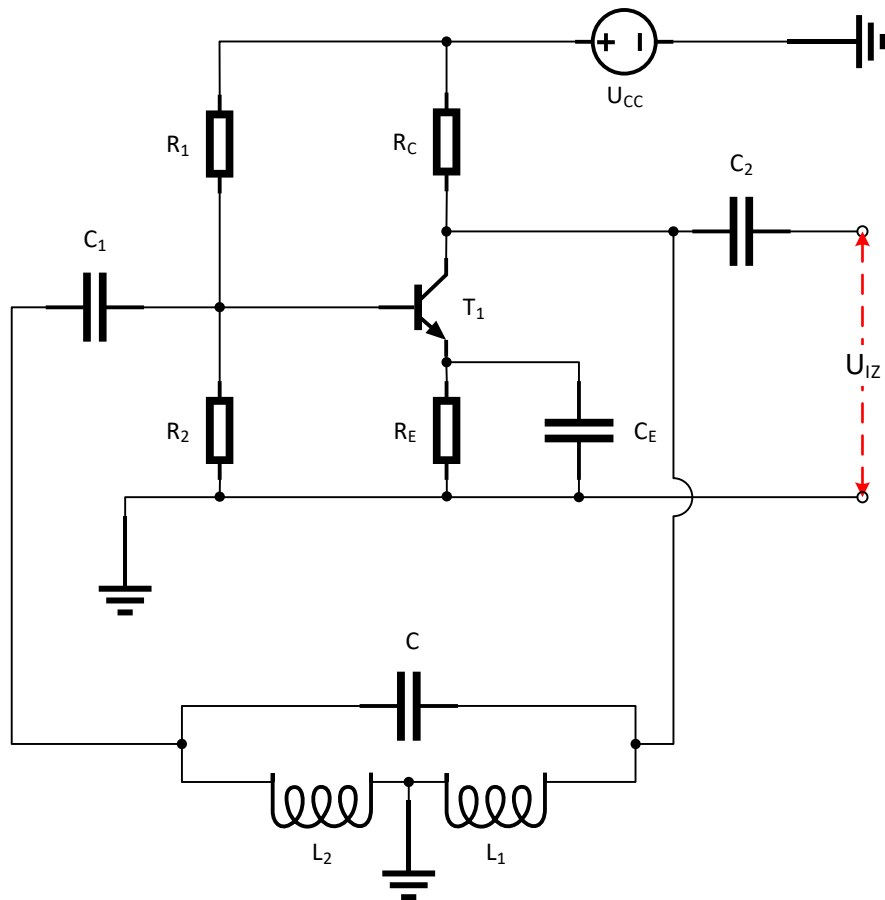
Za smanjenje utjecaja ulaznoga otpora pojačala na rezonantnu frekvenciju primjenjuju se pojačala s unipolarnim tranzistorima, kako je prikazano na slici 4.25, budući da je njihov ulazni otpor vrlo velik, a otpor R_G veličine je megaoma (M Ω).



Slika 4.25: Colpittsov oscilator s FET-om [Izvor: autorski rad]

Hartley oscilator

Kod Hartleyeva oscilatora povratna veza ostvaruje se pomoću titrajnog kruga s induktivnim djelilom, kako je prikazano na slici 4.26.



Slika 4.26: Hartleyev oscilator [izvor: autorski rad]

Frekvencija izlaznoga napona odgovara rezonantnoj frekvenciji titrajnog kruga u grani povratne veze:

$$f_i = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{L_T * C}}$$

Jednadžba 4.34

L_T ukupni je induktivitet serijskog spoja zavojnica L_1 i L_2 .

Induktivno djelilo kod Hartleyeva oscilatora djeluje na isti način kao i kod Colpittsova oscilatora s kapacitivnim djelilom. Stoga je koeficijent povratne veze β određen omjerom induktiviteta L_1 i L_2 :

$$\beta = \frac{U_f}{U_i} = \frac{X_{L2}}{X_{L1}} = \frac{L_2}{L_1}.$$

Jednadžba 4.35

Pojačanje pojačala da bi oscilator oscilirao je:

$$A_U \geq \frac{L_1}{L_2}.$$

Jednadžba 4.36

Utjecaj ulaznog otpora pojačala, kao i opterećenja izlaza, ima isti učinak kao i u slučaju Colpittsova oscilatora. Hartleyev oscilator upotrebljava se na visokim frekvencijama gdje je potrebna kontinuirana promjena frekvencije, što se izvodi promjenom kondenzatora C u radioprijamnicima na UKV području. UKV je ultrakratki val frekventnog područja od 30 MHz do 300 MHz, poznat po radijskim prijamnicima na kojima se slušaju FM postaje.

4.1.7. Stabilizatori napona s tranzistorima

Osnovne značajke stabilizatora napona s tranzistorima su:

- područje vrijednosti napona koje se mogu dovesti na ulazu, a da izlazni napon ostane u zadanim granicama
- vrijednost izlaznog napona
- dopušteno odstupanje izlaznoga napona
- vrijednost struje kojom se može opteretiti stabilizator, odnosno izlazna struja.

Učinkovitost stabilizatora napona može se iskazati pomoću ovih parametara:

- faktor stabilizacije
- izlazni otpor
- temperaturni koeficijent
- faktor potiskivanja brujanja.

Faktor stabilizacije omjer je promjene izlaznog i ulaznog napona koja uzrokuje promjenu izlaznog napona uz stalnu vrijednost struje opterećenja i temperature okoline. Faktor stabilizacije možemo iskazati relacijom:

$$FS = \frac{\Delta U_{iz}}{\Delta U_{ul}}.$$

Jednadžba 4.37

Prema relaciji, za dobar stabilizator faktor stabilizacije treba biti što manji broj kako bi za određenu promjenu ulaznog napona bila što manja promjena izlaznog napona. Faktor stabilizacije može se definirati i kao omjer promjene ulaznog napona i izazvane promjene izlaznog napona. U tom slučaju faktor stabilizacije mora biti što veći, prema ovoj relaciji:

$$G = \frac{\Delta U_{ul}}{\Delta U_{iz}}$$

Jednadžba 4.38

Izlazni otpor stabilizatora omjer je promjene napona na izlazu i struje tereta stabilizatora koja uzrokuje promjenu izlaznog napona uz konstantni ulazni napon i temperaturu okoline. Prema tome, izlazni se otpor stabilizatora može izračunati prema relaciji:

$$R_{iz} = \frac{\Delta U_{iz}}{\Delta I_T}$$

Jednadžba 4.39

Temperaturni koeficijent (eng. *temperature coefficient of output voltage*) omjer je promjene napona na izlazu i promjene temperature okoline koja je izazvala promjenu napona na izlazu, uz stalnu vrijednost napona na ulazu i struje opterećenja. Temperaturni koeficijent iskazuje se u milivoltima po Celzijevu stupnju (mV/°C), može se iskazati preko relacije:

$$TK = \frac{\Delta U_{iz}}{\Delta T}$$

Jednadžba 4.40

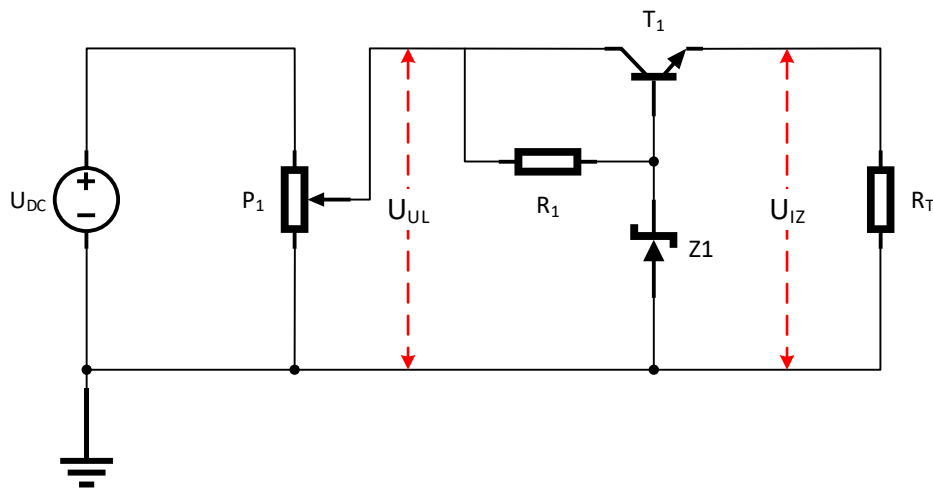
Faktor potiskivanja brujanja (eng. *ripple rejection*) omjer je vrijednosti napona brujanja, izmjenična komponenta ispravljenog napona na ulazu i vrijednosti napona brujanja na izlazu stabilizatora. Faktor potiskivanja brujanja iskazuje se u decibelima (dB) i može se iskazati preko relacije:

$$F_B = 20 \log \frac{U_{ulmm}}{U_{izmm}}$$

Jednadžba 4.41

4.1.7.1. Serijski tranzistorski stabilizatori

Zenerova dioda, koje je ranije opisana u poglavlju 1.3, ima svojstvo stabilizacije napona i opisana je izvedba stabilizatora napona sa Zenerovom diodom. Nedostatak je takvih stabilizatora sa Zenerovom diodom nemogućnost većeg opterećenja. Stabilizator s boljim svojstvima može se ostvariti s kombinacijom Zenerove diode i tranzistora u spoju serijskoga tranzistorskog stabilizatora, s obzirom na mogućnost opterećenja, gubitak snage i izlaznog otpora. Serijski tranzistorski stabilizator sa Zenerovom diodom prikazan je na slici 4.27.



Slika 4.27: Serijski tranzistorski stabilizator [Izvor: autorski rad]

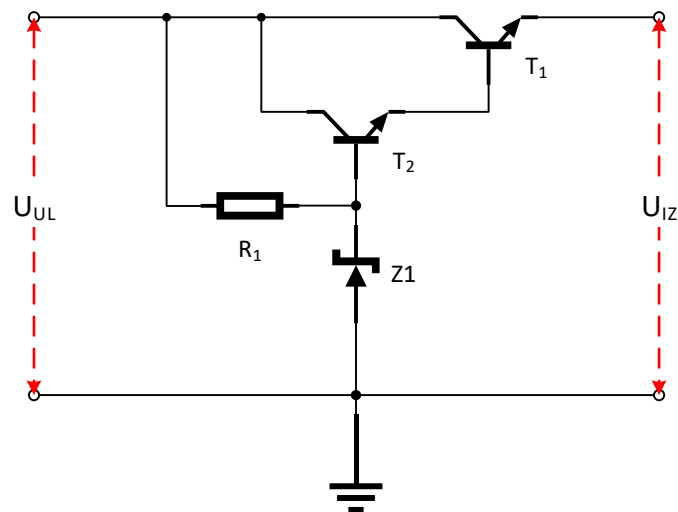
Izlazni napon ovog stabilizatora napon je Zenerove diode U_Z umanjeno za napon između baze i emitera U_{BE} , a može se iskazati prema relaciji:

$$U_{iz} = U_{ul} - U_{CE} = U_Z - U_{BE}.$$

Jednadžba 4.42

Tranzistor djeluje kao promjenjivi otpornik čija vrijednost ovisi o ulaznom naponu. Povećanjem ili smanjenjem ulaznog napona povećava se ili smanjuje otpor tranzistora, a time i napon U_{CE} , tako da se izlazni napon vrlo malo mijenja.

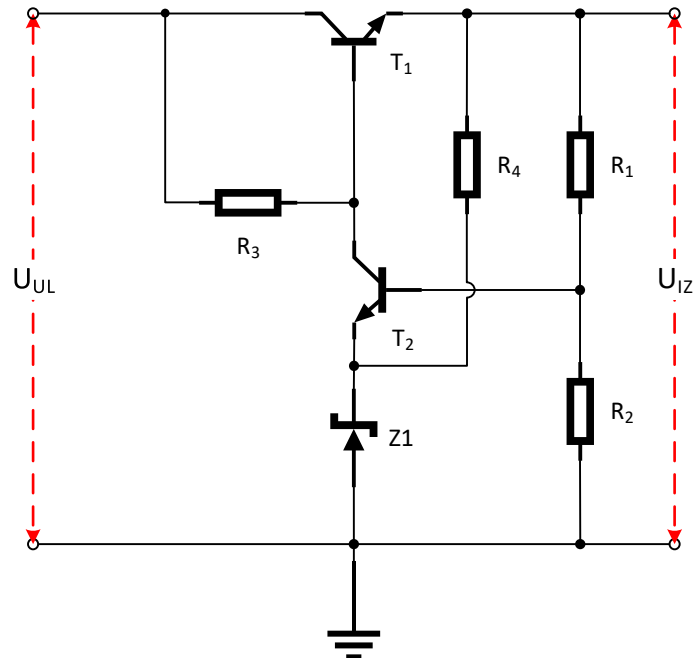
Kada su potrebna veća opterećenja stabilizatora, upotrebljava se Darlingtonov spoj tranzistora uz Zener diodu, kako je prikazano na slici 4.28.



Slika 4.28: Serijski stabilizator s Darlingtonovim spojem tranzistora [Izvor: autorski rad]

4.1.7.2. Serijski tranzistorski stabilizatori s pojačalom u povratnoj vezi

Znatno bolja stabilizatorska svojstva ima serijski tranzistorski stabilizator s pojačalom u povratnoj vezi, što je prikazano na slici 4.29.



Slika 4.29: Serijski tranzistorski stabilizator s pojačalom u povratnoj vezi [Izvor: autorski rad]

Tranzistor T_2 pojačala pojačava promjene koje se javljaju na ulazu, stoga će se potrebni signal za bazu serijskog tranzistora T_1 dobiti uz znatno manje promjene izlaznoga napona

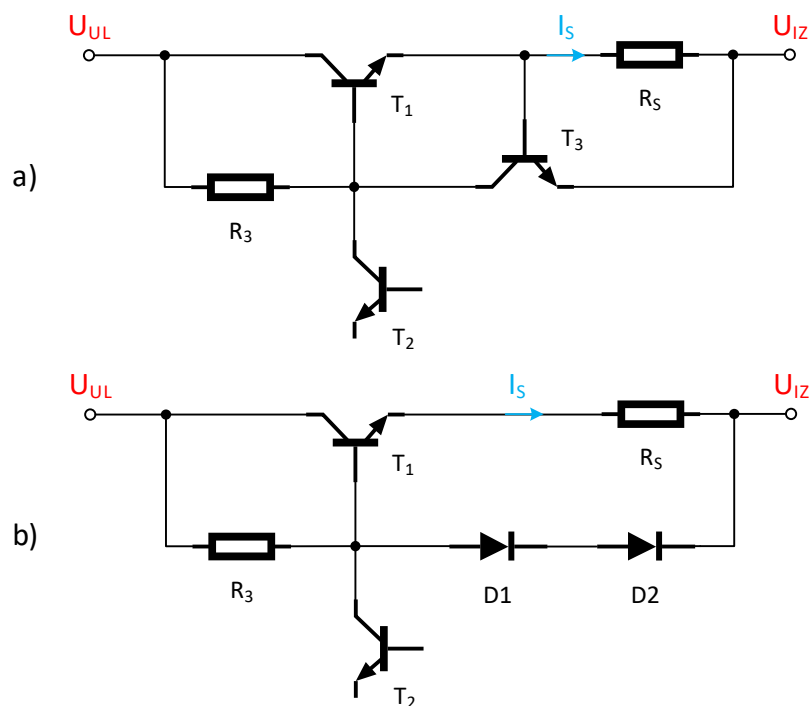
nego što je to kod sklopa na slici 4.27. Izlazni napon stabilizatora ovisi o odnosu vrijednosti otpornika R_1 i R_2 , što omogućuje namiještanje izlaznog napona:

$$U_{iz} = (U_Z + U_{BE}) * \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right).$$

Jednadžba 4.43

4.1.7.3. Zaštita stabilizatora od preopterećenja

Stabilizator od preopterećenja mogu štiti otpornik R_S i tranzistor T_3 , kako je prikazano na slici 4.30 a).



Slika 4.30: Zaštita stabilizatora od preopterećenja [Izvor: autorski rad]

Kad struja I_S , koja teče kroz trošilo koje je spojeno na izlaz stabilizatora, prijeđe dopušteni iznos, na otporniku R_S nastaje pad napona pa će tranzistor T_3 provesti. Time se smanjuje pobuda tranzistora T_2 , što ne dopušta daljnji porast izlazne struje stabilizatora. Vrijednost otpora R_S treba izabrati tako da zadovolji uvjet:

$$I_S = \frac{U_{BE}}{R_S} < I_{Cmax}.$$

Jednadžba 4.44

I_{Cmax} najveći je dopušteni iznos struje kroz kolektor tranzistora, a napon između baze i emitera za silicijske tranzistore iznosi 0,7 V.

Isto djelovanje ima i spoj s dvjema diodama, koji je prikazan na slici 4.30 b). Kad struja opterećenja stabilizatora dostigne dopušteni iznos, diode će provesti i smanjiti pobudu tranzistora $T1$ ne dopuštajući daljnji porast izlazne struje stabilizatora. Vrijednost otpora R_S treba odabrati tako da je zadovoljen uvjet:

$$I_S = \frac{2 * U_D - U_{BE}}{R_S} < I_{Cmax}.$$

Jednadžba 4.45

I_{Cmax} najveći je dopušteni iznos struje kroz kolektor tranzistora, a pad napona na propusno polariziranim silicijskim diodama iznosi 0,7 V.

Pitanja za provjeru znanja

1. Objasnite djelovanje tranzistora u Darlingtonovu spoju?
2. Kada se upotrebljava pojačalo u spoju zajedničkog emitera s Darlingtovovim spojem tranzistora?
3. Što je faktor potiskivanja?
4. Što je korisnost pojačala?
5. Što su klase rada pojačala snage?
6. Kako promjena vrijednosti otpora R u grani povratne veze utječe na rad RC oscilatora?
7. Kako se može mijenjati frekvencija izlaznoga napona RC oscilatora?
8. Kako promjena vrijednosti induktiviteta u grani povratne veze utječe na rad Colpittsova oscilatora?
9. Kako promjena vrijednosti induktiviteta u grani povratne veze utječe na rad Hartleyeva oscilatora?
10. Kako djeluje serijski tranzistorski stabilizator napona na promjene ulaznoga napona?

4

POGLAVLJE

SKLOPOVI S OPERACIJSKIM POJAČALOM

Nakon ovog poglavlja moći ćete:

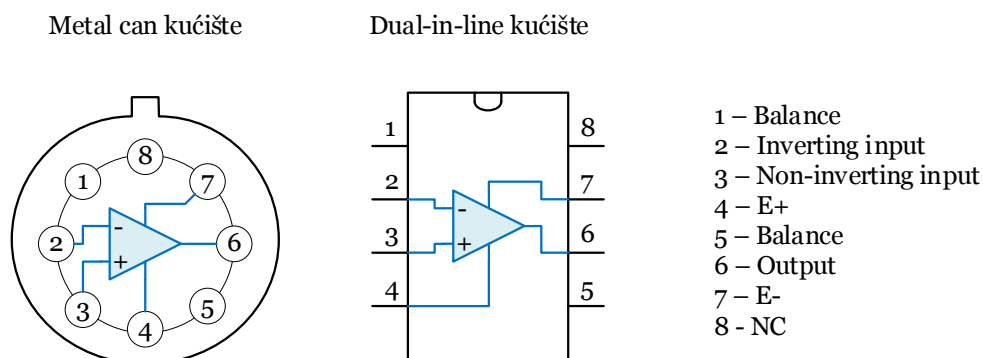
- ispitati način rada, svojstva i primjenu sklopova s operacijskim pojačalom u simulacijskom programu i/ili u stvarnim uvjetima
- analizirati način rada i primjenu operacijskog pojačala kod aktivnih filtera u simulacijskom programu i/ili u stvarnim uvjetima
- analizirati način rada i primjenu operacijskih pojačala kod oscilatora i integriranog stabilizatora napona u simulacijskom programu i/ili u stvarnim uvjetima
- izraditi sklop s operacijskim pojačalom (aktivni filter, oscilator, integrirani stabilizator napona) i interpretirati rezultate mjerenja na sklopovima s operacijskim pojačalom.

5.1. Operacijska pojačala

Operacijska pojačala (eng. *operational amplifier* – OPP), pojednostavljeno rečeno, naponski su upravljani naponski izvori vrlo velikoga pojačanja. Konstruirana su tako da omogućuju aritmetičke operacije zbrajanja, oduzimanja i množenja s konstantom. Također, s odgovarajućom izvedbom operacijska pojačala mogu izvoditi operacije deriviranja i integriranja te realizirati niz drugih praktičnih elektroničkih sklopova. Naziv im datira još iz pedesetih i šezdesetih godina prošloga stoljeća. Naime, za izvršavanje spomenutih matematičkih operacija koristila su se analogna računala čiji su temeljni elementi bili operacijska pojačala (Kovačević, 2010).

Stvarno operacijsko pojačalo poluvodički je uređaj koji sadrži veći broj tranzistora i otpornika te poneki kondenzator i diodu. Pakirani su u zajedničko kućište koje sadrži jedno ili više operacijskih pojačala s određenim brojem stezaljki (8 do 14 stezaljki). Unatoč složenosti unutarnje građe sklopa operacijskih pojačala, visoka tehnologija realizacije integriranih krugova omogućila je da je operacijsko pojačalo tek malo skuplje od jednoga tranzistora u diskretnoj izvedbi. Zbog svoje jednostavnosti, pouzdanosti, niske cijene i raznolikosti imaju široke mogućnosti uporabe. Operacijska pojačala temeljni su blokovi u projektiranju i realizaciji upravljačkih, komunikacijskih i instrumentacijskih krugova i uređaja.

Na slici 5.1 prikazane su kućišta operacijskog pojačala u dvjema izvedbama i tipične oznake stezaljki.



Slika 5.1: Tipična kućišta i razmještaj stezaljki operacijskog pojačala [Izvor: autorski rad]

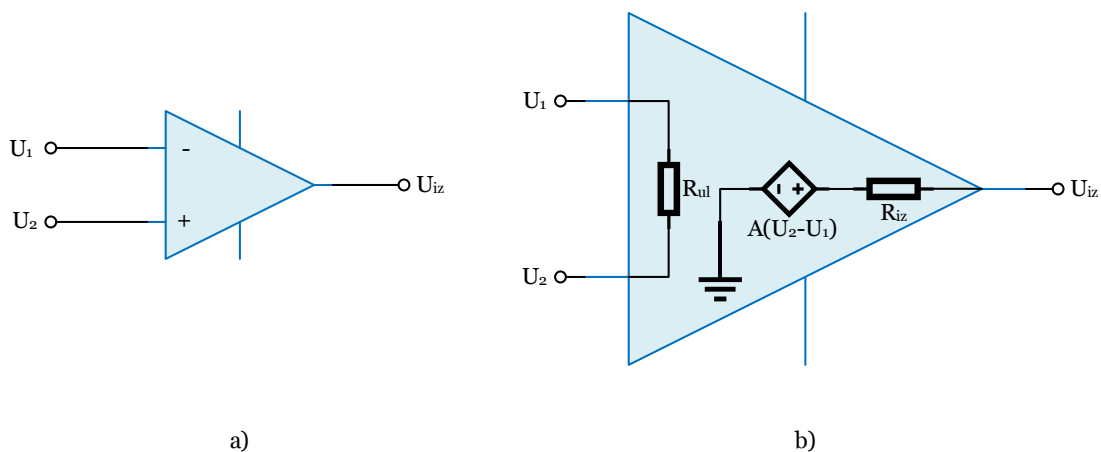
Oznake stezaljki i simbol ne nalaze se na stvarnim uređajima, ali se mogu naći u podacima za svako operacijsko pojačalo koje se koristi. Stezaljka označena sa NC (eng. *no connection*) ne koristi se. Stezaljke namještanje (eng. *balance*) ili izjednačavanje (eng. *offset*) važne su za primjenu operacijskih pojačala u složenim sklopovima. Na njih se spajaju otpornici odgovarajućih vrijednosti koji omogućuju da se izlazni napon može namjestiti na nulu kada je i ulazni napon jednak nuli. Stezaljke E+ i E- spojene su na dvostruki izvor napajanja, čije su vrijednosti obično u području od ± 5 V do ± 15 V. Snaga koju operacijska pojačala predaju

okolnoj mreži upravo je snaga koju crpe iz ovih izvora. Stezaljke napajanja ne prikazuju se u shemama pojačala, ali se pretpostavlja da su uvijek priključene.

Za analizu ulazno – izlaznih svojstava operacijskih pojačala bitne su preostale tri stezaljke: invertirajući ulaz (eng. *inverting input*), neinvertirajući ulaz (eng. *non-inverting input*) i izlaz (eng. *output*), koje su u interakciji s ostatkom mreže, odnosno elementima i sklopovima koji „okružuju” pojačalo.

Operacijsko pojačalo može se kao i bilo koje drugo pojačalo prikazati u jednostavnoj formi kao cjeloviti blok, pomoću triju temeljnih parametara R_{ul} , R_{iz} , A . Ono što ga čini različitim od drugih tipova pojačala upravo su vrijednosti tih triju parametara. Za operacijsko pojačalo ulazni je otpor uvijek vrlo velik, najmanje 100 k Ω , a često i znatno viši od te vrijednosti. Naponsko pojačanje otvorenoga kruga A vrlo je veliko, reda veličine 10^5 . Izlazna je impedancija vrlo mala i kreće se oko 30 Ω . Bez obzira na to kako je izvedeno, svako pojačalo, čiji parametri približno odgovaraju navedenima, može se smatrati operacijskim pojačalom.

U električnim shemama operacijsko se pojačalo prikazuje simbolom u obliku trokuta, kako je prikazano na slici 5.2 a).



Slika 5.2: Operacijsko pojačalo: a) simbol, b) model [Izvor: autorski rad]

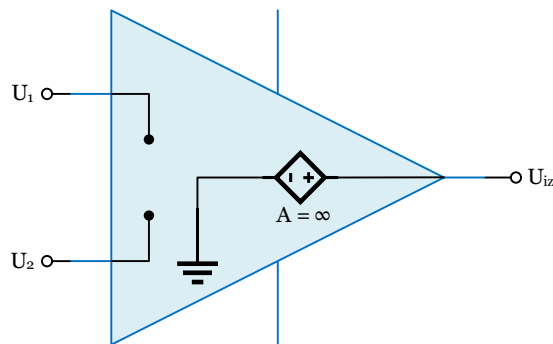
Simbol ima dvije ulazne stezaljke (-) i (+), poznate kao invertirajući i neinvertirajući ulaz. Treća je stezaljka u vrhu izlazna. Napon na invertirajućem ulazu označen je s U_1 , a na neinvertirajućem ulazu s U_2 . Oba ova napona mjere se u odnosu na referentni čvor – uzemljenje, koji na simbolu nije posebno naznačen. Na slici 5.2 b) prikazan je model operacijskog pojačala. Ako se žele analizirati svojstva nekog kruga, operacijsko pojačalo može se zamijeniti modelom, a zatim se primijene uobičajene metode analize krugova.

Međutim, pogodnije je za analizu rada sklopova s operacijskim pojačalima primijeniti tzv. metodu prividnoga, odnosno virtualnog kratkog spoja, gdje se uzima u obzir činjenica da su R_{ul} i A vrlo veliki, a R_{iz} vrlo mali.

Metoda se temelji na aproksimacijama beskonačno velikih R_{ul} i A i beskonačno malog R_{iz} . Operacijsko pojačalo takvih svojstava naziva se *idealno operacijsko pojačalo*. Iako u praksi ne postoji, njegova primjena u analizi daje rezultate bliske realnom operacijskom pojačalu, a sama analiza bitno je pojednostavljena.

5.1.1. Idealno operacijsko pojačalo

Idealizirani prikaz modela operacijskog pojačala prikazan je na slici 5.3.



Slika 5.3: Model idealnog operacijskog pojačala [Izvor: autorski rad]

Idealno operacijsko pojačalo određeno je uvjetima:

$$A \rightarrow \infty ; R_{ul} \rightarrow \infty ; R_{iz} = 0.$$

Jednadžba 5.1

Metoda prividnoga kratkog spoja kod idealnog operacijskog pojačala primjenjuje se pod sljedećim pretpostavkama:

- nema razlike potencijala među ulaznim stezaljkama: $U_1 - U_2 = 0$
- obje struje koje ulaze u ulazne stezaljke jednake su nuli: $I_{ul1} = I_{ul2} = 0$.

Razmotrimo prvu pretpostavku. U ispravno projektiranom krugu operacijskog pojačala izlazni se napon može mijenjati u nekim granicama, ovisno o svojstvima pojačala, ali ne može biti veći od napona napajanja E , tj. $|U_{iz}| < E$. Kako je $|U_{iz}| = A * |U_2 - U_1|$, slijedi:

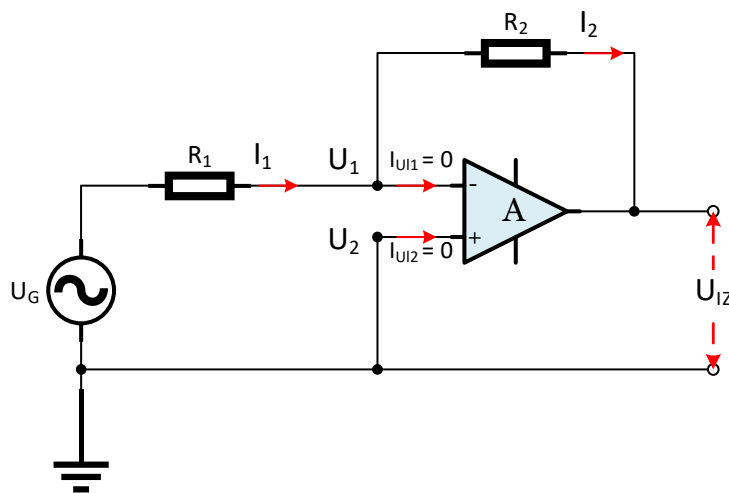
$$|U_2 - U_1| < \frac{E}{A}.$$

Jednadžba 5.2

Za vrlo veliko pojačanje A razlika ulaznih napona mora biti približno jednaka nuli, što je dokaz valjanosti prve pretpostavke. Čak i za $A \rightarrow \infty$ ispravno konfigurirano operacijsko pojačalo imaće konačni izlazni napon, jer neki konačni U_{iz} podijeljen s beskonačnim pojačanjem daje nulu.

Druga pretpostavka slijedi iz prve, a u vezi je s vrlo velikim ulaznim otporom. Ulazna struja $(U_2 - U_1)/R_{ul}$ mora biti vrlo mala, odnosno približno jednaka nuli, a to je potvrda druge pretpostavke.

Razmotrimo jednu od tipičnih konfiguracija sklopa s operacijskim pojačalom, kako je prikazan na slici 5.4.



Slika 5.4: Tipična realizacija sklopa s operacijskim pojačalima [Izvor: autorski rad]

Smatrat ćemo operacijsko pojačalo idealnim u smislu $R_{ul} \rightarrow \infty$, $R_{iz} = 0$, ali s nekim konačnim pojačanjem A . U tom je slučaju izlazni napon: $U_{iz} = A * (U_2 - U_1)$. Kako je $U_2 = 0$ (neinvertirajući ulaz uzemljen), dobije se za U_1 :

$$U_1 = -\frac{U_{iz}}{A}.$$

Jednadžba 5.3

Struje koje teku otporima R_1 i R_2 su:

$$I_1 = \frac{U_G - U_1}{R_1} = \frac{U_G + \frac{U_{iz}}{A}}{R_1}$$

Jednadžba 5.4

$$I_2 = \frac{U_1 - U_{iz}}{R_2} = \frac{-\frac{U_{iz}}{A} - U_{iz}}{R_2}.$$

Jednadžba 5.5

Prema svojstvima idealnog operacijskog pojačala ulazna struja u (-) stezaljku I_{ul1} jednaka je nula pa je $I_2 = I_1$. Izjednače li se gornje dvije relacije, dobije se omjer izlaznog i ulaznog napona generatora signala:

$$\frac{U_{iz}}{U_G} = -\frac{R_2}{R_1} * \frac{1}{1 + \frac{R_1 + R_2}{A * R_1}},$$

Jednadžba 5.6

a to je izraz za pojačanje kruga. Općenito, za realne vrijednosti pojačanja otvorenog kruga ($A = 10^5$) stvarno pojačanje dano gornjom relacijom bit će vrlo blizu pojačanju idealnog operacijskog pojačala ($A \infty$). Uz beskonačno veliko pojačanje dobije se jednostavnija, a dovoljno točna relacija:

$$\frac{U_{iz}}{U_G} = -\frac{R_2}{R_1}.$$

Jednadžba 5.7

Iz gornje analize mogu se navesti neka bitna zapažanja:

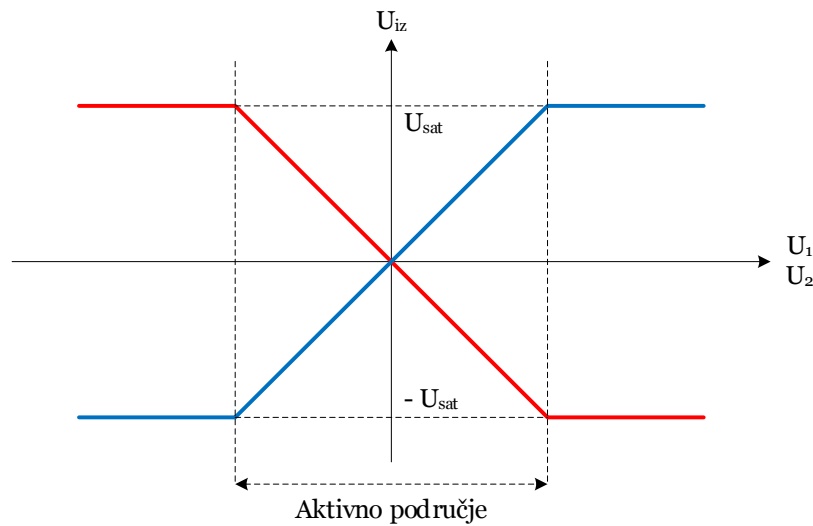
Pojačanje kruga neovisno je o pojačanju operacijskog pojačala. Premda je pojačanje operacijskih pojačala beskonačno, za konačni ulazni napon generatora U_G izlazni napon U_{iz} je konačan (naravno, uz uvjet da je $R_1 \neq 0$). To potvrđuje i relacija . Do ovog se rezultata dolazi jer postoji veza izlaza s invertirajućim ulazom preko otpornika R_2 . Ovakva se veza zove *negativna povratna veza*.

Kada je jedna od stezaljki uzemljena (neinvertirajući ulaz u razmatranom slučaju), izravno ili preko otpornika, obje ulazne stezaljke prividno su kratko spojene, jer je $U_1 = U_2$. Sada je jasno zašto se metoda koju smo primijenili zove metoda prividnog kratkog spoja. Stvaranje kratkog spoja nema jer ulazi nisu međusobno ožičeni. Kada je jedna ulazna stezaljka uzemljena, druga je prividno uzemljena. U gornjem slučaju prividno je uzemljen invertirajući ulaz.

Odgovarajućim izborom otpornika R_1 i R_2 može se teoretski dobiti bilo koji iznos pojačanja. U praksi neki drugi faktori ograničavaju mogući opseg pojačanja i radno područje unutar kojeg je moguće dobiti očekivana pojačanja.

5.1.2. Područja rada operacijskih pojačala

Prijenosna karakteristika koja pokazuje ovisnost izlaznog o ulaznim naponima kod invertirajućeg i neinvertirajućeg operacijskog pojačala prikazana je na slici 5.5 (Kovačević, 2010).

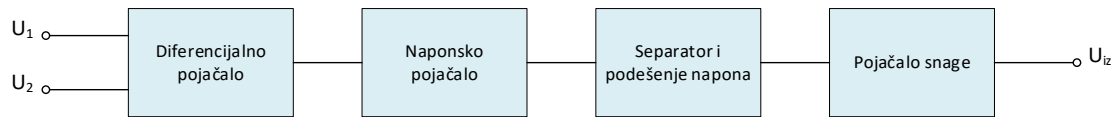


Slika 5.5: Prijenosna karakteristika operacijskog pojačala [Izvor: autorski rad]

Karakteristika je aproksimirana trima ravnim segmentima koji definiraju dva temeljna područja rada operacijska pojačala. Područje u kojem vrijedi linearni odnos $U_{iz} = A \cdot U_{ul}$ jest *aktivno područje* i to je uobičajeno područje rada operacijskog pojačala. Kada ulazni naponi pređu iznad ili padnu ispod određenih nivoa, izlazni se napon zadržava na stalnoj vrijednosti. Lako je otkriti što je tomu uzrok. Naime, operacijsko pojačalo priključeno je na dvostruki istosmjerni izvor napajanja $+E$ i $-E$, najčešće je to napon od ± 15 V. Za očekivati je da pojačalo ne može generirati izlazni napon, koji bi bio veći od vlastitog izvora napajanja. Postoji neka granična vrijednost nakon koje pojačalo ulazi u *područje zasićenja* ili *saturacije* za pozitivne i negativne napone. Upravo je to područje u kojem ulazno – izlazna prijenosna karakteristika prelazi u vodoravnu crtu. Dva su takva područja za pozitivni i za negativni ulazni napon. Izlazni naponi $\pm U_{sat}$ nazivaju se naponi zasićenja. Mjerenja na realnim operacijskim pojačalima pokazuju da su ti naponi samo malo manji od napona napajanja $\pm E$. Naponi zasićenja ograničuju opseg vrijednosti izlaznih napona koji se mogu postići s operacijskim pojačalima. Rad u području zasićenja pogodan je samo za neke posebne primjene operacijskih pojačala, kao što su komparatori.

5.1.3. Realno operacijsko pojačalo

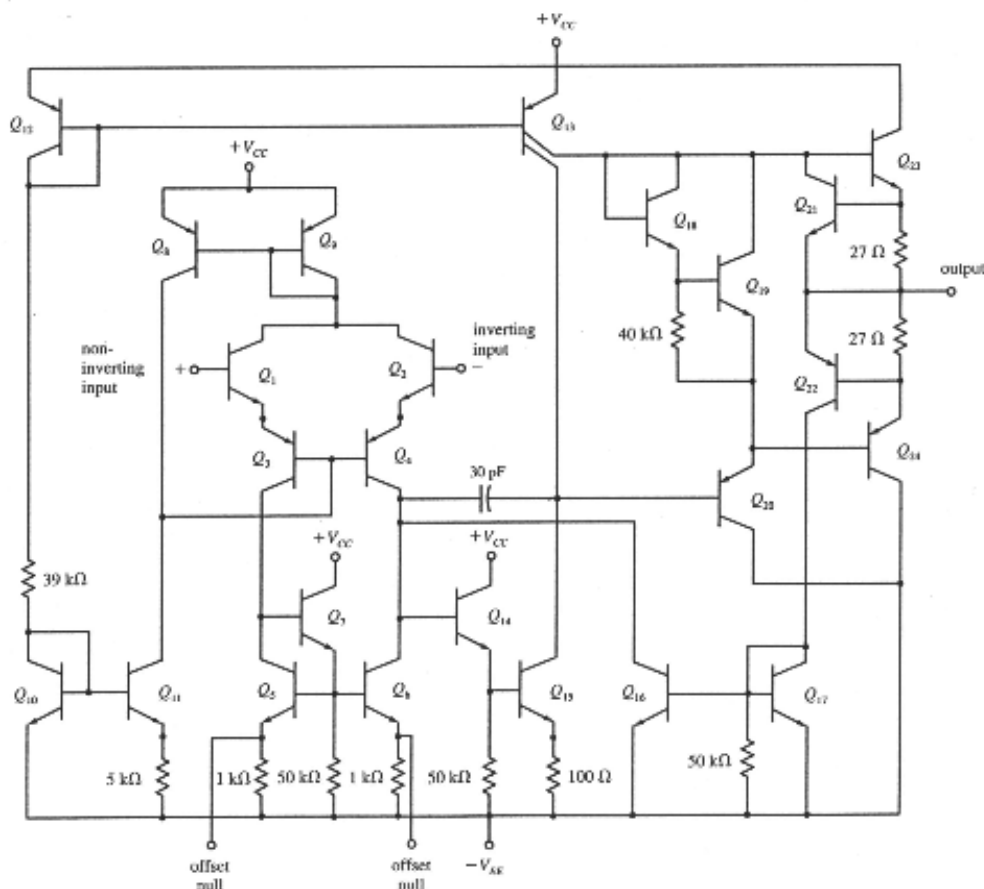
Realno operacijsko pojačalo može se prikazati kao blokdiagram, kako je prikazano na slici 5.6.



Slika 5.6: Blok dijagram realnog operacijskog pojačala [Izvor: autorski rad]

Prvi, ulazni stupanj diferencijalno je pojačalo. Kako njegova ulazna impedancija obično nije dovoljno velika, izvode se modificirane inačice temeljnog sklopa diferencijalnog pojačala ili se umjesto bipolarnih tranzistora koriste unipolarni tranzistori. Kao rezultat dobije se ulazna impedancija reda veličine M Ω . Drugi je stupanj naponsko pojačalo visokog pojačanja. Tipična vrijednost ukupnog pojačanja najmanje je 10⁵, odnosno 100 dB. Sljedeći međustupanj sadrži separator (eng. *buffer*) realiziran emitterskim slijedilom i sklopom za namještanje napona. Posljednji sklop potreban je za namještanje izlaznog napona na nulu za slučaj kada je ulazni napon jednak nuli. Izlazni je stupanj pojačalo snage male izlazne impedancije, obično oko 100 Ω .

Najpopularnije operacijsko pojačalo koje predstavlja industrijski standard nosi oznaku 741, a tipična izvedba prikazana je na slici 5.7.



Slika 5.7: Operacijsko pojačalo 741 [Izvor: Kovačević.2010]

To je linearni integrirani krug s 24 tranzistora, 11 otpornika i jednim kondenzatorom. Proizvode ga razni proizvođači koji uz broj 741 daju svoje oznake, primjerice $\mu 741$ (eng. *Fairchild*) ili LM741 (eng. *National semiconductors*). Ako postoji dodatno slovo uz temeljnu oznaku, njime definiraju temperaturna svojstva, kao $\mu 741 A$ (vojno – tehnički uvjeti rada u rasponu od $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$) ili $\mu 741 C$ (industrijski uvjeti za temperaturni raspon od $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $70\text{ }^{\circ}\text{C}$). S istosmjernim napajanjima $U_{CC} = U_{CE} = 15\text{ V}$ postižu se izlazni naponi od $\pm 10\text{ V}$ ili nešto viši. Izlaz 741 pojačala zaštićen je od kratkog spoja tako da je izlazna struja ograničena na 25 mA.

Tipični parametri ovog pojačala su:

- Naponsko aponsko pojačanje A – pod otvorenim krugom podrazumijeva se da nema povratne veze s izlaza na bilo koji od ulaza. Pojačanje A omjer je promjene izlaznog napona u odnosu na promjenu diferencijalnoga ulaznog napona. Tipična je vrijednost $A = 20000$.
- Ulazni otpor R_{ul} – to je otpor u dvjema ulaznim stezaljkama i obično je iznosa 2 M Ω . Ponekad se navodi kao otpor između ulaznih stezaljki i uzemljenja.
- Izlazni otpor R_{iz} – tipična vrijednost za pojačalo 741 jest 75 Ω .

Korisnik ne mora znati mnogo o unutarnjoj strukturi bloka pojačala, ali mora znati sve o karakteristikama koje imaju veze na njegova svojstva s gledišta ulaza i/ili izlaza bloka. Te podatke daje proizvođač u detaljnoj tehničkoj specifikaciji. Tako pored spomenutih, realno operacijsko pojačalo sadrži i niz drugih važnih parametara od kojih ćemo navesti najznačajnije:

- faktor potiskivanja (eng. *Common Mode Rejection Ratio*, CMRR).

Operacijsko pojačalo može se razmatrati kao poseban oblik diferencijalnog pojačala koje pojačava razliku napona među dvama ulaznim signalima. Diferencijski signal je: $U_D = U_2 - U_1$. Pojačalo mora biti neosjetljivo na promjenu napona koji se istovremeno pojavljuju na oba ulaza. Zajednički signal srednja je vrijednost ulaznih signala: $U_Z = (U_2 + U_1) / 2$. Izlazni je napon prema relaciji:

$$U_{iz} = A_D * U_D + A_Z * U_Z,$$

Jednadžba 5.8

gdje je A_D diferencijalno naponsko pojačanje, a A_Z zajedničko naponsko pojačanje. Operacijska pojačala imaju $A_Z = 0$ i u potpunosti potiskuju zajednički signal. Dakle, kada su ulazni signali jednaki i različiti od nule, izlazni signal jednak je nuli. Odstupanje od tih idealnih uvjeta mjera je kvalitete operacijskog pojačala. To je sposobnost operacijskih pojačala praviti razliku između diferencijalnog i zajedničkog signala. Potrebno je ostvariti što veće diferencijalno, uz što manje zajedničko pojačanje. Kao mjera definira se faktor potiskivanja CMRR. To je apsolutni iznos omjera diferencijalnog i zajedničkog pojačanja:

$$CMRR = \left| \frac{A_D}{A_Z} \right|.$$

Jednadžba 5.9

Izražava se obično u decibelima:

$$CMRR = 20 \log \frac{A_D}{A_Z}.$$

Jednadžba 5.10

Tipična vrijednost mu je 90 dB ($A_D / A_Z \approx 32000$).

5.1.4. Sklopovi s operacijskim pojačalima

Već je spomenuto da su prve primjene operacijskih pojačala bile u analognim računalima, i to za provođenje linearnih operacija zbrajanja, oduzimanja, deriviranja i integriranja. Danas se operacijska pojačala koriste i za druge linearne aplikacije kao što su strujno – naponski i naponsko – strujni pretvarači, instrumentacijska pojačala, naponska slijedila (transformatori impedancije) i aktivni filtri.

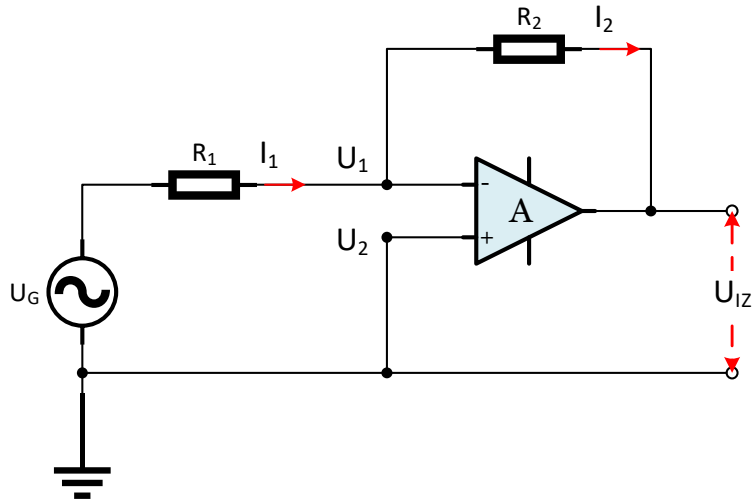
Pogodna su i za izvedbu nelinearnih sklopova kao što su limiteri, komparatori, naponski regulatori, ispravljači i detektori signala, množila, logaritamska pojačala, kao i za realizaciju niza digitalnih sklopova.

Uz pomoć negativne povratne veze mogu se, uz određeno smanjenje pojačanja, znatno poboljšati svojstva pojačala. S druge strane, pozitivna povratna veza omogućuje povećanje pojačanja do te mjere da izlaz pojačala generira signal bez ulaza. To ukazuje na mogućnost uporabe operacijskih pojačala u projektiranju sinusoidnih oscilatora i generatora nesinusoidnih valnih oblika.

Mi ćemo se ograničiti samo na neke temeljne sklopove koji daju jasan uvid u sami rad operacijskih pojačala i olakšavaju razumijevanje primjene operacijskih pojačala u složenijim sklopovima (Kovačević, 2010).

5.1.4.1. Invertirajuće pojačalo

Operacijsko pojačalo koje djeluje kao invertirajuće pojačalo možemo vidjeti na slici 5.8 (Kovačević, 2010).



Slika 5.8: Invertirajuće pojačalo [Izvor: autorski rad]

Ovaj je krug već analiziran na slici 5.4 i pokazano je da se može usvojiti pretpostavka beskonačnoga pojačanja operacijskih pojačala. Do relacije za pojačanje sklopa dolazi se sada znatno jednostavnije. Ako uzmemo u obzir da je $U_1 = 0$, koji je prividno uzemljen invertirajući ulaz i $I_1 = I_2$, dobije se relacija:

$$I_1 = \frac{U_G}{R_1} \quad , \quad I_2 = -\frac{U_{iz}}{R_2} \quad \Rightarrow \quad \frac{U_G}{R_1} = -\frac{U_{iz}}{R_2}$$

Jednadžba 5.11

Izlazni napon je:

$$U_{iz} = -U_G * \frac{R_2}{R_1}$$

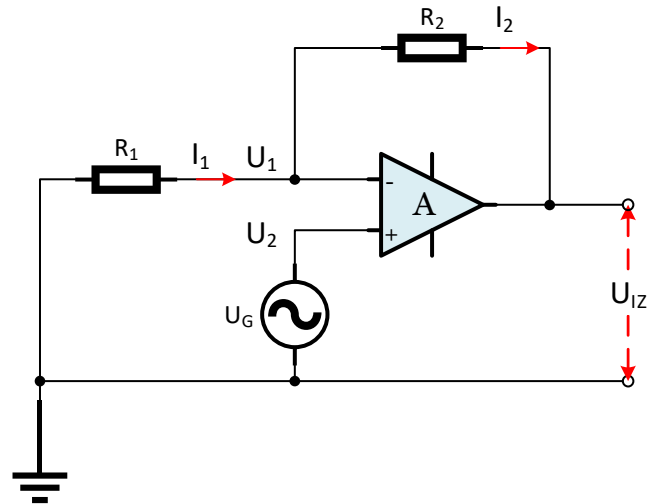
Jednadžba 5.12

gdje je $R_2 / R_1 = A_V$ pojačanje.

Ulazni i izlazni naponi uvijek su suprotnoga polariteta pa se i zato zovu *invertirajuće pojačalo*. U posebnom slučaju kada je $R_1 = R_2$, invertirajuće pojačalo postaje naponsko slijedilo s invertiranim naponom i jediničnim pojačanjem.

5.1.4.2. Neinvertirajuće pojačalo

Operacijsko pojačalo koje djeluje kao neinvertirajuće pojačalo možemo vidjeti na slici 5.9.



Slika 5.9: Neinvertirajuće pojačalo [Izvor: autorski rad]

Generator signala spojen je na neinvertirajući ulaz, $U_2 = U_G$. Kako nema razlike potencijala među ulaznim stezaljkama, onda je i $U_2 = U_G$ pa su struje prema relaciji:

$$I_1 = -\frac{U_1}{R_1} = -\frac{U_G}{R_1}, \quad I_2 = \frac{U_1 - U_{iz}}{R_2} = \frac{U_G - U_{iz}}{R_2}.$$

Jednadžba 5.13

Uz svojstvo idealnoga operacijskog pojačala da su struje $I_1 = I_2$, dobije se relacija:

$$-\frac{U_G}{R_1} = \frac{U_G - U_{iz}}{R_2}.$$

Jednadžba 5.14

Izlazni napon je:

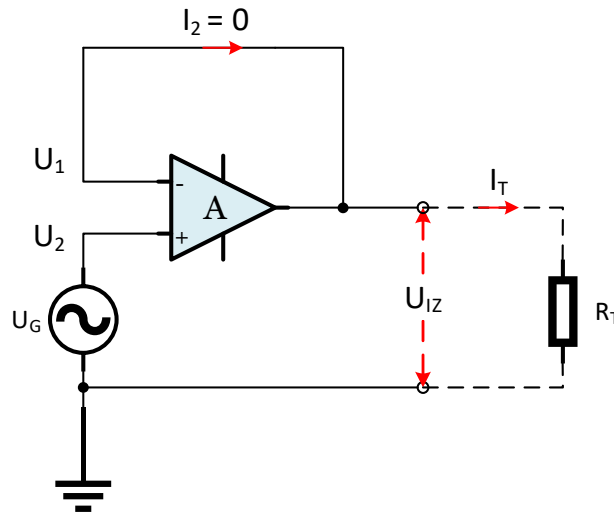
$$U_{iz} = U_G * \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right).$$

Jednadžba 5.15

Pojačanje sklopa A_V je $(1 + R_2/R_1) \geq 1$, što znači da su ulazni i izlazni napon uvijek istoga polariteta. Zato se ovaj sklop naziva *neinvertirajuće pojačalo*.

5.1.4.3. Naponsko slijedilo

Ako se u relaciji za izlazni napon neinvertirajućeg pojačala odredi $R_2 = 0$, dobije se $U_{iz} = U_G$. Pri tom je otpornik R_1 nepotreban i može se ukloniti. Sklop operacijskog pojačala u naponskom slijedilu prikazan je na slici 5.10.

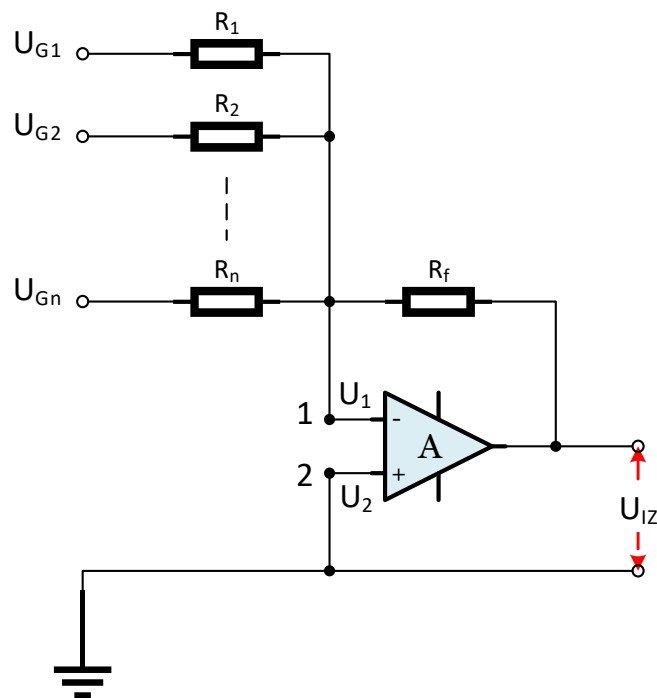


Slika 5.10: Naponsko slijedilo [Izvor: autorski rad]

Zove se naponsko slijedilo jer izlazni napon slijedi ulazni napon generatora. Naime, ulaz U_2 vezan je na U_G , a iz svojstva operacijskog pojačala je $U_1 = U_2$. Ulaz U_1 spojen je izravno na izlaz pa očigledno vrijedi $U_{iz} = U_G$. Kako je $A = 1$, funkcija sklopa nije naponsko pojačanje. Sklop se zove još i *izolacijsko pojačalo* ili *separator* (eng. *buffer*). U elektroničkim se krugovima koristi za zaštitu trošila R_T od protjecanja struje izravno iz generatora ili nekog prethodnog dijela sklopa. Dakle, postavlja se među dvama složenim krugovima kada se želi izbjeći međusobno djelovanje. Struju trošilu predaje samo operacijsko pojačalo, jer je $I_2 = 0$. Važno je da struja kroz trošila I_T ne prijeđe najveći iznos dozvoljene izlazne struje operacijskog pojačala. Naponsko slijedilo posebno je upotrebljivo kada se trošilo malog otpora opskrbljuje iz izvora velikog unutarnjeg otpora. Zbog svojega velikog ulaznog i malog izlaznog otpora predstavlja dobar transformator impedancije.

5.1.4.4. Sumirajuće pojačalo

U projektiranju aktivnih filtera, kao i u realizaciji sustava za prikupljanje podataka, često se javlja potreba za pojačalima s višestrukim ulazom i jednim izlazom, pri čemu se na izlazu treba pojaviti zbroj ulaznih signala. Krug s operacijskim pojačalima, poznat kao sumirajuće pojačalo, prikazan je na slici 5.11 (Kovačević, 2010).



Slika 5.11: Sumirajuće pojačalo [Izvor: autorski rad]

To je zapravo invertirajuće pojačalo s višestrukim ulazima. Iz jednadžbe struje za čvor 1 dobije se:

$$\frac{U_{G1}}{R_1} + \frac{U_{G2}}{R_2} + \dots + \frac{U_{Gn}}{R_n} = -\frac{U_{iz}}{R_f}$$

Jednadžba 5.16

pa je izlazni napon:

$$U_{iz} = -U_{G1} * \frac{R_f}{R_1} - U_{G2} * \frac{R_f}{R_2} - \dots - U_{Gn} * \frac{R_f}{R_n} = -R_f * \sum_{n=1}^N \frac{U_{Gn}}{R_n}$$

Jednadžba 5.17

Budući da je stezaljka 1 prividno uzemljena, odziv kruga na bilo koji ulaz može se dobiti neovisno od ostalih ($N - 1$) ulaza. Ukupni izlaz suma je odziva pojedinačnih ulaza, s tim da su različita pojačanja pojedinih ulaza, a ovise o odnosu R_f / R_n .

Kada bi svi otpori bili jednaki, primjerice $R_n = R_f$, imali bi:

$$U_{iz} = -\frac{R_f}{R_1} * (U_{G1} + U_{G2} + \dots + U_{Gn}) = -\frac{R_f}{R_1} \sum_{n=1}^N U_{Gn}.$$

Jednadžba 5.18

Izlazni je napon proporcionalan zbroju pojedinačnih ulaznih napona.

Konačno, za slučaj $R_f = R_1$ invertirani je algebarski zbroj ulaznih napona:

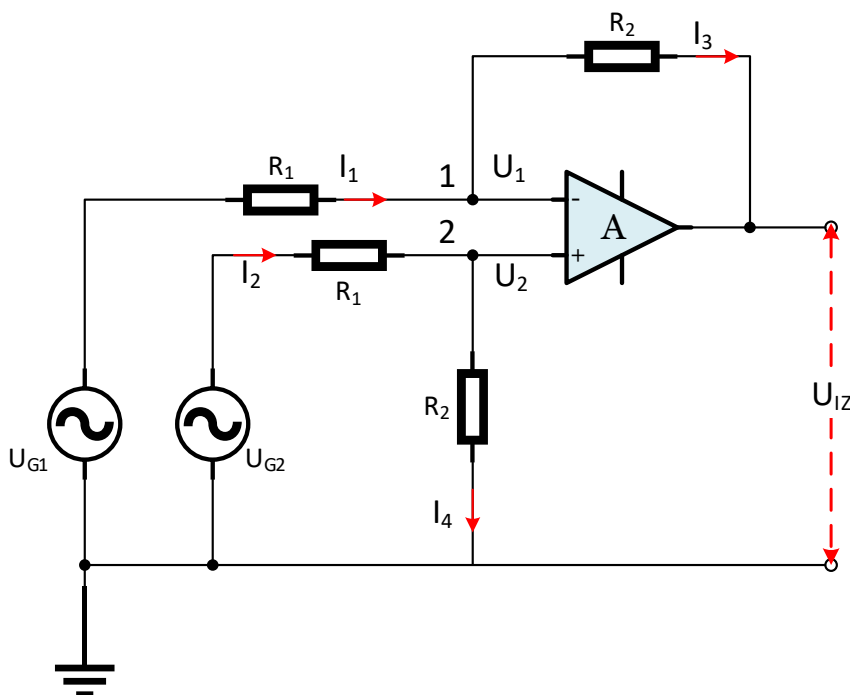
$$U_{iz} = -(U_{G1} + U_{G2} + \dots + U_{Gn}) = -\sum_{n=1}^N U_{Gn}.$$

Jednadžba 5.19

Primjer uporabe ovakvog sklopa jest „audio mixer“ gdje ulazni naponi dolaze s nekoliko odvojenih mikrofona, a izlazni napon njihova je suma.

5.1.4.5. Diferencijalno pojačalo

Idealno diferencijalno pojačalo daje na izlazu pojačanu razliku ulaznih napona (<https://www.electronics-tutorials.ws/>). Primjer takvog sklopa realiziranog s operacijskim pojačalom prikazan je na slici 5.12.



Slika 5.12: Diferencijalno pojačalo [Izvor: autorski rad]

Jednadžba struja za invertirajući ulaz, uzevši u obzir da je $U_1 = U_2 = U$, jest:

$$I_1 = I_3 \Rightarrow \frac{U_{G1} - U}{R_1} = \frac{U - U_{iz}}{R_2},$$

Jednadžba 5.20

a za neinvertirajući ulaz:

$$I_2 = I_4 \Rightarrow \frac{U_{G2} - U}{R_1} = \frac{U}{R_2}.$$

Jednadžba 5.21

Sređivanjem gornjih dviju jednadžbi dobiva se izraz:

$$U_{G1} * R_2 + U_{iz} * R_1 = U * (R_1 + R_2)$$

Jednadžba 5.22

$$U_{G2} * R_2 = U * (R_1 + R_2).$$

Jednadžba 5.23

Desne strane jednadžbe jednake su pa se mogu izjednačiti i lijeve strane:

$$U_{G1} * R_2 + U_{iz} * R_1 = U_{G2} * R_2.$$

Jednadžba 5.24

Izlazni se napon može prikazati putem izraza:

$$U_{iz} = \frac{R_2}{R_1} * (U_{G2} - U_{G1}).$$

Jednadžba 5.25

U općem slučaju mogu se odabrati različite vrijednosti svih otpornika sklopa. Tada je izlazni napon oblika:

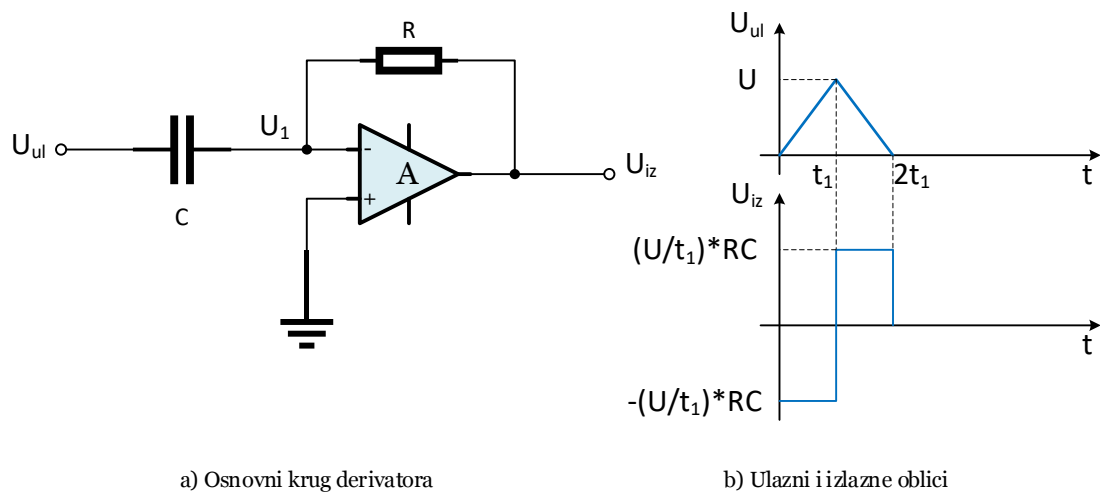
$$U_{iz} = a_2 * U_{G2} - a_1 * U_{G1},$$

Jednadžba 5.26

gdje su a_1 i a_2 pozitivne konstante ovisne o vrijednostima odabranih otpornika.

5.1.4.6. Derivatorsko pojačalo

Derivatorsko pojačalo sklop je koji izračunava trenutni nagib linije u svakoj točki valnog oblika. Izlaz derivatora uvijek je proporcionalan brzini promjene ulaznog napona. Slika 5.13 prikazuje osnovni krug derivatorskog pojačala (<https://www.electronics-tutorials.ws/>).



Slika 5.13: Osnovni krug derivatora koristeći operacijsko pojačalo [Izvor: autorski rad]

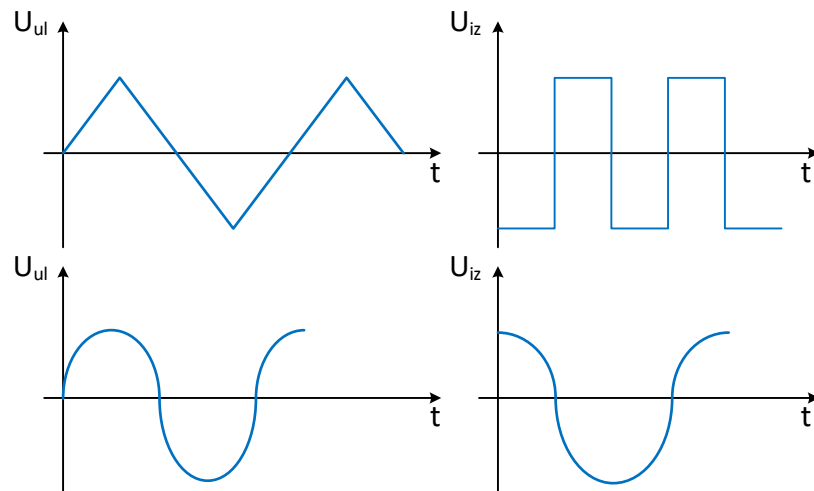
Ovaj sklop je invertirajuće pojačalo, ali umjesto otpornika koristi se kondenzator kao ulazni element. Kada se ulazni napon $u_{ul}(t)$ promijeni, izlaz će biti derivacija u odnosu na vrijeme ulaznog signala pomnožena s konstantnim faktorom. U obliku jednadžbe:

$$U_{iz} = -R * C \left(\frac{du_{ul}(t)}{dt} \right).$$

Jednadžba 5.27

Kao što se vidi, konstanta koja množi derivaciju jest $-R * C$.

Slika 5.14 prikazuje izlaz proizveden kada se nekoliko ulaznih funkcija primijeni na ulaz derivatora. Kada je trokutasti signal na ulazu, izlaz će biti negativni kvadratni oblik, a kad je ulaz sinusni signal, na izlazu ćemo dobiti negativni kosinus signal.



Slika 5.14: Osnovne derivatorske reakcije [Izvor: autorski rad]

Vrijednost napona na izlazu dana je sljedećom jednađbom:

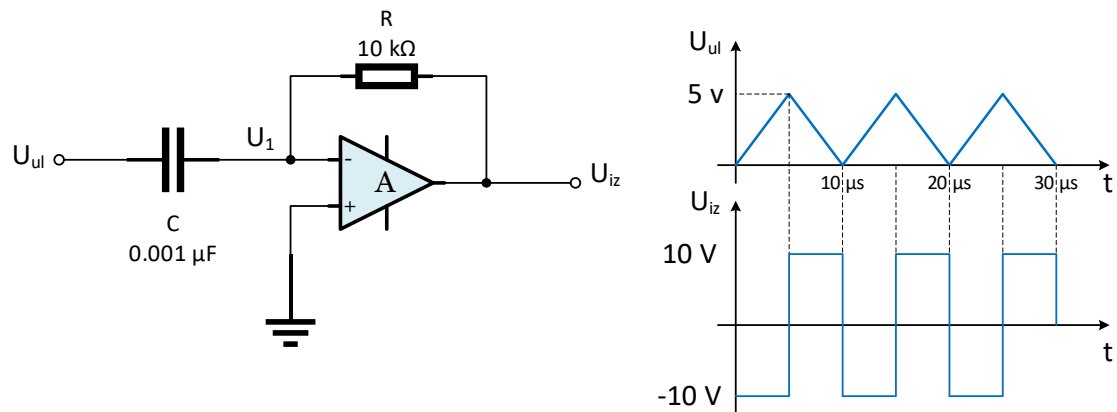
$$U_{iz} = -\frac{\Delta U}{\Delta t} * R * C.$$

Jednađba 5.28

Gornja jednađba primjenjuje se svaki put kada postoji konstantan nagib ulaznog signala. Kako bismo ilustrirali ovaj koncept, pretpostavljamo u dijelu slike 5.14 b) trokutasti ulazni signal koji se primjenjuje na derivatore. Odgovarajući je izlazni napon kao što je naznačeno. Za vrijeme od 0 do t_1 nagib ulaznog napona je U/t_1 , gdje je napon U ulazni napon postignut u $t = t_1$. Za ovaj vremenski interval izlazni napon je $-(U/t_1) R * C$, kako je i prikazano. Za drugi interval od t_1 do $2t_1$ izlazni napon je dan kao $(U/t_1) R * C$. Dakle, ulaz trokutastog signala proizvodi izlaz kvadratnog signala.

Primjer:

Skicirajte izlazni valni oblik sljedećeg derivatora kada se prikazani trokutasti signal dovede na ulaz pojačala.



Slika 5.15: Derivator s operacijskim pojačalom [Izvor: autorski rad]

Rješenje: Budući da je ulaz trokutasti signal, na izlazu ćemo imati pravokutni signal kako je prikazano na slici. Najveće i najmanje vrijednosti dane su jednačbom:

$$U_{iz} = \pm \left(\frac{\Delta U}{\Delta t} \right) * R * C = \pm \left(\frac{5}{5 \mu s} \right) * 10 \text{ k}\Omega * 0.001 \mu F = \pm 10 \text{ V}.$$

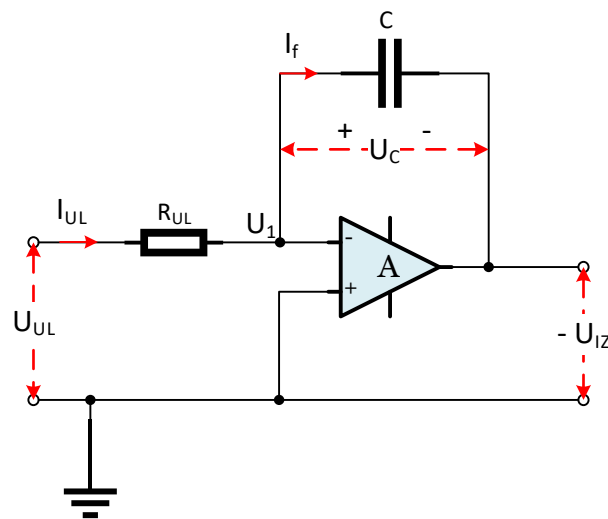
Jednačba 5.29

5.1.4.7. Integratorsko pojačalo

Integratorsko operacijsko pojačalo proizvodi izlazni napon koji je proporcionalan amplitudi i trajanju ulaznog napona (<https://www.electronics-tutorials.ws/>).

Idealno integratorsko operacijsko pojačalo invertirajuće je pojačalo čiji je izlazni napon proporcionalan negativnom integralu ulaznog napona čime se simulira matematička integracija. Operacijska pojačala mogu se koristiti kao dio pojačala s pozitivnom ili negativnom povratnom vezom ili kao krug tipa za zbrajanje ili oduzimanje, koristeći samo otpore u ulaznoj i povratnoj vezi. No, što ako promijenimo otpor R_f povratnog elementa invertirajućeg pojačala sa složenim elementom ovisnim o frekvenciji koji ima reaktanciju X , kao što je kondenzator C ? Kakav bi bio učinak na prienosnu funkciju pojačanja napona operacijskog pojačala preko njegova frekvencijskog raspona kao rezultat ove složene impedancije?

Zamjenom otpora s kondenzatorom dobivamo RC mrežu spoјenu preko povratne veze operacijskog pojačala. Proizvodi se druga vrsta kruga operacijskog pojačala koji se naziva sklop integratora operacijskog pojačala, kako je prikazano na slici 5.16.



Slika 5.16: Integratorsko operacijsko pojačalo [Izvor: autorski rad]

Kao što mu ime govori, integrator operacijskog pojačala krug je operacijskog pojačala koji izvodi matematičku operaciju integracije, to jest možemo uzrokovati da izlaz reagira na promjene ulaznog napona tijekom vremena dok integrator operacijskog pojačala proizvodi izlazni napon koji je proporcionalan integralu ulaznog napona.

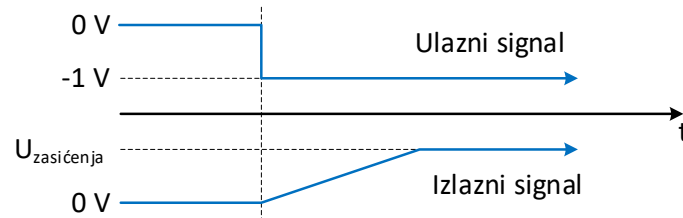
Drugim riječima, veličina izlaznog napona određena je duljinom vremena u kojem je napon prisutan na njegovu ulazu dok se kondenzator puni ili prazni preko negativne povratne veze.

Kada se napon ulaza U_{UL} dovede na ulaz integrirajućeg pojačala, nenabijeni kondenzator C ima vrlo mali otpor i ponaša se poput kratkog spoja dopuštajući najveći iznos struje da teče kroz ulazni otpor R_{UL} jer potencijalna razlika postoji među kondenzatorima. Struja ne teče u ulaz pojačala, a napon U_1 virtualna je zemlja što rezultira nulnim izlazom. Budući da je impedancija kondenzatora u ovoj točki vrlo niska, omjer pojačanja X_C/R_{UL} također je vrlo malen, dajući ukupni dobitak napona manji od jedan (naponski praćeni krug).

Kako se povratni kondenzator C počinje puniti zbog utjecaja ulaznog napona, njegova impedancija X_C polako raste proporcionalno brzini punjenja. Kondenzator se puni brzinom određenom RC vremenskom konstantom τ serijske RC mreže. Negativna povratna sprega prisiljava operacijsko pojačalo da proizvede izlazni napon koji održava virtualno uzemljenje na invertirajućem ulazu operacijskog pojačala.

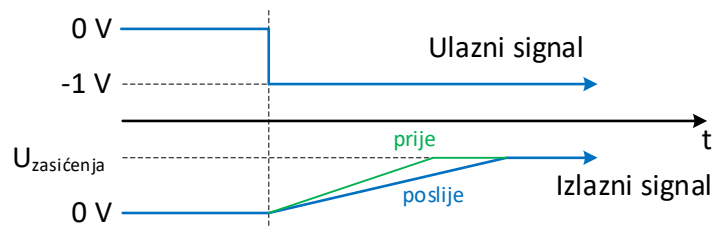
Budući da je kondenzator spojen između invertirajućeg ulaza operacijskog pojačala (koji je na virtualnom potencijalu uzemljenja) i izlaza operacijskog pojačala (koji je sada negativan), napon na kondenzatoru U_C polako se povećava uzrokujući smanjenje struje punjenja kako impedancija kondenzatora raste. To rezultira povećanjem omjera X_C/R_{UL} proizvodeći linearno rastući izlazni napon koji nastavlja rasti sve dok se kondenzator potpuno na naponi.

U ovom trenutku kondenzator djeluje kao otvoreni strujni krug blokirajući daljnji protok istosmjerne struje. Omjer povratnog kondenzatora i ulaznog otpornika X_C/R_{UL} sada je beskonačan, što rezultira beskonačnim pojačanjem. Rezultat je ovog visokog pojačanja (slično pojačanju otvorene petlje operacijskog pojačala) da izlaz pojačala prelazi u zasićenje, kao što je prikazano na slici 5.17.



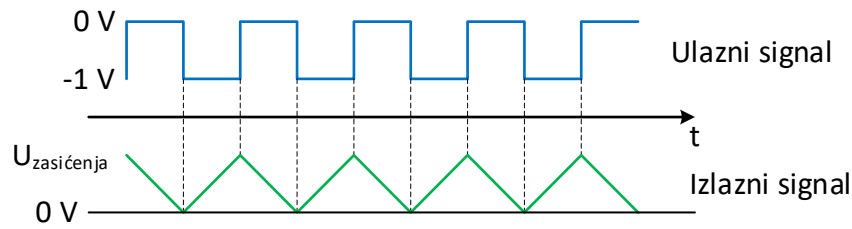
Slika 5.17: Rezultat visokog pojačanja [Izvor: autorski rad]

Brzina povećanja izlaznog napona (brzina promjene) određena je vrijednošću otpornika i kondenzatora, RC vremenskom konstantom. Promjenom vrijednosti RC vremenske konstante, bilo promjenom vrijednosti otpornika ili kondenzatora, također se može promijeniti, na primjer, vrijeme u kojem je potrebno izlaznom naponu dosegnuti zasićenje, kako je prikazano na slici 5.18.



Slika 5.18: Promjena RC vremenske konstante [Izvor: autorski rad]

Ako primijenimo ulazni signal koji se stalno mijenja, kao što je pravokutni signal, na ulaz integratorskog pojačala, tada će se kondenzator puniti i prazniti kao odgovor na promjene u ulaznom naponu. To dovodi do toga da je izlazni napon trokutasti signal na čiji izlaz utječe RC vremenska konstanta kombinacije otpornika i kondenzatora, jer pri višim frekvencijama kondenzator ima manje vrijeme da se potpuno napuni. Ova vrsta sklopa poznata je kao generator rampe, a prijenosna je funkcija prikazana na slici 5.19.



Slika 5.19: Generator rampe [Izvor: autorski rad]

Iz prvih principa znamo da je napon na pločama kondenzatora jednak naboju na kondenzatoru podijeljenom s njegovim kapacitetom koji daje Q/C . Tada je napon preko kondenzatora napon na izlazu U_{IZ} prema tome: $-U_{IZ} = Q/C$. Ako se kondenzator puni i prazni, brzina napona na kondenzatoru dana je relacijom:

$$U_C = \frac{Q}{C}, \quad U_C = U_1 - U_{IZ} = 0 - U_{IZ}$$

Jednadžba 5.30

$$-\frac{dU_{IZ}}{dt} = \frac{dQ}{C * dt} = \frac{1}{C} * \frac{dQ}{dt},$$

Jednadžba 5.31

ali dQ/dt električna je struja i budući da je napon čvora integrirajućeg operacijskog pojačala na njegovom invertirajućem ulaznoj stezaljki nula, $U_1 = 0$, ulazna struja I_{UL} koja teče kroz ulazni otpor R_{UL} dana je kao relacija:

$$I_{UL} = \frac{U_{UL} - 0}{R_{UL}} = \frac{U_{UL}}{R_{UL}}.$$

Jednadžba 5.32

Struja koja teče kroz povratni kondenzator C dana je kao relacija:

$$I_f = C * \frac{dU_{IZ}}{dt} = C * \frac{dQ}{C * dt} = \frac{dQ}{dt} = \frac{dU_{IZ} * C}{dt}.$$

Jednadžba 5.33

Pod pretpostavkom da je ulazna impedancija operacijskog pojačala beskonačna (idealno operacijsko pojačalo), struja ne teče u priključak operacijskog pojačala. Stoga je čvorna jednažba na invertirajućoj ulaznoj stezaljki dana kao:

$$I_{UL} = I_f = \frac{U_{UL}}{R_{UL}} = \frac{dU_{IZ} * C}{dt}$$

Jednažba 5.34

$$\frac{U_{UL}}{U_{IZ}} * \frac{dt}{R_{UL} * C} = 1,$$

Jednažba 5.35

iz čega izvodimo idealni izlazni napon za integratorsko operacijsko pojačalo kao:

$$U_{IZ} = -\frac{1}{R_{UL} * C} * \int_0^t U_{UL} dt = -\int_0^t U_{UL} * \frac{dt}{R_{UL} * C}.$$

Jednažba 5.36

Da malo pojednostavnimo matematiku, ovo se također može napisati kao:

$$U_{IZ} = -\frac{1}{j\omega RC} * U_{UL},$$

Jednažba 5.37

gdje je: , a izlazni napon U_{IZ} konstanta je $1/RC$ puta integral ulaznog napona U_{UL} s obzirom na vrijeme.

Stoga sklop ima prijenosnu funkciju invertirajućeg integratora s konstantom pojačanja od $-1/RC$. Znak minus (-) označava fazni pomak od 180° jer je ulazni napon spojen izravno na invertirajuću ulaznu stezaljku operacijskog pojačala.

5.1.4.8. Komparator operacijskog pojačala

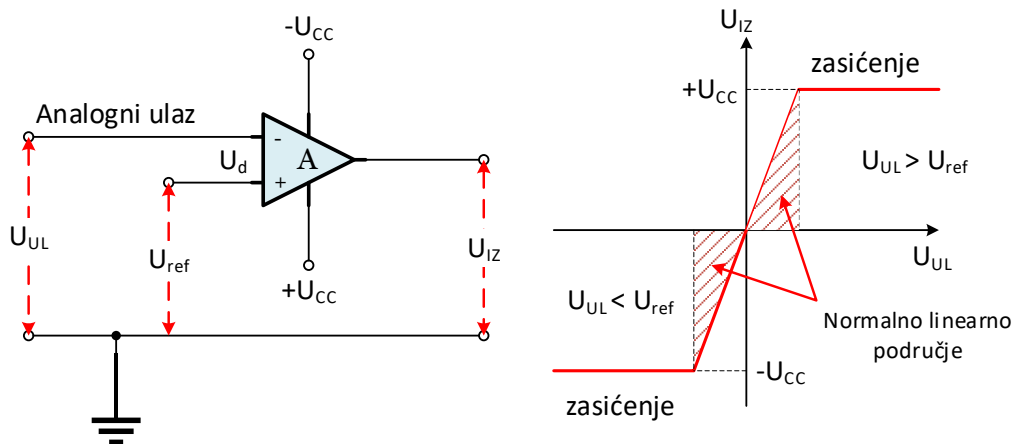
Komparator je elektronički sklop koji koristi operacijsko pojačalo s vrlo visokim pojačanjem u stanju otvorene petlje, to jest nema otpornika na povratnoj vezi (<https://www.electronics-tutorials.ws/>).

Komparator operacijskog pojačala uspoređuje jednu analognu naponsku razinu s drugom analognom naponskom razinom ili nekim prethodno postavljenim referentnim naponom U_{ref} i proizvodi izlazni napon na temelju ove usporedbe napona. Drugim riječima, komparator napona operacijskog pojačala uspoređuje veličine dvaju ulaznih napona i određuje koji je od tih dvaju veći.

U prethodnim pojačalima vidjeli smo da se operacijsko pojačalo može koristiti s negativnom povratnom vezom za kontrolu veličine njegova izlaznog napona u linearnom području obavljajući niz različitih funkcija. Također smo vidjeli da standardno operacijsko pojačalo karakterizira pojačanje otvorene petlje A_o i da je njegov izlazni napon dan izrazom: $U_{iz} = A_o(U_+ - U_-)$, gdje U_+ i U_- odgovaraju naponima na neinvertirajućim i invertirajućim stezaljkama.

S druge strane, komparatori napona koriste ili pozitivnu povratnu vezu ili je uopće nemaju (način otvorene petlje) za prebacivanje izlaza među dvama zasićenim stanjima, jer je u načinu otvorene petlje dobitak napona pojačala u osnovi jednak A_{vo} . Zatim, zbog ovog visokog pojačanja otvorene petlje, izlaz iz komparatora okreće se na svoju negativnu napajajuću stezaljku $-U_{CC}$ pri primjeni promjenjivog ulaznog napona koji prelazi neku unaprijed postavljenu vrijednost praga.

Komparator operacijskog pojačala s otvorenom petljom analogni je sklop koji radi u svom nelinearnom području jer promjene u dvama analognim ulazima U_+ i U_- uzrokuju da ima dva moguća stanja $+U_{CC}$ ili $-U_{CC}$. Tada možemo reći da je komparator napona zapravo 1-bitni analogno-digitalni pretvarač, jer je ulazni napon analogan, ali se izlaz ponaša digitalno. Na slici 5.20 prikazan je osnovni krug komparatora napona operacijskog pojačala.



Slika 5.20: Osnovni krug komparatora napona [Izvor: autorski rad]

S obzirom na gornji krug komparatora operacijskog pojačala, pretpostavimo prvo da je napon ulaza U_{UL} manji od razine istosmjernog napona na U_{ref} ($U_{UL} < U_{ref}$). Kako je neinvertirajući, pozitivni ulaz komparatora manji od invertirajućeg, negativnog ulaza, izlaz će biti nizak i na negativnom naponu napajanja $-U_{CC}$, što rezultira negativnim zasićenjem izlaza.

Ako sada povećamo ulazni napon U_{UL} tako da njegova vrijednost bude veća od referentnog napona U_{ref} na invertirajućem ulazu, izlazni se napon brzo prebacuje na pozitivni napon napajanja $+U_{CC}$, što rezultira pozitivnim zasićenjem izlaza. Ako ponovno smanjimo ulazni napon U_{UL} tako da bude malo manji od referentnog napona, izlaz operacijskog pojačala prebacuje se natrag na svoj negativni napon zasićenja djelujući kako detektor praga.

Tada možemo vidjeti da je komparator napona operacijskog pojačala uređaj čiji izlaz ovisi o vrijednosti ulaznog napona U_{UL} , s obzirom na neku razinu istosmjernog napona, jer je napon na neinvertirajućem ulazu veći od napona na invertirajućem ulazu, a nizak kada je neinvertirajući ulaz manji od invertirajućeg ulaza. Ovaj uvjet vrijedi bez obzira na to je li ulazni signal spojen na invertirajući ili na neinvertirajući ulaz komparatora.

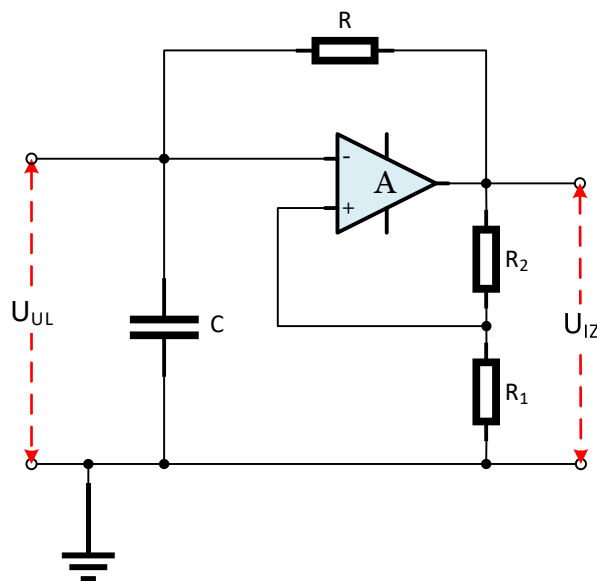
Također možemo vidjeti da je vrijednost izlaznog napona potpuno ovisna o naponu napajanja operacijskog pojačala. U teoriji, zbog velikog pojačanja otvorene petlje operativnih pojačala, veličina njegovog izlaznog napona može biti beskonačna u oba smjera $\pm\infty$.

5.1.5. Oscilatori s operacijskim pojačalima

Oscilacije nesinusoidnog napona mogu se dobiti primjenom pozitivne povratne veze i RC mreže čija vremenska konstanta nabijanja/izbijanja određuje frekvenciju izlaznoga napona ili pomoću elemenata koji imaju karakteristiku negativnoga otpora (Paunović, 2000).

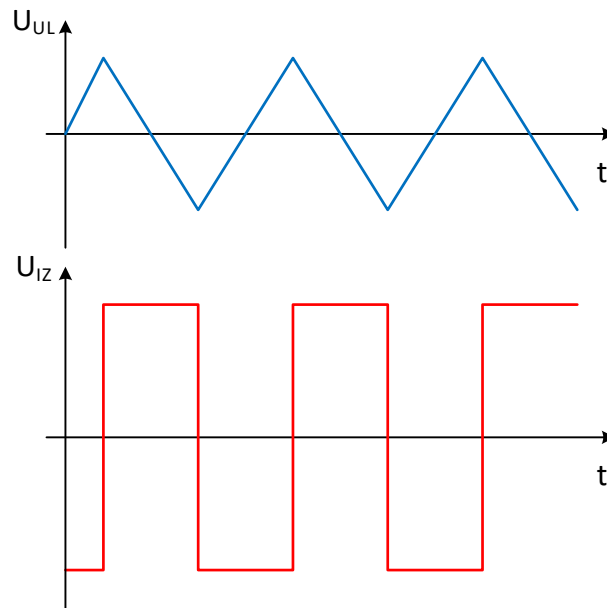
5.1.5.1. Generator pravokutnoga napona

Operacijsko pojačalo u spoju, prema slici 5.21, djeluje kao generator pravokutnog signala, odnosno kao astabilni multivibrator. Otpor R i kondenzator C čine s operacijskim pojačalom integrator, a otpornici R_1 i R_2 djeluju s operacijskim pojačalom kao komparator.



Slika 5.21: Generator pravokutnog napona [Izvor: autorski rad]

Dok izlazni napon ima najveću pozitivnu vrijednost $+U_{IZ}$, kondenzator C nabija se preko otpornika R . Brzina nabijanja ovisi o vremenskoj konstanti RC . Kad napon na kondenzatoru naraste na vrijednost kod koje napon na invertirajućem ulazu postaje veći od napona na neinvertirajućem ulazu (dio pozitivnog izlaznoga napona koji se na neinvertirajući ulaz prenosi preko otpornika R_1), napon na izlazu operacijskog pojačala naglo prelazi na vrijednost najveće negativne vrijednosti $-U_{IZ}$.



Slika 5.22: Naponi generatora pravokutnog napona [Izvor: autorski rad]

Sada se kondenzator C izbija preko otpornika R i izlaza generatora pravokutnoga napona. Brzina izbijanja ovisi o vremenskoj konstanti RC . Kada se napon na kondenzatoru smanji na vrijednost kod koje napon na invertirajućem ulazu postaje manji od napona na neinvertirajućem ulazu (dio negativnog izlaznoga napona koji se na neinvertirajućem ulazu prenosi preko otpornika R_1), napon na izlazu operacijskog pojačala naglo prelazi na vrijednost najveće pozitivne vrijednosti pa se čitav proces ponavlja.

Trajanje pozitivne, odnosno negativne poluperiode izlaznoga napona ovisi o vremenskoj konstanti RC , vrijednostima otpora R_1 i R_2 i vrijednosti izlaznog napona:

$$T_1 = R * C * \ln \frac{U_{IZ}^+ + \beta U_{IZ}^-}{U_{IZ}^+ - \beta U_{IZ}^+}, \quad T_2 = R * C * \ln \frac{U_{IZ}^+ + \beta U_{IZ}^-}{U_{IZ}^- - \beta U_{IZ}^+}$$

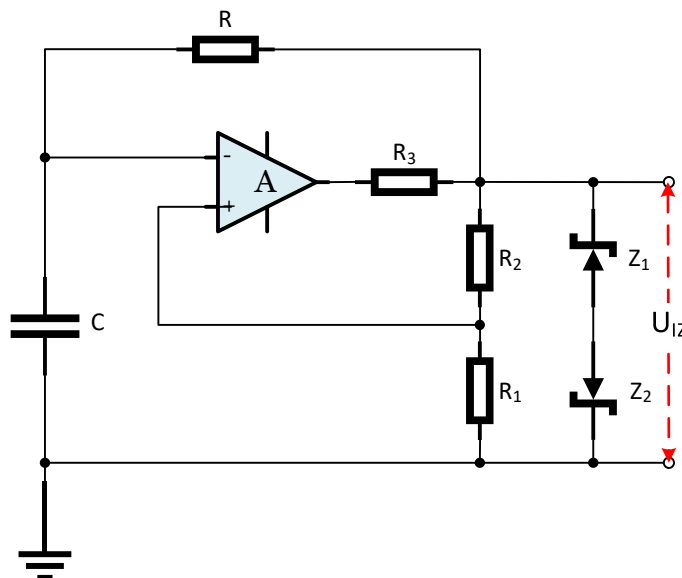
Jednadžba 5.38

gdje je $\beta = R_1 / (R_1 + R_2)$ pa je frekvencija izlaznog napona:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{T_1 + T_2}.$$

Jednadžba 5.39

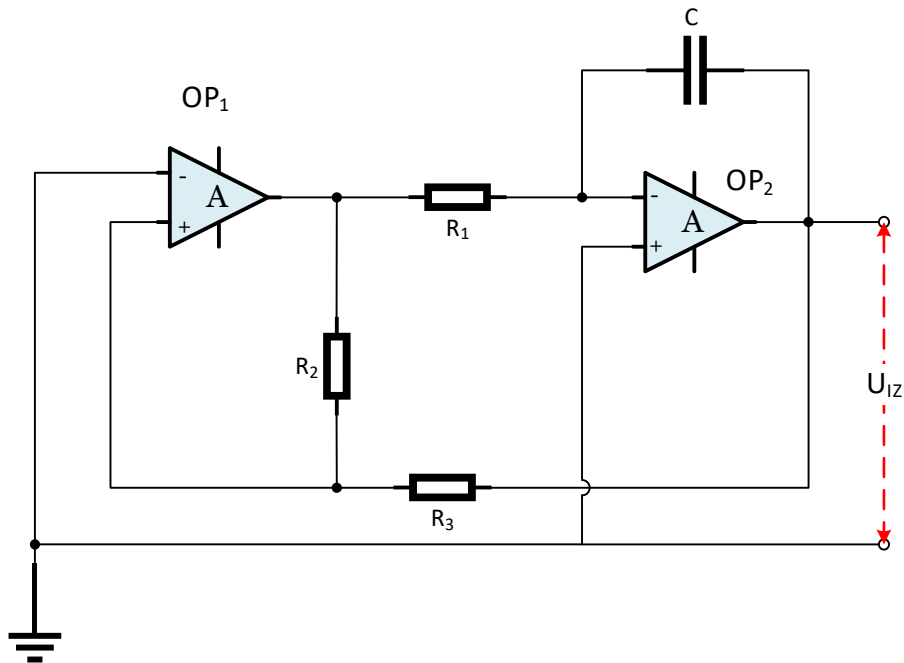
Kako bi se izlazni napon astabilnog multivibratora učinio neovisnim o naponu napajanja i opterećenju, na izlaz se dodaju Zenerove diode. Pozitivna vrijednost izlaznog napona u tom je slučaju $U_{Z1} + U_{F2'}$, a negativna vrijednost izlaznog napona jest $U_{Z2} + U_{F1'}$, gdje su U_Z Zenerovi naponi, a U_F naponi propusno polariziranih dioda, koja iznosi oko 0,6 V.



Slika 5.23: Generator pravokutnog signala sa Zenerovim diodama na izlazu [Izvor: autorski rad]

5.1.5.2. Funkcijski generator

Sklop sa slike 5.24 daje na izlazu trokutasti napon U_{Iz} i pravokutni U_K . Zbog toga se naziva i funkcijski generator (eng. *function generator*). Operacijsko pojačalo OP_1 i otpornici R_2 i R_3 čine komparator, a operacijsko pojačalo OP_2 , otpornik R_1 i kondenzator C čine integrator.



Slika 5.24: Funkcijski generator [Izvor: autorski rad]

Maksimalni negativni napon na izlazu komparatora $-U_{km}$ ulazni je napon integratora. Zbog toga napon na izlazu integratora linearno raste do vrijednosti U_{im} . Izlazni napon integratora dovodi se preko otpornog djelila R_3/R_2 na invertirajući ulaz komparatora. Kad napon na invertirajućem ulazu komparatora dostigne iznos gornje okidne razine U_1 , izlazni napon komparatora naglo mijenja iznos na $+U_{km}$. To uzrokuje da se izlazni napon linearno smanjuje do vrijednosti $-U_{im}$. Stanje traje dok napon na invertirajućem ulazu komparatora ne dostigne iznos donje okidne razine U_2 kad se sklop vraća u početno stanje. Naponi gornje i donje okidne razine iznose:

$$U_1 = +U_{km} * \frac{R_3}{R_2} \quad , \quad U_2 = -U_{km} * \frac{R_3}{R_2}$$

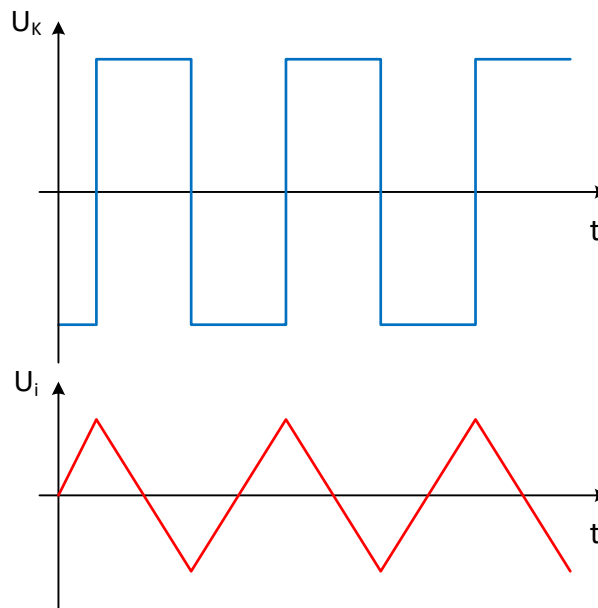
Jednadžba 5.40

što znači da vrijednosti otpora R_2 i R_3 utječu na amplitudu izlaznog napona. Frekvencija trokutastog i pravokutnog napona ovisi o vrijednostima otpora R_2 i R_3 te vremenskoj konstanti $R_1 C$:

$$f = \frac{1}{4 * R_1 * C} * \frac{R_2}{R_3}$$

Jednadžba 5.41

To znači da se promjenom iznosa vremenske konstante $R1$ i C može mijenjati frekvencija bilo kojeg napona, a da se ne mijenja amplituda.



Slika 5.25: Naponi funkcijskog generatora [Izvor: autorski rad]

5.1.6. Integrirane izvedbe stabilizatora

Postoji velik broj različitih tipova koji se mogu svrstati u četiri skupine (Paunović, 2000):

- Stabilizatori za opću primjenu (eng. *general purpose precision multi-terminal regulators*) – služe za izgradnju velikog broja stabiliziranih napona napajanja. Ulazni se napon može kretati u širokom rasponu i dodavanjem vanjskih elemenata izlazni se napon isto tako može dobiti u širokom rasponu. Kao primjer može se navesti integrirani sklop poznat pod oznakom 723.
- Stabilizatori stalnog izlaznog napona s trima izvodima (eng. *fixed voltage three-terminal*) – na izlazu daju stalan napon. Proizvode se serije s različitim iznosima koje se najčešće upotrebljavaju.
- Stabilizator podesivog izlaznog napona s trima i četirima izvodima (eng. *adjustable voltage three and four terminal*) – iznos izlaznoga napona određuje se vrijednostima otpora dijelila koje se dodaje izvana.

Kod serijskih stabilizatora napona tranzistor, kao serijski element, djeluje kao promjenjivi otpor koji može preuzimati promjene napona. Do znatnog utroška snage dolazi zbog ovisnosti o razlici ulaznog i izlaznog napona i struji opterećenja na serijskom tranzistoru. Kod serijskih stabilizatora stupanj iskoristivosti vrlo je nizak, ispod 20 %.

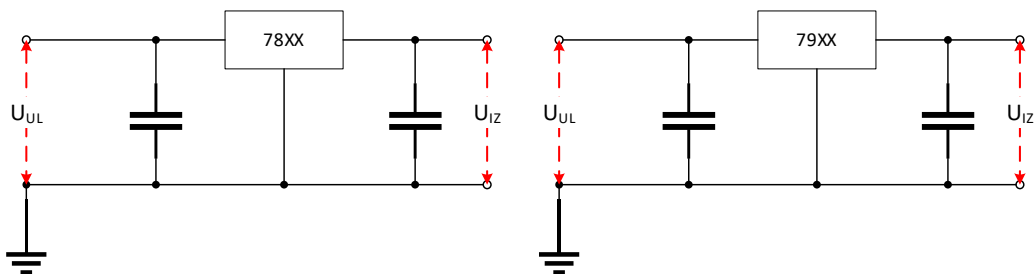
Smanjenje utroška snage na serijskom tranzistoru moguće je postići primjenom impulsnih stabilizatora napona. Tako ćemo povećati stupanj iskoristivosti iznad 75 % i učiniti ga gotovo neovisnim o razlici ulaznog i izlaznog napona.

Integrirane izvedbe stabilizatora imaju neke osnovne karakteristične veličine, a to su:

- naponski faktor stabilizacije – promjena izlaznoga napona uz zadanu promjenu ulaznoga napona, iskazuje se u milivoltima ili postotku promjene izlaznog napona
- opteretni faktor stabilizacije – promjena izlaznoga napona uz zadanu promjenu struje trošila, iskazuje se također u milivoltima ili postotku promjene izlaznoga napona
- temperaturni koeficijent i faktor potiskivanja napona brujanja – definiraju se na isti način kao kod serijskog tranzistorskog stabilizatora.

5.1.6.1. Stabilizatori stalnoga napona s trima izvodima

Predstavnik stabilizatora stalnoga napona s trima izvodima stabilizatori su serije 78XX za pozitivne vrijednosti i 79XX za negativne vrijednosti, kako je prikazano na slici 5.26.



Slika 5.26: Integrirani stabilizatori napona s trima izvodima [Izvor: autorski rad]

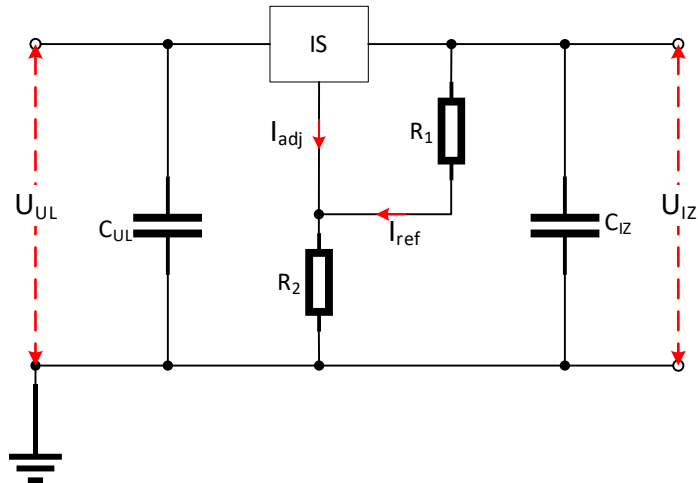
Veličinu izlaznog napona označavaju znamenke XX koje možemo vidjeti u tablici. Izlazi tih stabilizatora mogu se opteretiti strujom od 1A. Kod većih opterećenja djeluje unutrašnja zaštita.

Tablica 5.1: Vrijednosti izlaznih napona [Izvor: AspenCore, <https://www.electronics-tutorials.ws/>]

Oznaka	U_{IZ} (V)	Oznaka	U_{IZ} (V)
7805	5	7905	-5
7806	6	7906	-6
7808	8	7908	-8
7885	8,5	-	-
7812	12	7912	-12
7815	15	7915	-15
7818	18	7915	-15
7824	24	7924	-24

5.1.6.2. Integrirani stabilizatori podesivog napona s trima izvodima

Kod integriranih stabilizatora podesivog napona s trima izvodima izlazni napon ovisi o vrijednostima dodanih otpora, kako je prikazano na slici 5.27.



Slika 5.27: Integrirani stabilizator podesivog napona s trima izvodima [Izvor: autorski rad]

Dopušteni ulazni napon sklopa LM317 jest 35 V. Radi smanjenja utjecaja prijelaznih pojava dodaju se paralelno ulazu i izlazu kondenzatori kapaciteta nekoliko stotina nF.

Pitanja za provjeru znanja

1. Kakva je razlika u djelovanju operacijskoga pojačala s obzirom na ulaze pojačala?
2. Kako vrijednost napona napajanja utječe na amplitudu izlaznog napona operacijskog pojačala?
3. Koje su najznačajnije dopuštene vrijednosti na koje se mora paziti pri radu s operacijskim pojačalom?
4. Što je faktor potiskivanja operacijskog pojačala?
5. Kakav je utjecaj frekvencije ulaznoga napona na rad derivatora?
6. Kakav je utjecaj frekvencije ulaznoga napona na rad integratora?
7. Kakav je utjecaj vrijednosti kapaciteta kondenzatora C na rad integratora?
8. Kako povećanje kapaciteta kondenzatora utječe na frekvenciju generatora pravokutnog napona?

Popis elemenata korištenih u sadržaju

Slika 1.1: Prikaz energetskih pojaseva valentne ljuske [Izvor: autorski rad]	13
Slika 1.2: Poluvodiči n- i p- tipa [Izvor: autorski rad]	14
Slika 1.3: Ravnotežno stanje PN spoja [Izvor: autorski rad]	15
Slika 1.4: Simbol, građa i primjeri izvedbe difuzijske PN diode [Izvor: autorski rad]	16
Slika 1.5: Strujno-naponska karakteristika poluvodičke diode [Izvor: autorski rad]	17
Slika 1.6: Poluvalni ispravljač [Izvor: autorski rad]	18
Slika 1.7: Poluvalni ispravljač s niskopropusnim filtrom [Izvor: autorski rad]	19
Slika 1.8: Izvedbe mosnih ispravljača [Izvor: autorski rad]	20
Slika 1.9: Punovalni ispravljač [Izvor: autorski rad]	21
Slika 1.10: Valni oblici: a) ulazni napon, b) ispravljeni napon bez c, c) ispravljeni napon s c	22
Slika 1.12: Dvostrani paralelni diodni ograničavač [Izvor: autorski rad]	23
Slika 1.13: Serijski diodni ograničavač [Izvor: autorski rad]	24
Slika 1.14: Strujno-naponska karakteristika Zenerove diode [Izvor: autorski rad]	25
Slika 1.15: Simboli i primjeri izvedbe Zenerovih dioda [Izvor: autorski rad]	26
Slika 1.16: Stabilizator napona [Izvor: autorski rad]	27
Slika 1.17: Simboli kapacitivne diode [Izvor: autorski rad]	28
Slika 1.18: Ovisnost struje i kapaciteta o zapornome naponu [Izvor: autorski rad]	29
Slika 1.19: Nadomjesna shema kapacitivne diode za visoke frekvencije [Izvor: autorski rad]	29
Slika 1.20: Rezonantni krug s kapacitivnom diodom [Izvor: autorski rad]	30
Slika 1.21: Strujno-naponske karakteristike, simbol i primjer izvedbi LED-a [Izvor: autorski rad]	31
Slika 1.22: Ograničavanje struje kroz LED [Izvor: autorski rad]	32
Slika 1.23: Simbol i primjer izvedbe fotodiode [Izvor: autorski rad]	33
Slika 1.24: Strujno-naponska karakteristika fotodiode [Izvor: autorski rad]	33
Slika 1.25: Spektralna i kutna osjetljivost fotodiode (Izvor: OSRAM, SFH 2505 FA, 2022)	34
Slika 1.26: Fotodiode kao svjetlosni prijemnik [Izvor: autorski rad]	34
Slika 1.27: Logički I sklop realiziran u diodnoj tehnici [Izvor: autorski rad]	35
Slika 1.28: Logički ILI sklop u diodnoj tehnici [Izvor: autorski rad]	36
Slika 2.1: Građa i simboli bipolarnih tranzistora: a) pnp b) npn [Izvor: autorski rad]	38
Slika 2.2: Različite vrste kućišta i izvedbi bipolarnih tranzistora (Izvor: https://www.electrostudy.com/2012/05/transistors-package-to-transistor.html)	39
Slika 2.3: Struje normalno polariziranoga pnp tranzistora [Izvor: autorski rad]	40
Slika 2.4: Spojevi bipolarnoga tranzistora [Izvor: autorski rad]	40
Slika 2.5: Spoj zajedničkog emitera i statičke karakteristike bipolarnog npn tranzistora [Izvor: autorski rad]	42
Slika 2.6: Ulazna karakteristika bipolarnog npn tranzistora u spoju ZE [Izvor: autorski rad]	42
Slika 2.7: Izlazne karakteristike bipolarnog npn tranzistora u spoju ZE [Izvor: autorski rad]	43
Slika 2.8: Naponska ograničenja bipolarnog npn tranzistora u spojevima ZE i ZB [Izvor: autorski rad]	46
Slika 2.9: Zaštita spoja baza-emiter [Izvor: autorski rad]	46
Slika 2.10: Utjecaj temperature na faktor strujnog pojačanja [Izvor: autorski rad]	47
Slika 2.11: Tranzistorska sklopka [Izvor: autorski rad]	49
Slika 2.12: Simboli JFET-a i presjek n-kanalnog spojnog tranzistora [Izvor: autorski rad]	50
Slika 2.13: Prijenosna i izlazne karakteristike n-kanalnog JFET-a [Izvor: autorski rad]	51
Slika 2.14: Struktura n i p-kanalnog MOSFET-a [Izvor: autorski rad]	53

Slika 2.15: Simboli i karakteristike n-kanalnog MOSFET-a [Izvor: autorski rad]	55
Slika 2.16: Simboli i karakteristike p-kanalnog MOSFET-a [Izvor: autorski rad]	56
Slika 2.17: Struktura VMOS tranzistora [Izvor: autorski rad]	57
Slika 2.18: Simbol i karakteristike n-kanalnog MOSFET-a [Izvor: autorski rad]	57
Slika 2.19: MOSFET sklopka [Izvor: autorski rad]	58
Slika 2.20: MOSFET sklopka s induktivnim opterećenjem [Izvor: autorski rad]	59
Slika 2.21: Logički NE sklop u tranzistorskoj tehnici [Izvor: autorski rad]	59
Slika 2.22: Logički NI sklop u tranzistorskoj tehnici [Izvor: autorski rad]	60
Slika 2.23: Logički NILI sklop u tranzistorskoj tehnici [Izvor: autorski rad]	61
Slika 3.1: Dekadski brojevi sustav [Izvor: autorski rad]	65
Slika 3.2: Pretvorba oktalnog broja u dekadski [Izvor: autorski rad]	66
Slika 3.3: Pretvorba heksadekadskog u dekadski broj [Izvor: autorski rad]	67
Slika 3.4: Pretvorba binarnog u dekadski broj [Izvor: autorski rad]	67
Slika 3.5: Simboli NE sklopa [Izvor: autorski rad]	72
Slika 3.6: Simboli logičkog I sklopa [Izvor: autorski rad]	72
Slika 3.7: Simboli logičkog ILI sklopa [Izvor: autorski rad]	73
Slika 3.8: Simboli NI sklopa [Izvor: autorski rad]	74
Slika 3.9: Simboli NILI sklopa [Izvor: autorski rad]	75
Slika 3.10: Simboli i izvedba logičkog sklopa XOR [Izvor: autorski rad]	76
Slika 3.11: Simboli i izvedba logičkog sklopa XNOR [Izvor: autorski rad]	77
Slika 4.1: Krug za postavljanje statičkih uvjeta rada a) bipolarnih tranzistora , b) unipolarnih tranzistora [Izvor: autorski rad]	83
Slika 4.2: Theveninovi ekvivalenti [Izvor: autorski rad]	83
Slika 4.3: Pojačalo sa zajedničkim emiterom [Izvor: autorski rad]	85
Slika 4.4: a) Bipolarni tranzistor, b) njegov model s h-parametrima [Izvor: autorski rad]	86
Slika 4.5: Tranzistorska ZE pojačala s h-parametarskim modelom tranzistora [Izvor: autorski rad]	87
Slika 4.6: Frekvencijski odziv pojačala [Izvor: autorski rad]	88
Slika 4.7: Indirektno mjerenje ulaznog napona [Izvor: autorski rad]	89
Slika 4.8: Indirektno mjerenje izlaznog otpora [Izvor: autorski rad]	90
Slika 4.9: Osnovne značajke naponskog pojačala [Izvor: autorski rad]	92
Slika 4.10: Pojačalo sa zajedničkim emiterom [Izvor: autorski rad]	92
Slika 4.11: Pojačalo sa zajedničkim kolektorom [Izvor: autorski rad]	94
Slika 4.12: Pojačalo sa zajedničkom bazom [Izvor: autorski rad]	95
Slika 4.13: Pojačalo s JFET-om u spoju zajedničkog uvoda [Izvor: autorski rad]	96
Slika 4.14: Pojačalo s JFET-om u spoju zajedničkog odvoda [Izvor: autorski rad]	97
Slika 4.15: Pojačalo s JFET-om u spoju zajedničke upravljačke elektrode [Izvor: autorski rad]	98
Slika 4.16: Darlingtonov spoj tranzistora [Izvor: autorski rad]	100
Slika 4.17: Emittersko slijedilo u Darlingtonovom spoju [Izvor: autorski rad]	101
Slika 4.18: Valni oblici struje kolektora za različite klase rada pojačala [Izvor: autorski rad]	102
Slika 4.19: Primjer protutaktnog pojačala klase B sa i bez veznih kondenzatora [Izvor: autorski rad]	104
Slika 4.20: Povratna veza [Izvor: autorski rad]	105
Slika 4.21: Elementi povratne veze RC oscilatora [Izvor: autorski rad]	106
Slika 4.22: RC oscilator s RC mrežom u grani povratne mreže [Izvor: autorski rad]	107
Slika 4.23: RC oscilator s CR mrežom u grani povratne veze [Izvor: autorski rad]	108
Slika 4.24: Colpittsov oscilator [Izvor: autorski rad]	109

Slika 4.25: Colpittsov oscilator s FET-om [Izvor: autorski rad]	111
Slika 4.26: Hartleyev oscilator [Izvor: autorski rad]	112
Slika 4.27: Serijski tranzistorski stabilizator [Izvor: autorski rad]	115
Slika 4.28: Serijski stabilizator s Darlingtonovim spojem tranzistora [Izvor: autorski rad]	116
Slika 4.29: Serijski tranzistorski stabilizator s pojačalom u povratnoj vezi [Izvor: autorski rad]	116
Slika 4.30: Zaštita stabilizatora od preopterećenja [Izvor: autorski rad]	117
Slika 5.1: Tipična kućišta i razmještaj stezaljki operacijskog pojačala [Izvor: autorski rad]	120
Slika 5.2: Operacijsko pojačalo: a) simbol, b) model [Izvor: autorski rad]	121
Slika 5.3: Model idealnog operacijskog pojačala [Izvor: autorski rad]	122
Slika 5.4: Tipična realizacija sklopa s operacijskim pojačalima [Izvor: autorski rad]	123
Slika 5.5: Prijenosna karakteristika operacijskog pojačala [Izvor: autorski rad]	125
Slika 5.6: Blok dijagram realnog operacijskog pojačala [Izvor: autorski rad]	126
Slika 5.7: Operacijsko pojačalo 741 [Izvor: Kovačević.2010]	126
Slika 5.8: Invertirajuće pojačalo [Izvor: autorski rad]	129
Slika 5.9: Neinvertirajuće pojačalo [Izvor: autorski rad]	130
Slika 5.10: Naponsko slijedilo [Izvor: autorski rad]	131
Slika 5.11: Sumirajuće pojačalo [Izvor: autorski rad]	132
Slika 5.12: Diferencijalno pojačalo [Izvor: autorski rad]	133
Slika 5.13: Osnovni krug derivatora koristeći operacijsko pojačalo [Izvor: autorski rad]	135
Slika 5.14: Osnovne derivatorske reakcije [Izvor: autorski rad]	136
Slika 5.15: Derivator s operacijskim pojačalom [Izvor: autorski rad]	137
Slika 5.16: Integratorsko operacijsko pojačalo [Izvor: autorski rad]	138
Slika 5.17: Rezultat visokog pojačanja [Izvor: autorski rad]	139
Slika 5.18: Promjena RC vremenske konstante [Izvor: autorski rad]	139
Slika 5.19: Generator rampe [Izvor: autorski rad]	140
Slika 5.20: Osnovni krug komparatora [Izvor: autorski rad]	142
Slika 5.21: Generator pravokutnog napona [Izvor: autorski rad]	143
Slika 5.22: Naponi generatora pravokutnog napona [Izvor: autorski rad]	144
Slika 5.23: Generator pravokutnog signala sa Zenerovim diodama na izlazu [Izvor: autorski rad]	145
Slika 5.24: Funkcijski generator [Izvor: autorski rad]	146
Slika 5.25: Naponi funkcijskog generatora [Izvor: autorski rad]	147
Slika 5.26: Integrirani stabilizatori napona s trima izvodima [Izvor: autorski rad]	148
Slika 5.27: Integrirani stabilizator podesivog napona s trima izvodima [Izvor: autorski rad]	149
Tablica 1.1: Podjela čvrstih tijela prema specifičnom otporu	12
Tablica 1.2: Karakteristične veličine poluvalnoga ispravljača	20
Tablica 1.3: Karakteristične veličine punovalnoga ispravljača	22
Tablica 1.4: Ovisnost izlaznog napona i struje kroz Zenerovu diodu o promjeni ulaznog napona	27
Tablica 1.5: Naponska stanja I sklopa	35
Tablica 1.6: Naponska stanja II sklopa	36
Tablica 2.2: Naponska stanja NE sklopa	60
Tablica 2.3: Naponska stanja NI sklopa	60
Tablica 2.4: Naponska stanja NILI sklopa	61

Tablica 3. 1: Heksadekadski brojevni sustav	66
Tablica 3. 2: Osnovni ASCII kod	70
Tablica 3. 3: Dio Unicode tablice	70
Tablica 3. 4: Logička stanja NE sklopa	71
Tablica 3. 5: Logička stanja I sklopa	72
Tablica 3. 6: Logička stanja ILI sklopa	73
Tablica 3. 7: Logička stanja NI sklopa	74
Tablica 3. 8: Logička stanja NILI sklopa	74
Tablica 3. 9: Logička stanja XOR sklopa	75
Tablica 3. 10: Logička stanja XNOR sklopa	76
Tablica 3. 11: Pravila za pojednostavljivanje logičkih izraza	77
Tablica 5.1: Vrijednosti izlaznih napona [Izvor: AspenCore, https://www.electronics-tutorials.ws/]	148

Jednadžba 1.1: Shockleyeva jednadžba - struja kroz PN diodu	16
Jednadžba 1.2: Napon na trošilu poluvalnog ispravljača	19
Jednadžba 1.3: Istosmjerna vrijednost ispravljenog napona poluvalnog ispravljača	19
Jednadžba 1.4: Efektivna vrijednost ispravljenog napona	19
Jednadžba 1.5: Iznos napona brujanja	20
Jednadžba 1.6: Istosmjerna vrijednost ispravljenog napona punovalnog ispravljača	21
Jednadžba 1.7: Izlazni napon jednostranog paralelnog diodnog ograničavača	23
Jednadžba 1.8: Izlazni napon dvostranog paralelnog diodnog ograničavača kada vodi D1	23
Jednadžba 1.9: Izlazni napon dvostranog paralelnog diodnog ograničavača kada vodi D2	24
Jednadžba 1.10: Temperaturni koeficijent Zenerove diode	26
Jednadžba 1.11: Dinamički otpor Zenerove diode	26
Jednadžba 1.13: Zaporna kapacitivnost	28
Jednadžba 1.14: Kapacitet titrajnog kruga	30
Jednadžba 1.15: Računanje vrijednosti otpornika za ograničavanje struje kroz LED	32
Jednadžba 2.1: Odnos struja bipolarnog tranzistora	40
Jednadžba 2.2: Struja zasićenja baze	48
Jednadžba 2.3: Struja zasićenja kolektora	48
Jednadžba 2.4: Uvjet zasićenja	48
Jednadžba 2.5: Ovisnost izlazne struje I_D o ulaznom naponu U_{GS}	52
Jednadžba 2.6: Strmina JFET-a	52
Jednadžba 2.7: Struja odvoda za $U_{GS} = 0$	53
Jednadžba 3.1: Logička operacija negacije	71
Jednadžba 3.2: Logička operacija konjunkcije	72
Jednadžba 3. 3: Logička operacija disjunkcije	73
Jednadžba 3. 4: Logička operacija NI	73
Jednadžba 3. 5: Logička operacija NILI	74
Jednadžba 3. 6: Logička operacija XOR	75
Jednadžba 3. 7: Logički izraz XNOR sklopa	76
Jednadžba 4.1	84
Jednadžba 4.2	84

Jednadžba 4.3	84
Jednadžba 4.4	84
Jednadžba 4.5	84
Jednadžba 4.6	84
Jednadžba 4.7	86
Jednadžba 4.8	86
Jednadžba 4.9	87
Jednadžba 4.10	87
Jednadžba 4.11	87
Jednadžba 4.12	87
Jednadžba 4.13	88
Jednadžba 4.14	89
Jednadžba 4.15	89
Jednadžba 4.16	89
Jednadžba 4.17	90
Jednadžba 4.18	90
Jednadžba 4.19	91
Jednadžba 4.20	91
Jednadžba 4.21	91
Jednadžba 4.22	97
Jednadžba 4.23	100
Jednadžba 4.24	100
Jednadžba 4.25	100
Jednadžba 4.26	100
Jednadžba 4.27	106
Jednadžba 4.28	107
Jednadžba 4.29	108
Jednadžba 4.30	110
Jednadžba 4.31	110
Jednadžba 4.32	110
Jednadžba 4.33	110
Jednadžba 4.34	112
Jednadžba 4.35	113
Jednadžba 4.36	113
Jednadžba 4.37	113
Jednadžba 4.38	114
Jednadžba 4.39	114
Jednadžba 4.40	114
Jednadžba 4.41	114
Jednadžba 4.42	115
Jednadžba 4.43	117
Jednadžba 4.44	117
Jednadžba 4.45	118
Jednadžba 5.1	122
Jednadžba 5.2	122

Jednadžba 5.3	123
Jednadžba 5.4	123
Jednadžba 5.5	124
Jednadžba 5.6	124
Jednadžba 5.7	124
Jednadžba 5.8	127
Jednadžba 5.9	128
Jednadžba 5.10	128
Jednadžba 5.11	129
Jednadžba 5.12	129
Jednadžba 5.13	130
Jednadžba 5.14	130
Jednadžba 5.15	130
Jednadžba 5.16	132
Jednadžba 5.17	132
Jednadžba 5.18	133
Jednadžba 5.19	133
Jednadžba 5.20	134
Jednadžba 5.21	134
Jednadžba 5.22	134
Jednadžba 5.23	134
Jednadžba 5.24	134
Jednadžba 5.25	134
Jednadžba 5.26	135
Jednadžba 5.27	135
Jednadžba 5.28	136
Jednadžba 5.29	137
Jednadžba 5.30	140
Jednadžba 5.31	140
Jednadžba 5.32	140
Jednadžba 5.33	140
Jednadžba 5.34	141
Jednadžba 5.35	141
Jednadžba 5.36	141
Jednadžba 5.37	141
Jednadžba 5.38	144
Jednadžba 5.39	145
Jednadžba 5.40	146
Jednadžba 5.41	146

Popis literature

- 1 AspenCore (2023). Diodes. <https://www.electronics-tutorials.ws/>
- 2 Faichild, 1N4007. (2023). <https://datasheetspdf.com/pdf-file/578654/FairchildSemiconductor/1N4007/1>.
- 3 Kovačević, T. (2010). Elektronički elementi – Repetitorij s laboratorijskim vježbama. Sveučilišni centar za stručne studije, Sveučilište u Splitu.
- 4 OSRAM, SFH 2505 FA. (2022). https://www.osram.com/media/resource/hires/osram-dam-5467165/SFH+2505+FA_EN.pdf
- 5 Paunović, S. (2000). Elektronički sklopovi. Zagreb : Element, ISBN 953-197-125-0.



Projekt je sufinancirala Europska unija iz Europskog socijalnog fonda.

Za više informacija o EU fondovima molimo pogledajte web-stranicu Ministarstva regionalnoga razvoja i fondova Europske unije. www.strukturnifondovi.hr