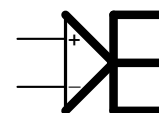


**FAKULTET TEHNIČKIH NAUKA
DEPARTMAN ZA ENERGETIKU, ELEKTRONIKU I TELEKOMUNIKACIJE
KATEDRA ZA ELEKTRONIKU
NOVI SAD
TRG DOSITEJA OBRADOVIĆA 6
<http://www.elektronika.uns.ac.rs>**

email: kel@uns.ac.rs



(021) 485 2558

ELEKTRONIKA

- Osnovne strukovne studije: Elektronika i telekomunikacije -

Novi Sad
2015.

Fakultet tehničkih nauka
Katedra za elektroniku
mr Milan Nikolić

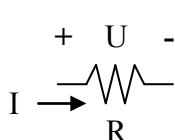
Sadržaj:

1.	Uvod	2
1.1.	Omov zakon	2
1.2.	Prvi Kirhofov zakon (strujni)	2
1.3.	Drugi Kirhofov zakon (naponski)	2
1.4.	Redna i paralelna veza otpornika	3
1.5.	Naponski razdelnik	3
1.6.	Strujni razdelnik	4
1.7.	Teorema superpozicije	4
1.8.	Naponski i strujni izvori	4
1.9.	Tevenenov naponski izvor	5
1.10.	Otpornici	5
1.11.	Kondenzatori	7
1.12.	Kalemovi	8
2.	Poluprovodničke diode	10
2.1.	Vrste dioda	11
2.2.	Strujno-naponska karakteristika diode	11
2.3.	Ispravljač	12
2.4.	Stabilizator napona sa Zener diodom	14
2.5.	Primena varikap dioda	14
2.6.	Primena LED i foto dioda	15
3.	Tranzistori	15
3.1.	Bipolarni tranzistori	15
3.2.	Radna prava i radna tačka	17
3.3.	Osnovni načini spajanja bipolarnih tranzistora	18
3.4.	Primeri spojeva sa bipolarnim tranzistorima	21
3.5.	Tranzistor kao prekidač	25
3.6.	Tranzistori sa efektom polja	26
4.	Tiristori i triaci	29
5.	Operacioni pojačavači	30
5.1.	Osnovna primena operacionih pojačavača	31
5.2.	Idealni ispravljač	32
5.3.	Diferencijalni pojačavač	32
5.4.	Pojačavači za naizmenične signale	33
5.5.	Integrator i diferencijator	34
5.6.	Komparatori	37

1. Uvod

1.1. Omov zakon

Omov (Ohm) zakon opisuje međusobnu zavisnost električnog napona, struje i otpora:



$$U = I \cdot R$$

Izraz za napon

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

Izraz za struju

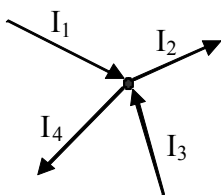
$$R = \frac{U}{I}$$

Izraz za otpor

pri čemu je napon U izražen u voltima (V), struja I u amperima (A), a otpor R u Omima (Ω).

1.2. Prvi Kirhofov zakon (strujni)

Prema strujnom Kirhofovom zakonu, zbir svih struja u jednom čvoru jednak je nuli:



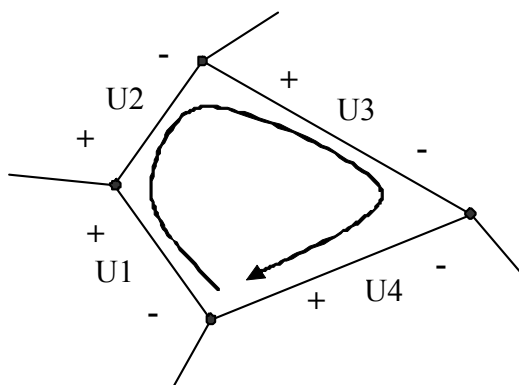
$$\sum_{i=1}^n I_i = 0$$

sve struje koje ulaze u čvor imaju pozitivan, a koje izlaze iz čvora negativan predznak.

U ovom slučaju:
 $I_1 - I_2 + I_3 - I_4 = 0$

1.3. Drugi Kirhofov zakon (naponski)

Naponski Kirhofov zakon govori o naponima konture:



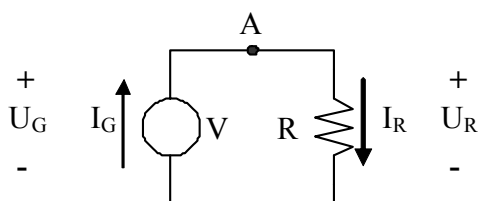
$$\sum_{i=1}^n U_i = 0$$

Zbir svih napona konture jednak je nuli.

naponi čija je orijentacija u smeru obilaska konture imaju pozitivan predznak, dok naponi sa suprotnom orijentacijom imaju negativan predznak.

U ovom slučaju:
 $U_1 - U_2 - U_3 + U_4 = 0$

Primena ovih zakona prikazana je u jednostavnom primeru sa jednim naponskim izvorom i otpornikom:



Strujni Kirhofov zakon za čvor A:

$$+I_G - I_R = 0 \Rightarrow I_R = I_G$$

Naponski Kirhofov zakon:

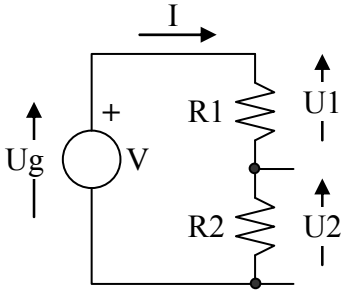
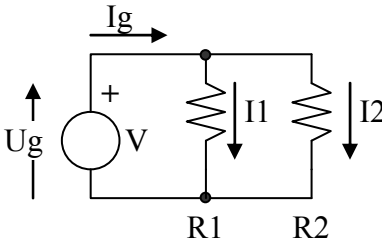
$$+U_G - U_R = 0 \Rightarrow U_R = U_G$$

Omov zakon:

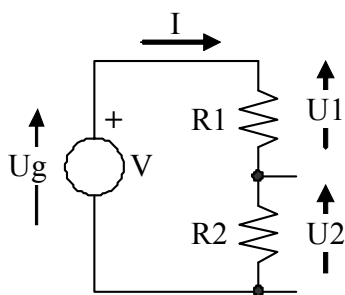
$$I_R = U_R / R \Rightarrow I_R = U_G / R$$

1.4. Redna i paralelna veza otpornika

Dva redno ili paralelno vezana otpornika mogu se zameniti jednim otpornikom koji ima odgovarajuću otpornost:

Redna veza otpornika	Paralelna veza otpornika
 <p>Prema drugom Kirhofovom zakonu: $U_g = U_1 + U_2$</p> <p>Prema Omovom zakonu: $U_1 = R_1 * I$ $U_2 = R_2 * I$</p> <p>Na osnovu toga: $U_g = (R_1 + R_2) * I = R_e * I$</p> <p>Iz ovoga sledi:</p> <div style="border: 2px solid black; padding: 5px; display: inline-block;"> $R_e = R_1 + R_2$ </div> <p>Što znači da se u rednoj vezi otpornika otpornosti sabiraju.</p>	 <p>Prema prvom Kirhofovom zakonu: $I_g = I_1 + I_2$</p> <p>Prema Omovom zakonu: $I_1 = \frac{U_g}{R_1}$ $I_2 = \frac{U_g}{R_2}$</p> <p>Na osnovu toga:</p> $I_g = U_g * \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = U_g * \frac{R_1 + R_2}{R_1 * R_2} = U_g * \frac{1}{\frac{R_1 * R_2}{R_1 + R_2}} = \frac{U_g}{R_e}$ <p>Iz ovoga sledi:</p> <div style="display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 0 10px;"> $\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ </div> <div style="margin: 0 10px;">tj.</div> <div style="border: 2px solid black; padding: 5px; margin: 0 10px;"> $R_e = \frac{R_1 * R_2}{R_1 + R_2}$ </div> </div> <p>Recipročna vrednost otpornosti se naziva provodnost:</p> $G = \frac{1}{R}$ <p>koja se izražava u Simensima (S)</p> <p>Iz svega navedenog, vidi se da se u paralelnoj vezi otpornika njihove provodnosti sabiraju.</p> <p>Paralelna veza otpornika često se piše sa dve vertikalne linije:</p> $R_e = R_1 \parallel R_2$

1.5. Naponski razdelnik



Naponski razdelnik je sastavljen od dva otpornika vezana redno. Na osnovu prethodnih zakona važi sledeće:

$$U_g = U_1 + U_2$$

$$U_1 = I * R_1$$

$$U_2 = I * R_2$$

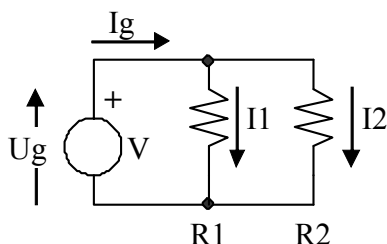
$$U_g = I * (R_1 + R_2)$$

$$I = \frac{U_g}{R_1 + R_2} = \frac{U_g}{R_e} \Rightarrow R_e = R_1 + R_2$$

Konačno, za napon na otporniku R2 dobija se:

$$U_2 = U_g * \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

1.6. Strujni razdelnik



Strujni razdelnik je sastavljen od dva otpornika vezana paralelno. Na osnovu prethodnih zakona važi sledeće:

$$I_g = I_1 + I_2$$

$$I_1 = U_g / R_1$$

$$I_2 = U_g / R_2$$

Prema paralelnoj vezi otpornika:

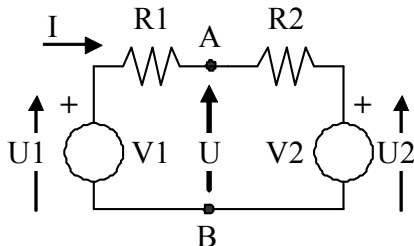
$$U_g = I_g * (R_1 \parallel R_2) = I_g * \frac{R_1 * R_2}{R_1 + R_2}$$

odnosno

$$I_1 = I_g * \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad I_2 = I_g * \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

1.7. Teorema superpozicije

Na slici je prikazana veza dva naponska izvora i dva otpornika. Potrebno je izračunati napon između tačaka A i B. Prema naponskom Kirhofovom zakonu važi:



$$U_1 - R_1 * I - R_2 * I - U_2 = 0 \Rightarrow I = (U_1 - U_2) / (R_1 + R_2)$$

$$U_{AB} - R_2 * I - U_2 = 0 \Rightarrow U_{AB} = U_2 + R_2 * I$$

$$U_{AB} = U_2 + (U_1 - U_2) * \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{U_1 * R_2 + U_2 * R_1}{R_1 + R_2}$$

Ako se ovaj izraz podeli na dva dela, dobija se:

$$U_{AB} = U_1 * \frac{R_2}{R_1 + R_2} + U_2 * \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

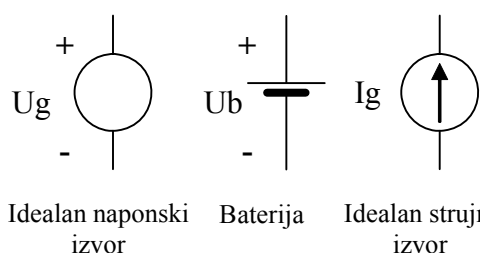
Upoređivanjem ovog izraza sa izrazom za naponski razdelnik, vidi se da je konačni rezultat zbir parcijalno izračunatih razdelnika napona na otporniku R2 i R1. Pri svakom od ovih izračunavanja uzet je u obzir samo jedan naponski izvor, dok je drugi zamenjen kratkim spojem. Ovo je osnova teoreme superpozicije:

Ako električno kolo ima dva ili više generatora (naponskih i/ili strujnih izvora), struju neke grane (ili napon između dva čvora) moguće je odrediti sabirajući struje (odnosno napone) koje u datoj grani stvaraju generatori kada deluju pojedinačno.

Prilikom svakog pojedinačnog izračunavanja, jedan generator se ostavi u kolu, a ostali se isključe iz kola tako što se naponski izvori zamenjuju kratkim spojem, a strujni izvori otvorenom vezom. Postupak se ponovi za sve generatore, a dobijene vrednosti struje u grani (ili napona između čvorova) se sabere.

Na osnovu ovoga, jasno je da je prethodni izraz mogao biti direktno izračunat na osnovu izraza za razdelnik napona u tačkama A-B, parcijalnim računanjem za naponske izvore U1 i U2.

1.8. Naponski i strujni izvori



Idealan naponski izvor

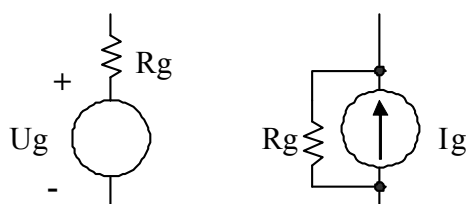
Baterija

Idealan strujni izvor

U električnom kolu osnovni elementi koji generišu električnu energiju su naponski i strujni izvor:

Za razliku od pasivnih komponenti, kao što je otpornik, struja unutar izvora uvek teče u smeru od minusa ka plusu. Van izvora, struja teče od plusa ka minusu.

Idealan naponski izvor ima nultu otpornost i može dati neograničenu struju, dok strujni izvor ima beskonačnu otpornost, a napon na njegovim krajevima nije ograničen.



Realan naponski izvor

Realan strujni izvor

Realni izvori imaju konačnu otpornost i ograničene strujne, odnosno naponske mogućnosti.

Realan naponski izvor može se zameniti realnim strujnim izvorom i obrnuto. Pri tome važi da je

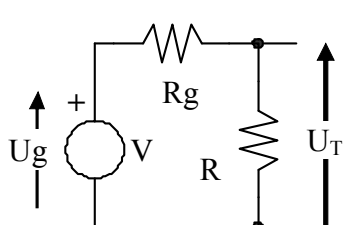
$$U_g = R_g \cdot I_g$$

dok otpornosti izvora ostaju iste.

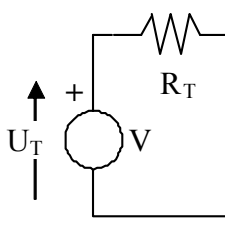
Izvor jednosmernog napona se često crta kao simbol baterije, dok kružni simbol naponskog i strujnog izvora mogu da se odnose na jednosmerni i naizmenični napon, odnosno struju.

1.9. Tevenenov naponski izvor

Naponski izvor sa otporničkim naponskim razdelnikom može se zameniti realnim naponskim izvorom, koji se naziva Tevenenov generator, tj. izvor:



Naponski izvor sa naponskim razdelnikom



Ekvivalentni Tevenenov izvor

Napon Tevenenovog izvora je

$$U_T = U_g \cdot \frac{R}{R_g + R}$$

Otpornost Tevenenovog izvora je

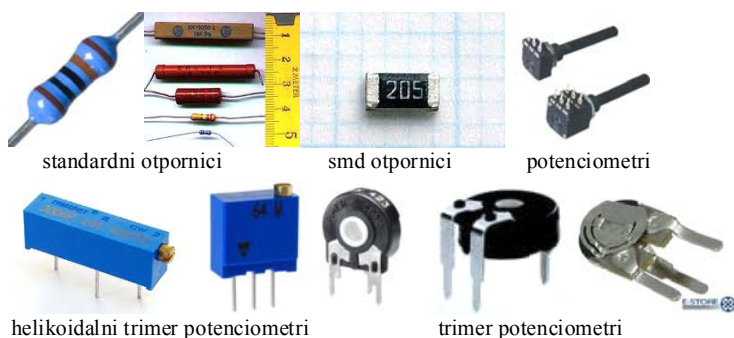
$$R_T = \frac{R_g \cdot R}{R_g + R}$$

1.10. Otpornici

Osnovna karakteristika otpornika je njegova otpornost, dok je druga važna karakteristika maksimalna snaga koju otpornik može izdržati bez oštećenja. Snaga je proizvod napona i struje:

Snaga u zavisnosti od struje i napona	Snaga u zavisnosti od struje i otpora	Snaga u zavisnosti od napona i otpora
$P = U \cdot I$	$P = I^2 \cdot R$	$P = \frac{U^2}{R}$

Otpornici se prave u različitim oblicima, od kojih je najčešći valjasti:



standardni otpornici

smd otpornici

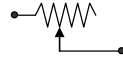
potenciometri

helikoidalni trimer potenciometri

trimer potenciometri

Osim standardnih otpornika, prave se i otpornici sa promenljivom otpornošću:

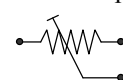
1. Reostati (sa dva kraja):



2. Potenciometri:



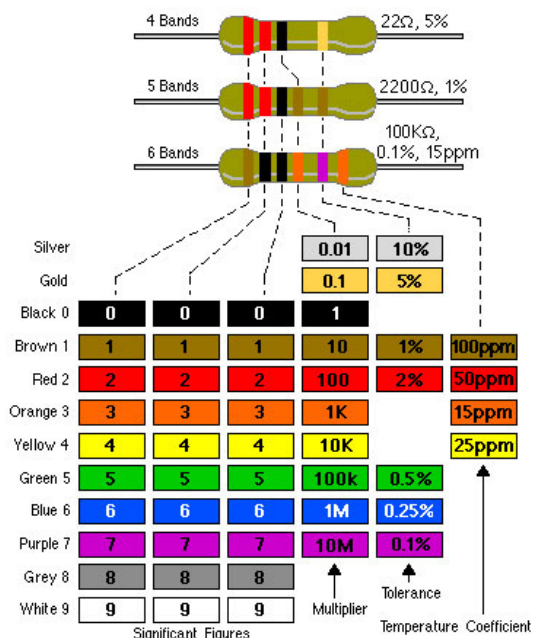
3. Trimer potenciometri:



Potenciometri i trimer-potenciometri (tj. trimeri) se mogu tretirati kao razdelnik napona sa promenljivim faktorom razdele. Za razliku od potencimetara, koji su predviđeni za često podešavanje, trimer

potenciometri nemaju osovinu i predviđeni su uglavnom za povremeno (servisno) podešavanje. Posebna vrsta trimera potenciometara su helipot trimeri, koji omogućavaju mnogo preciznije podešavanje.

Otpornici se označavaju bojama ili numerički. Označavanje bojama se koristi na valjkastim otpornicima, i sastoji se od najčešće 4, do najviše 6 obojenih prstenova:



Prva tri prstena (ili četiri), koji su na jednakom rastojanju, označavaju vrednost, pri čemu poslednji od njih označava broj nula (multiplikator 10^X), a prva dva (odnosno tri) numeričku vrednost. Na primer, za označavanje sa tri boje (na slici označeno sa 4 Bands), prve dve boje (crvene) odgovaraju cifri 2, a treća boja (crna) odgovara cifri 0 (broj dodatih nula). To znači da je vrednost otpornika 22 Oma. Označavanje vrednosti sa četiri prstena se koristi kod otpornika veće tačnosti, kada je vrednost data sa tri cifre i brojem nula.

Posle prstenova za vrednost, malo udaljen, nalazi se prsten za toleranciju otpornika (maksimalno odstupanje od nominalne vrednosti, +/-). Ako iza ovog prstena postoji još jedan prsten, tada on označava temperaturni koeficijent otpornika, odnosno koliko se otpornost menja u zavisnosti od temperature (izraženo u milionitim delovima po stepenu Celzijusa).

Na otpornicima na kojima zbog drugačijeg oblika označavanje bojama nije pogodno, ili zbog nekih drugih razloga, otpornost se može označiti numerički, uz sufiks koji označava dodatni faktor množenja:

R ili E – Oma (faktor množenja = 1)

K – kiloOma (faktor množenja = 1000)

M – megaOma (faktor množenja = 1000000)

Radi što kraćeg pisanja, sufiks može biti napisan umesto decimalne tačke. Primeri nekih vrednosti:

120R = 120 Oma 120E = 120 Oma 1.2K = 1200 Oma 1K2 = 1200 Oma

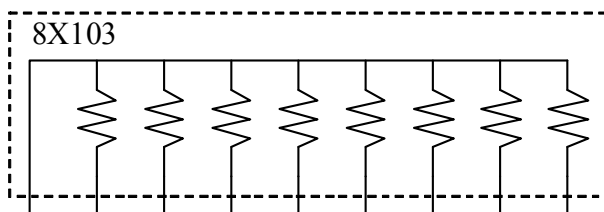
1M2 = 1 200 000 Oma 1.2M = 1 200 000 Oma

Kod otpornika čija se vrednost izražava sa dve cifre, navedeni sufiks se može zameniti numeričkim brojem dodatnih nula:

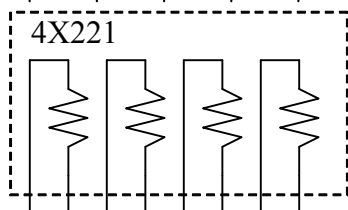
104 = 10 + 4 nule = 100 000 Oma

221 = 220 Oma

Ovaj način se koristi kod SMD otpornika (SMD –Surface Mounting Device, tj. komponente za površinsku montažu), kao i kod otporničkih mreža:

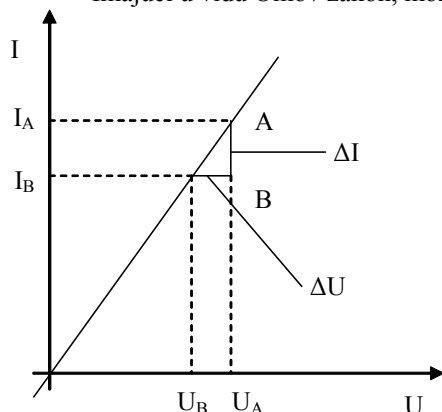


Na slici je prikazana mreža sa osam otpornika, od kojih svaki ima vrednost od 10 KOma. Oznaka ovakve mreže je 8X103 ili ponekad bez prefiksa za broj otpornika: 103



Osim otporničkih mreža sa jednim zajedničkim priključkom, postoje i mreže sa pojedinačnim otpornicima. Na primer, jedna takva mreža sa četiri otpornika vrednosti 220 Oma ima oznaku 4X221 ili bez prefiksa za broj otpornika 221

Imajući u vidu Ohmov zakon, može se nacrtati strujno-naponska karakteristika otpornika:



$R = \frac{U_A}{I_A}$ Odnos apsolutnih vrednosti napona i struje na otporniku predstavlja otpornost za jednosmernu struju, odnosno statičku otpornost.

$R_d = \frac{\Delta U}{\Delta I}$ Za rad sa naizmeničnim strujama koristi se dinamička otpornost, koja predstavlja odnos promene napona i promene struje.

Zahvaljujući linearnoj karakteristici, odnos apsolutnih vrednosti napona i struje u nekoj tački karakteristike (na pr. A) jednak je i odnosu promena napona i struje između dve tačke (na pr. A i B), što znači da su statička (jednosmerna) i dinamička otpornost iste:

$$R = R_d$$

Uobičajeno je da se jednosmerne veličine pišu velikim, a

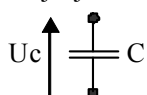
naizmenične malim slovima, na primer:

jednosmerni napon i struja: $R = \frac{U}{I}$

naizmenični napon i struja: $R = \frac{u}{i}$

1.11. Kondenzatori

Kondenzator je električna komponenta sastavljena od dve provodne ploče postavljene na vrlo malom rastojanju i razdvojene izolatorom:



Kada se na kondenzator priključi napon, na pločama kondenzatora se nagomila naelektrisanje, pozitivno na jednoj i negativno na drugoj ploči. Kada se promene uslovi u kolu sa kondenzatorom, nagomilano naelektrisanje se može vratiti nazad u kolo. Za razliku od otpornika, u kome se uložena energija gubi u obliku toplote, energija sadržana u kondenzatoru se ne gubi. Naelektrisanje na kondenzatoru dato je izrazom

$$Q = U \cdot C$$

gde je C kapacitet kondenzatora izražen u Faradima (F), a Q naelektrisanje izraženo u Kulonima (C). Veza između struje i napona kondenzatora data je izrazom

$$I_c = C \cdot \frac{dU_c}{dt} \quad \text{odnosno} \quad U_c = \frac{1}{C} \int I_c \cdot dt$$

što znači da je struja diferencijal napona, a napon integral struje.

U realnim kolima, zbog strujnih ograničenja, napon na kondenzatoru ne može se trenutno promeniti.

U kolu naizmenične struje, kondenzator predstavlja impedansu koja se računa kao

$$Z_c = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C}$$

gde je

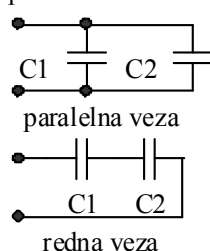
$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

$\omega \Rightarrow$ Kružna frekvencija

$f \Rightarrow$ Frekvencija

$j \Rightarrow$ Imaginarna konstanta ($\sqrt{-1}$)

Impedansa je opštiji pojam od otpornosti, jer sadrži realni i imaginarni deo, gde je realni deo otpornost, a imaginarni odgovara kapacitivnosti kondenzatora. Ako je kondenzator idealni, realni deo impedanse ne postoji. Ako se na impedansu kondenzatora primene izrazi za rednu i paralelnu vezu otpornosti, može se pokazati da se ekvivalentni kapacitet paralelno vezanih kondenzatora dobija kao



$$C_e = C_1 + C_2$$

dok se ekvivalentni kapacitet redno vezanih kondenzatora računa kao i paralelna veza otpornika

$$C_e = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

Kako je osnovna jedinica Farad (F) suviše velika, koriste se znatno manje jedinice dodavanjem prefiksa:

μ (mikro): μF ili vrlo često $\text{uF} \Rightarrow 10^{-6} \text{ F}$

n (nano): $\text{nF} \Rightarrow 10^{-9} \text{ F}$

p (piko): $\text{pF} \Rightarrow 10^{-12} \text{ F}$

Najčešće korišćeni kondenzatori su:

Elektrolitski: Kondenzatori velikih kapaciteta, ali polarizovani (ne sme im se obrnuti polaritet).

Keramički: Kondenzatori manjih kapaciteta, temperaturno dosta zavisni, sa malom rednom induktivnošću.

Blok: Sa izolatorom na bazi plastičnih materijala (na pr. poliester).

Trimer: Sa mehanički podešljivim kapacitetom, malih kapaciteta (do nekoliko desetina pF).

Promenljivi: Kao i trimer kondenzatori, ali sa izvedenom osovinom preko koje se može podešavati kapacitet. Koriste se u radio/transistoriskim prijemnicima za podešavanje prijemne frekvencije (stanice).

Označavanje kondenzatora je uglavnom numeričko, sa punom oznakom jedinice (μF , nF i pF), ili samo prefiksom jedinice (μ , n i p), dodatom iza brojne vrednosti ili umesto decimalne tačke, na primer:

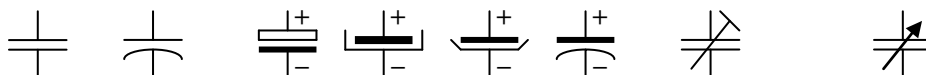
$10\mu\text{F}$ 1n2 39p

a može biti i samo numeričko, sa tri cifre, gde treća cifra označava broj nula iza dvocifrenog broja (kao kod otpornika). U ovom slučaju kao osnovna jedinica se uzima pF (10^{-12} F), na primer:

$104 = 100\,000 \text{ pF} = 100 \text{ nF} = 0.1 \mu\text{F}$

Slično otpornicima, i kod kondenzatora se koristi označavanje bojama, ali znatno ređe.

Simboli kondenzatora:



običan (nepolarizovani)

polarizovani (elektrolitski)

polupromenljivi

promenljivi

1.12. Kalemovi

Kao i kondenzatori, i kalemovi su električni elementi koji ne troše energiju u obliku toplote, nego je akumuliraju, u ovom slučaju u formi magnetnog polja. Kalem se sastoji od žice namotane u formi cilindra, sa ili bez feromagnetnog materijala u sredini.



Oznaka za induktivnost je L , a osnovna jedinica je Henri (H). U praksi se najčešće sreću vrednosti manje od osnovne jedinice:

m (mili): $\text{mH} \Rightarrow 10^{-3} \text{ H}$

μ (mikro): μH ili $\text{uH} \Rightarrow 10^{-6} \text{ H}$

n (nano): $\text{nH} \Rightarrow 10^{-9} \text{ H}$

Veza između struje i napona na kalemu je:

$$U_L = L \cdot \frac{dI_L}{dt} \quad \text{odnosno} \quad I_L = \frac{1}{L} \cdot \int U_L \cdot dt$$

što znači da je napon diferencijal struje, a struja integral napona.

U realnim kolima, zbog naponskih ograničenja, struja kroz kalem ne može se trenutno promeniti.

U kolima sa naizmeničnom strujom, impedansa kalema određena je izrazom

$$Z_L = j \cdot \omega \cdot L$$

Kako impedansa ima karakter otpornosti, a impedansa kalema je direktno zavisna od induktivnosti, može se zaključiti da se ekvivalentna induktivnost redne i paralelne veze kalemova računa na isti način kao i kod otpornika:

Redna veza:

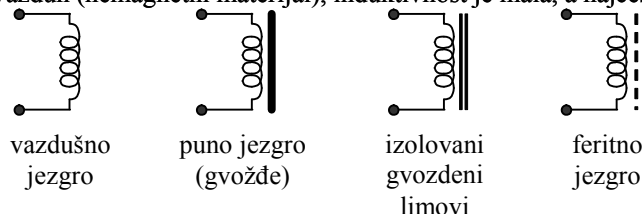
$$L_e = L_1 + L_2$$

Paralelna veza:

$$L_e = \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2}$$

Označavanje vrednosti je slično kao i kod otpornika i kondenzatora, odnosno mogu biti korišćene boje ili numeričke oznake.

Kalemovi mogu biti sa i bez feromagnetnog jezgra. Već namotana žica bez ikakvog jezgra, koja zahvaljujući sopstvenoj čvrstoći zadržava svoj oblik, ponaša se kao kalem i ima odgovarajuću induktivnost. Kako je jezgo vazduh (nemagnetni materijal), induktivnost je mala, a najčešće se koristi u visokofrekventnoj (radio) tehnici.



Feromagnetni materijal (najčešće gvožđe) je takođe i dobar provodnik. Kako se u svakom provodniku pod uticajem naizmeničnog magnetnog polja javlja indukovani napon, u punom gvozdenom jezgru se mogu pojaviti struje (tzv. vrtložne struje), koje zagrevaju jezgro i predstavljaju gubitak energije. Zato se

umesto punog jezgra, za niske frekvencije koriste posebno pripremljeni gvozdeni limovi, međusobno izolovani, čime se pravi prekid u mogućim vrtložnim strujama, a time i smanjuje gubitak energije u jezgru.

Za visoke frekvencije (VF), tamo gde su potrebni kalemovi sa većom induktivnošću, kao jezgo se upotrebljava ferit, materijal dobijen sinterovanjem sitnih gvozdenih čestica koje su međusobno izolovane.

Zavisno od tipa jezgra, postoje odgovarajući simboli za kalemove, kao što je prikazano na gornjoj slici:

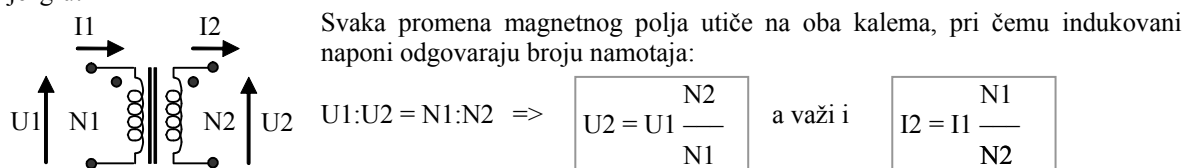
Kalemovi sa vazdušnim jezgrom: Imaju malu induktivnost, a pretežno se koriste u VF tehnici.

Kalemovi sa punim jezgrom: Imaju veliku induktivnost, a pretežno se koriste kao elektromagneti napajani jednosmernom strujom.

Kalemovi sa gvozdenim limovima: Imaju veliku induktivnost, a koriste se za niske frekvencije (NF), kao i za NF transformatore.

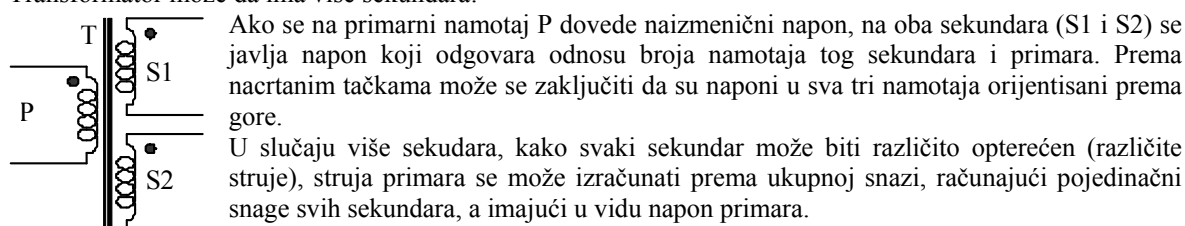
Kalemovi sa feritnim jezgrom: Imaju veliku induktivnost, a koriste se u VF tehnici.

Posebna vrsta kalemova su transformatori, koji se sastoje od dva ili više kalemova, namotanih na istom jezgru:

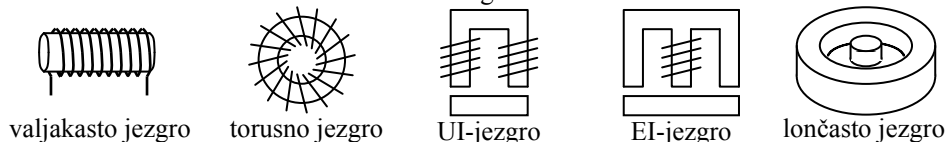


Tačke nacrtane u blizini gornjeg kraja oba namotaja označavaju orijentaciju napona (na primer +).

Transformator može da ima više sekundara:

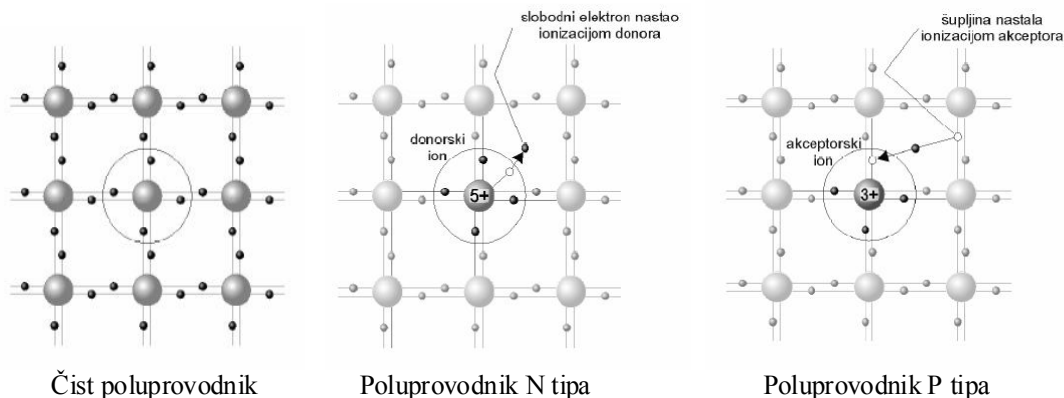


Jezgra koja se koriste za kalemove i transformatore mogu biti raznih oblika:

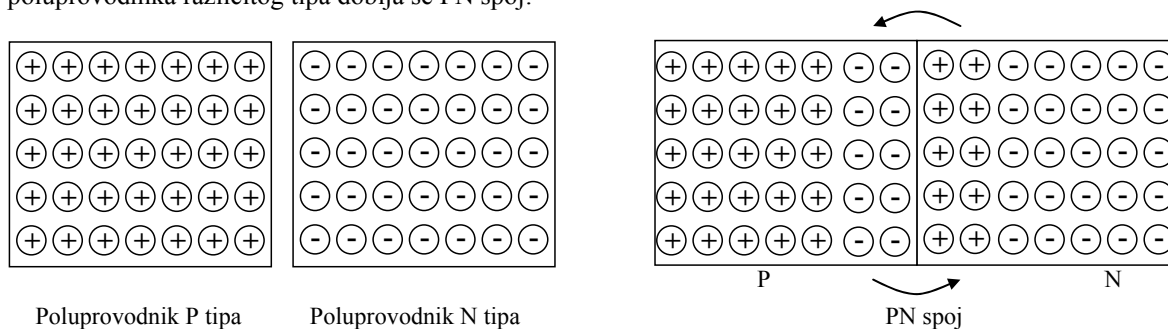


2. Poluprovodničke diode

Čist poluprovodnik je materijal kristalne strukture, koji se ponaša kao izolator. Ako se u ovu kristalnu strukturu ubace nečistoće, odnosno atomi koji imaju jednu više ili jednu manje valentnu vezu dolazi do pojave slobodnih elektrona (N-tip), ili manjka elektrona odnosno šupljina (P-tip).

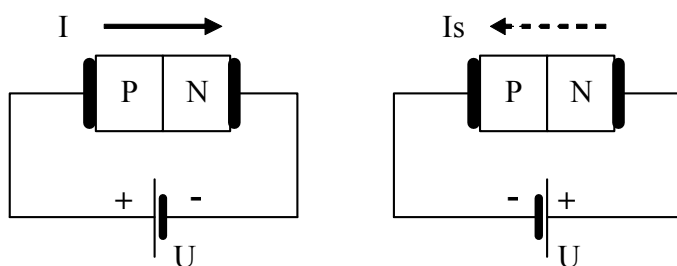


Zahvaljujući ubačenim atomima različite valentnosti, u poluprovodniku N tipa pojavljuju se slobodni elektroni, dok se u poluprovodniku P tipa pojavljuju slobodne šupljine (tj. manjak elektrona). Ovi elektroni i šupljine svojim kretanjem omogućavaju ponašanje materijala kao kod provodnika. Spajanjem dva poluprovodnika različitog tipa dobija se PN spoj:



Spajanjem P i N poluprovodnika, usled difuzije u zoni spoja dolazi do prelaska elektrona iz N u P tip, a šupljina iz P u N tip. Kako su u oba tipa naelektrisanja uravnotežena, nakon ovih prelazaka dolazi do pojave napona, odnosno električnog polja, sve do dostizanja ravnoteže između električnog polja i difuzionih sila. Elektroni i šupljine nisu trajno slobodni, nego se stalno rekombinuju, što znači da slobodni elektron, nakon određenog puta, upada na prazno mesto, a novi elektron se generiše na nekom drugom mestu. Isto važi i za šupljine. Zona izmenjenih naelektrisanja u okolini P-N spoja se zove oblast prostornog naelektrisanja.

Ako se PN spoj polariše tako da se na P tip dovede pozitivan, a na N tip negativan napon (direktna polarizacija), iz oblasti prostornog naelektrisanja elektroni (koji su iz N tipa prešli u P tip) kreću se prema pozitivnoj elektrodi (anodi), dok se šupljine kreću prema negativnoj elektrodi (katodi).



Direktna polarizacija

Inverzna polarizacija

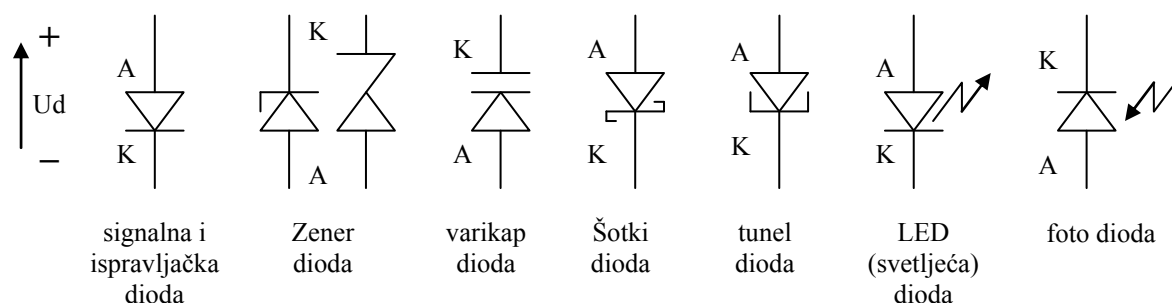
Zahvaljujući ovom kretanju, javlja se struja I , što znači da je pri ovakvoj polarizaciji PN spoj provodan.

Ako se polaritet napona obrne (inverzna polarizacija), odnosno na P tip se dovede negativan, a N tip pozitivan napon, struja kroz PN spoj neće postojati, jer se tome suprotstavlja električno polje na spoju P i N tipa. Tačnije, postojaće izvesna struja i u

inverznoj polarizaciji (označeno sa I_s), ali je ova struja daleko manja (u praksi se najčešće zanemaruje) od struje pri direktnoj polarizaciji. Međutim, ukoliko se priključeni napon značajno povećava, usled sužavanja zone prostornog naelektrisanja i pri dovoljno velikom naponu, doći će do značajnog povećanja ove inverzne struje, što se naziva proboj.

2.1. Vrste dioda

Osnovni PN spoj se naziva i dioda. Zavisno od namene proizvode se različiti tipovi dioda:



Signalna dioda: Koristi se u elektronskim kolima za ispravljanje malih signala i kao prekidač zavisen od smera struje. Maksimalna struja u direktnom smeru je nekoliko stotina mA, a probojni napon u inverznom smeru je reda stotinak volti.

Ispravljačka dioda: Koristi se u ispravljačkim kolima, prvenstveno radi dobijanja jednosmernog napona od naizmeničnog. Struja direktnog smera se kreće od oko jednog A do 1000 i više A.

Zener dioda: Dioda predviđena za rad u inverznom smeru, u režimu proboja. Koristi se kao izvor referentnog napona, a pravi se sa probojnim naponima od nekoliko volti do nekoliko desetina volti.

Varikap dioda: Dioda predviđena za rad u inverznom smeru, sa povećanom parazitnom kapacitivnošću, koja je reda do nekoliko desetina pF, a može naponski kontrolisati. Koristi se u visokofrekventnim kolima.

Šotki dioda: Dioda napravljena spajanjem poluprovodnika i metala, a ne dva poluprovodnika različitog tipa. Zbog velike brzine isključivanja (promena od direktne u inverznu polarizaciju), koristi se u brzim prekidačkim kolima.

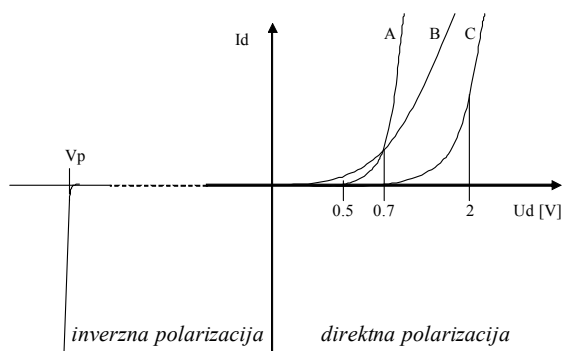
Tunnel dioda: Specijalna dioda koja u jednom delu svoje karakteristike pri direktnoj polarizaciji ima karakteristiku negativne otpornosti (što je inače karakteristika naponskog izvora), zbog čega se može koristiti kao aktivni element oscilatora veoma male snage.

LED dioda: Dioda koja emituje vidljivu i nevidljivu (infracrvenu) svetlost. U ovu kategoriju spadaju i laserske diode, kod kojih je emitovana svetlost koherentna.

Foto dioda: Dioda kod koje, pri inverznoj polarizaciji, inverzna struja provođenja (zanemarljiva kod ostalih dioda) jako zavisi od svetlosti.

2.2. Strujno-naponska karakteristika diode

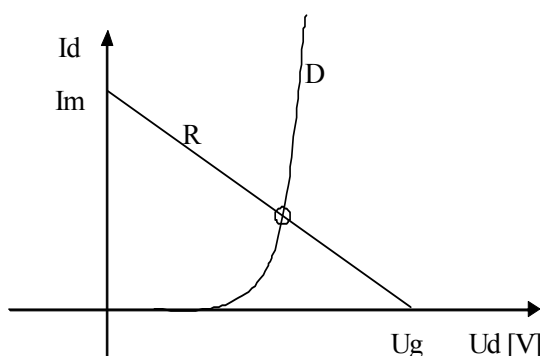
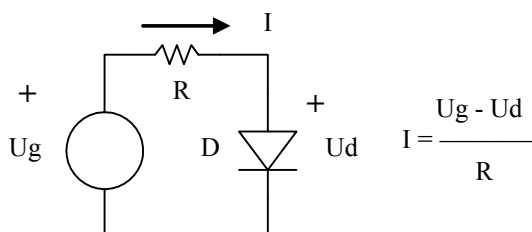
Ponašanje diode u električnom kolu određeno je strujno-naponskom karakteristikom, kao što je



prikazano na slici. Karakteristika A odgovara signalnoj silicijumskoj diodi, kod koje je prag provođenja (napon pri kome počinje da teče struja u direktnom smeru) oko 0.5V, dok je radni napon (za nominalnu struju) oko 0.7 do 0.75V. Kod ispravljačkih dioda radni napon je nešto veći (čak i preko 1V), a zavisi od nominalne struje i maksimalnog inverznog napona. Karakteristika B odgovara Šotki diodi, koja u direktnom smeru počinje ranije (pri nižim naponima) da provodi, ali karakteristika u direktnom smeru ima manju strminu nego obična dioda. Karakteristika C odgovara LED (svetlećoj) diodi, koja zavisno od boje, može da

ima radni napon od 1.6V do 4V. Na slici je označen i probojni napon, tj. napon inverzne polarizacije pri kome dioda počinje da provodi struju, i to vrlo naglo (tzv. proboj). Ovaj inverzni napon – napon proboja – je osnova rada Zener dioda, koje su i predviđene za inverzni način rada.

Na slici treba uočiti veliku strminu strujno-naponske karakteristike kada je dioda provodna. Ovo znači da se



za male promene radnog napona struja diode veoma mnogo menja, što znači da je struju diode teško kontrolisati kada se dioda direktno priključi na naponski izvor. Kako prevelika struja može uništiti diodu (velika struja znači i veliku snagu disipacije na diodi, pa time i visoku temperaturu), može se zaključiti da dioda ne sme direktno da se priključuje na naponski izvor, nego se mora redno sa diodom vezati otpornik kojim se struja diode može dobro kontrolisati.

Kako se napon diode U_d vrlo malo menja i pri većim promenama struje diode, ako je razlika napona izvora i napona diode dovoljno veća od varijacija napona diode, može se smatrati da struja diode zavisi uglavnom od napona izvora i rednog otpornika.

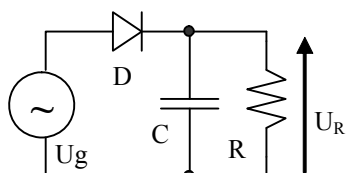
Na slici sa strujno-naponskom karakteristikom diode nacrtana je i strujno-naponska karakteristika otpornika. Ova karakteristika je obrnuta po horizontalnoj osi, jer se napon otpornika menja suprotno od promene napona na diodi:

$$U_R = U_g - U_d$$

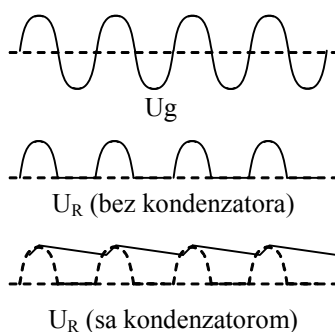
Kako dioda i otpornik imaju istu struju, zaokružena

2.3. Ispravljač

Osnovna primena ispravljačkih dioda je u kolima za pretvaranje naizmjeničnog napona u jednosmerni, tj. ispravljačima.



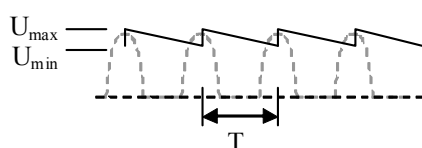
polutalasni ispravljač



Na slici je prikazan polutalasni ispravljač, sastavljen od diode D i kondenzatora C. Na ulaz ispravljača je priključen naponski izvor U_g koji daje naizmjenični napon, a na izlaz ispravljača je priključen potrošač R.

Na slici je prikazano i tri napona. Prvi dijagram prikazuje ulazni sinusni napon, na drugom dijagramu se vidi kako izgleda napon na potrošaču kada kondenzator ne postoji u kolu (ili je zanemarljivo male vrednosti), dok

poslednji dijagram prikazuje približno izgled napona na potrošaču u standardnoj konfiguraciji sa odgovarajućim kondenzatorom. Zahvaljujući diodi, na izlaz se prenosi samo pozitivna poluperioda sinusnog napona, dok je negativna odsečena jer u tom slučaju dioda ne provodi (inverzno je polarisana). Uloga kondenzatora je da "ispegla" pulsirajući napon ("brum") koji se dobija posle diode, što je prikazano na trećem dijagramu.



Ispravljač se uobičajeno projektuje imajući u vidu maksimalnu struju potrošača i maksimalno dozvoljene varijacije napona na potrošaču. Zbog toga se, radi lakšeg računanja, maksimalna struja potrošača uzima kao konstantna, a talasni oblik napona na potrošaču aproksimira kao što je prikazano na slici (testerastim talasnim oblikom). Kako je napon

na kondenzatoru integral struje kondenzatora, ako je struja konstantna, tada se napon linearno menja u vremenu i može se napisati:

$$U = \frac{I}{C} * t \quad \text{što znači da će tokom intervala } T \text{ promena napona na kondenzatoru biti} \quad \Delta U = \frac{I}{C} * T$$

Naizmenični napon je najčešće izražen preko efektivne vrednosti, koja za sinusni talasni oblik iznosi

$$U_e = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \Rightarrow U_m = U_e * \sqrt{2}$$

gde je U_m maksimalna, a U_e efektivna vrednost.

Ako se zanemari pad napona na diodi u direktnom smeru, tada vršna vrednost sinusnog napona odgovara i maksimalnoj vrednosti U_{\max} ispravljenog napona, na osnovu koje se može izračunati i njegova minimalna vrednost U_{\min}

$$U_{\min} = U_{\max} - \Delta U \Rightarrow U_{\min} = U_{\max} - \frac{I}{C} * T$$

Ovde su:

I – struja potrošača

C – kapacitet kondenzatora

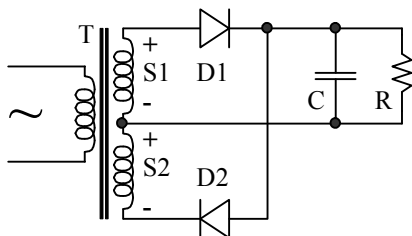
T – interval između dve vršne vrednosti ispravljenog napona (20 ms za standardni 50 Hz napon)

U_{\min} – najmanji napon na kondenzatoru koji je posledica pražnjenja kondenzatora kroz potrošač

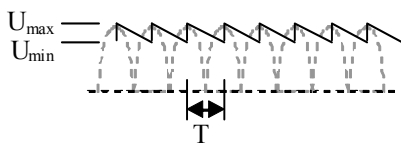
U_{\max} – najveći napon na kondenzatoru koji je posledica punjenja kondenzatora preko diode

Važno je napomenuti da je ovaj proračun približan i koristi se samo radi procene (na primer potrebnog kapaciteta kondenzatora za maksimalno dozvoljenu vrednost bruma), jer struja potrošača uglavnom nije konstantna, kao što i napon na kondenzatoru nije testerastog oblika.

Manje varijacije izlaznog napona (brum) se mogu postići primenom punotalasnog ispravljača, prikazanog na slici:

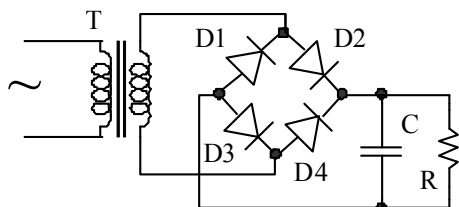


Na slici je prikazan i transformator označen sa T . On ima dva sekundara, označena sa $S1$ i $S2$, koji se ponašaju kao dva naponska izvora (naizmeničnog napona), redno vezana i usmerena na isti način. Ovakav spoj se ponaša kao dva pojedinačna polutalasna ispravljača koji su povezani tako da ispravljaju različite poluperiode sinusnog napona. Brum izlaznog napona je manji jer je izbegnuta “rupa” u obliku izlaznog napona, na mestu gde nedostaje negativna poluperioda kod polutalasnog ispravljača.



Proračun bruma se vrši na isti način kao i kod polutalasnog ispravljača, samo što je sada, za istu frekvenciju naizmeničnog napona, interval T dvostruko kraći (na pr. 10 ms za 50 Hz frekvenciju). Dvostruko kraći interval znači da će, prema grubom proračunu, i napon na kondenzatoru za to vreme pasti za dvostruko

manju vrednost, što automatski znači i manji brum.



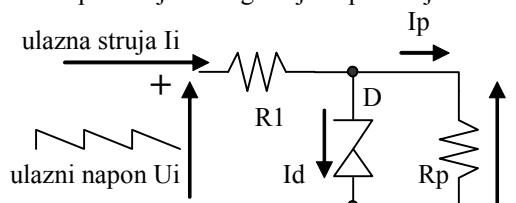
Ako je na raspolaganju samo jedan naponski izvor, odnosno jedan sekundarni namotaj transformatora, može se primeniti spoj sa četiri ispravljačke diode – Grečov spoj, kao na slici. U ovom slučaju, kada je napon sekundara orijentisan prema gore, provodi dioda $D2$, struja zatim prolazi kroz potrošač R , pa preko diode $D3$ nazad do drugog kraja sekundara. Dioda $D1$ i $D4$ ne provode, jer su inverzno polarisane. Kada se orijentacija napona sekundara promeni, napon je orijentisan prema dole, pa struja prolazi kroz diodu $D4$, zatim kroz potrošač R i na kraju kroz diodu $D1$ nazad na drugi kraj sekundara. Talasni oblik izlaznog napona je isti kao i u prethodnom slučaju, samo što je ovde potrebno dvostruko više ispravljačkih dioda.

Treba reći i da pri proračunu bruma i minimalnog napona na izlazu treba uzeti u obzir i pad napona na diodama (za ovaj pad napona treba smanjiti amplitudu ulaznog sinusnog napona U_{\max}). Kod punotalasnog

ispravljača sa dve diode struja prolazi samo kroz jednu diodu, što znači da se napon umanjuje za 0.7 – 0.8 V, dok kod Grecovog spoja struja uvek prolazi kroz dve diode, na kojima je i ukupni pad napona dvostruko veći i iznosi 1.4 – 1.6 V.

2.4. Stabilizator napona sa Zener diodom

Polutalasno ili punotalasno ispravljeni napon u većini slučajeva nije dobar za napajanje elektronskih uređaja, koji po pravilu zahtevaju konstantan, stabilan napon, bez varijacija, tj. bez bruma. Za uređaje sa vrlo malom potrošnjom moguće je napraviti jednostavan stabilizator napona sa Zener diodom:



Zener dioda je inverzno polarisana, što je za ovaj tip diode standardni način rada. Osim probojnog napona, što je osnovni parametar Zener diode, uvek se daje i snaga koju dioda može izdržati bez oštećenja. Kako je napon praktično konstantan, na osnovu ove snage može se izračunati i maksimalna trajna struja diode.

Takođe, da bi dioda pravilno radila, odnosno da bi napon na njoj odgovarao deklarisanom naponu, kroz diodu mora da teče neka minimalna struja. U približnom proračunu, ako se ova struja zanemari, tada ulazni napon, redni otpornik R1 i otpor potrošača R_p čine razdelnik napona, čiji izlaz (U_o) treba da odgovara naponu Zener diode. Na ovaj način se može izračunati minimalni ulazni napon pri kome potrošač (R_p) dobija potrebnu struju:

$$U_{imin} = R1 \cdot I_p + U_o$$

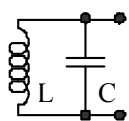
Sa druge strane, maksimalni ulazni napon je određen deklarisanom snagom diode, odnosno maksimalnom strujom:

$$U_{imax} = R1 \cdot (I_p + I_{d,max}) + U_o = R1 \cdot I_p + R1 \cdot \frac{P_d}{U_o} + U_o$$

Na osnovu U_{imin} i U_{imax} mogu se odrediti vrednosti kondenzatora za polutalasni ili punotalasni ispravljač, kao i amplituda, odnosno efektivna vrednost naizmeničnog napona na ulazu u ispravljač. Pravilo je da se kao granične vrednosti uzimaju manje vrednosti unutar opsega U_{imin} i U_{imax}, kojima se obezbeđuje izvesna rezerva za slučaj varijacije mrežnog napona, tolerancije komponenti i slično.

2.5. Primena varikap dioda

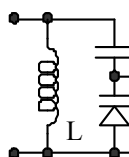
Jedna važna primena spoja kondenzatora i kalema u radio tehnici je oscilatorno kolo, koje omogućava stvaranje oscilacija na frekvenciji f određenoj kapacitetom kondenzatora i induktivnosti kalema:



$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

Do oscilovanja dolazi uzastopnom izmenom energije između kondenzatora i kalema. U realnim komponentama se ta energija gubi na otpornosti koja postoji u kolu, zbog čega ovo kolo treba u pravilnim intervalima pobuđivati, dodavanjem energije

sinhornizovano sa frekvencijom oscilovanja. Kako je u radio tehnici (tj. VF – visokofrekventnoj tehnici) često potrebno da se sopstvena frekvencija oscilatornog kola (dato izrazom) može podešavati, kondenzator u oscilatornom kolu se može zameniti rednom vezom kondenzatora i varikap diode:



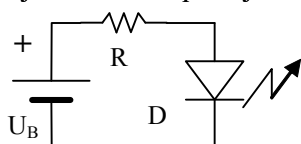
$$C_e = \frac{C \cdot C_D}{C + C_D} \sim C_D$$

Obično je kapacitet kondenzatora C znatno veći od kapacitivnosti C_D varikap diode D, tako da, zbog redne veze, ekvivalentni kapacitet odgovara kapacitivnosti varikap diode. Ako se dioda inverzno polariše preko otpornika (dovoljno velike otpornosti da se može zanemariti njegov uticaj), naponom U_c, tada se

variranjem ovog napona može menjati ekvivalentni kapacitet oscilatornog kola. Kondenzator C u ovom kolu ima za svrhu razdvajanje jednosmernog kola dioda-otpornik od kalema, čiji je otpor za jednosmernu struju jako mali i može se tretirati kao kratki spoj.

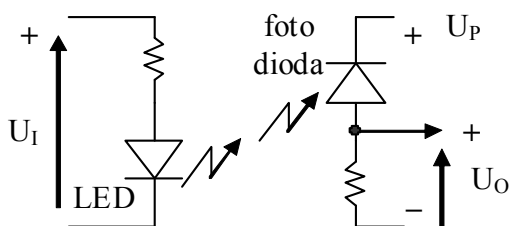
2.6. Primena LED i foto dioda

Svetleće diode – LED (*Light Emitting Diode*) – koriste se prvenstveno za vizuelnu indicaciju. Njihov inverzni probojni napon je vrlo nizak (oko 5V), zbog čega se koriste isključivo direktno polarisane.



Standardne boje LED su crvena, žuta, zelena plava i bela. Plastično kućište može biti u boji svetlosti koju LED emituje, ili potpuno providno. Specijalna vrsta LED su laser-diode, koje emituju koherentno svetlo, visokog intenziteta (zbog usmerenosti) i male snage.

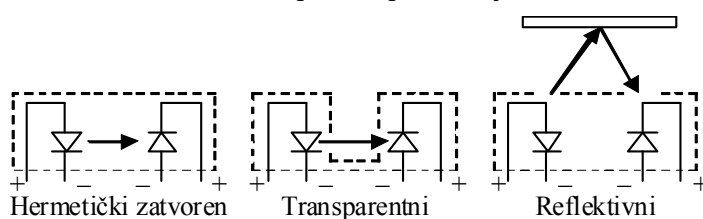
Osim vidljive svetlosti, LED mogu emitovati i infra-crveno svetlo (IR LED), koje se, uz odgovarajuće foto-diode, koristi za prenos informacija na kratka i dugačka rastojanja.



Na slici je prikazan jedan način povezivanja para IR LED i IR foto-diode. LED je deo predajnika, koji se napaja naponom U_I , pri čemu intenzitet emitovanog svetla zavisi od ovog napona.

Foto dioda je inverzno polarisana, spojena na konstantan napon napajanja U_P preko otpornika. U potpunom mraku, inverzna struja foto diode je jako mala (kao što je to slučaj i kod ostalih tipova dioda), međutim, pri osvetljavanju, ova struja značajno raste, pri čemu stvara odgovarajući pad napona na otporniku. Ovaj napon (U_O) je izlazni napon foto prijemnika, koji se dalje koristi prilikom obrade.

Parovi LED-foto dioda mogu biti ugrađeni u jedno kućište i tada se nazivaju opto-kapleri (Opto Coupler) ili opto-sprežnjaci. Osim direktne veze, ovakvi parovi mogu biti predviđeni za refleksni način rada, kada se emitovana svetlost prvo odbija od bliskog predmeta, a zatim vraća u foto diodu. U opto-kaplerima se uobičajeno koriste IR elementi, uz eventualne IR filtre kao deo plastičnog (inače neprovidnog) kućišta.



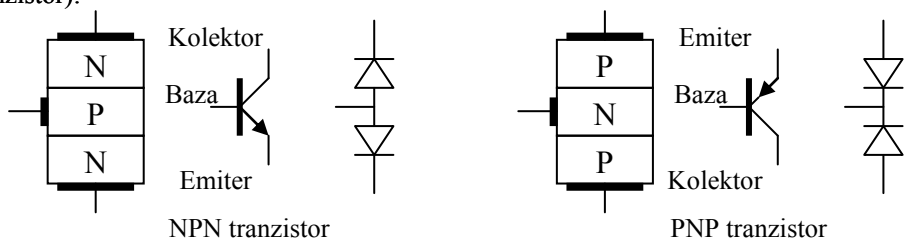
U telekomunikacijama se koriste parovi laser dioda i odgovarajući foto element, međusobno povezani optičkim kabelom (optičke komunikacije).

3. Tranzistori

Tranzistori su osnovni aktivni elementi u današnjoj elektronici. Pri tome, pod pojmom “aktivni” podrazumeva se element koji može da pojača električni signal (struja ili napon), ako se na odgovarajući način spoji u električnom kolu. Dve osnovne vrste tranzistora su bipolarni (BJT – *Bipolar Junction Transistor*) i tranzistor sa efektom polja (FET – *Field Effect Transistor*).

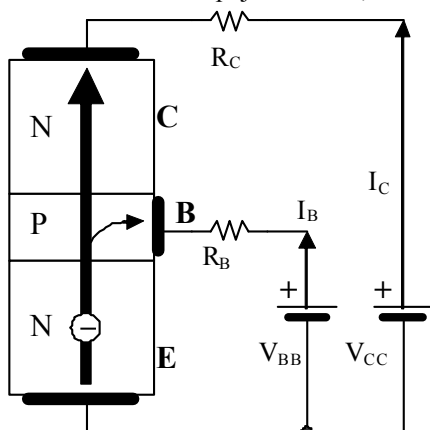
3.1. Bipolarni tranzistori

Bipolarni tranzistor se sastoji iz dva P-N spoja, kao da se na diodni P-N spoj doda još jedan poluprovodnik P odnosno N tipa. Tako se dobija spoj sa tri poluprovodnika N-P-N (NPN tranzistor), ili P-N-P (PNP tranzistor):



Na simbolu tranzistora strelica označava tok struje kroz priključak koji se naziva emiter. Struja kroz preostala dva priključka (kolektor i bazu) ima suprotan smer, tako da je zbir ove dve struje jednak struji kroz emiter. Pored simbola tranzistora nacrtana je i ekvivalentna šema dva P-N spoja, od kojih svaki formira jednu diodu.

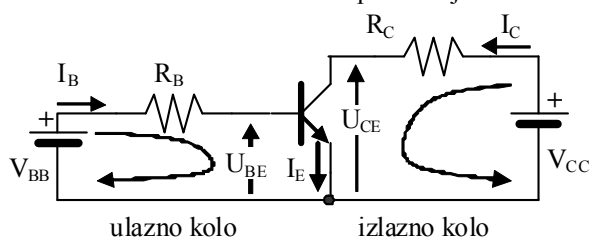
Ove dve diode imaju jedan poluprovodnik zajednički, zbog čega se ovakav P-N-P (ili N-P-N) spoj ne može tretirati kao običan spoj dve diode, osim u nekim specijalnim slučajevima.



Na prikazanoj slici kolektor i emiter su spojeni na napon V_{CC} preko otpornika R_C , a baza i emiter na napon V_{BB} preko otpornika R_B . Spoj kolektor-baza je inverzno polarisan (ne treba zaboraviti da kroz inverzno polarisan PN spoj praktično nema protoka struje), dok je spoj baza-emiter direktno polarisan. Zbog direktne polarizacije B-E iz emitera u bazu prelazi veliki broj elektrona. Kako je baza tanka, najveći deo elektrona koji dođu u bazu, zbog električnog polja C-B spoja se ne zadržavaju u bazi, nego prelaze u kolektor, što je označeno debelom strelicom na slici. Samo mali broj elektrona ne stigne do kolektorske oblasti, nego iz baze izlazi preko baznog otpornika R_B (tanka strelica). Osnos broja elektrona koji pređu u kolektor i onih koji izadu iz baze predstavlja jednosmerno strujno pojačanje tranzistora (B), koje se u većini slučajeva može tretirati kao približno konstantno.

Struje kolektora i baze su usmerene prema emitoru, jer je pozitivan smer struje definisan suprotno od smera kretanja elektrona.

Tranzistor NPN tipa se uobičajeno polariše tako da su baza i kolektor pozitivniji od emitera, dok kod PNP tranzistora emiter treba da bude pozitivniji od baze i kolektora. Na sledećoj slici je prikazan osnovni način spajanja NPN tranzistora. Za PNP tranzistor treba obrnuti polaritet oba naponska izvora.

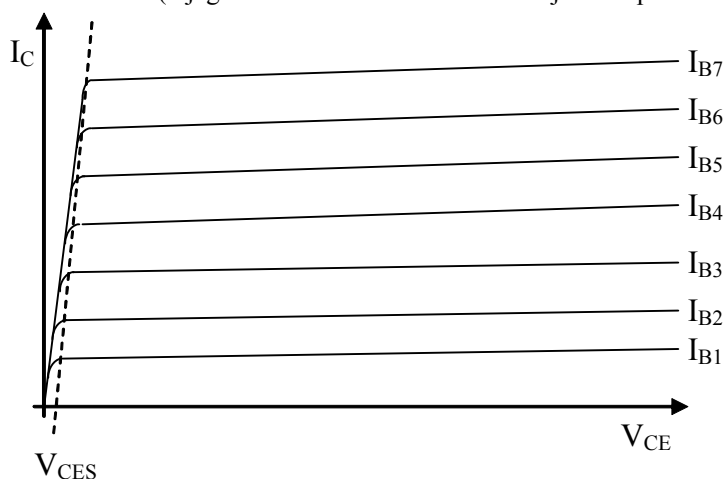


Jednosmerno pojačanje tranzistora se izražava kao odnos kolektorske i bazne struje (naizmenično pojačanje važi za promene ovih struja):

$$\text{jednosmerno pojačanje } B = \frac{I_C}{I_B} \quad \text{naizmenično pojačanje } \beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

Za međusobni odnos kolektorske, bazne i emitorske struje važi: $I_E = I_C + I_B$

Ako se za različite (konstantne) bazne struje I_B varira kolektorski napon U_{CE} , dobijaju se familije izlaznih karakteristika (dijagram zavisnosti kolektorske struje od napona kolektor-emiter):



Sa slike se vidi da je za konstantnu baznu struju kolektorska struja veoma malo zavisna od kolektorskog napona (tj. napona kolektor-emiter). Takođe, očigledno je da kolektorska struja jako zavisi od bazne struje. Ovaj režim rada (desno od isprekidane linije označene sa V_{CES}) se naziva aktivni režim, kada se kolektorski spoj ponaša kao strujni izvor.

Spoj baza-emiter se ponaša kao dioda. Ako je napon U_{BE} suviše mali, elektroni koji iz emitera pređu u bazu ne stižu do kolektora, zbog čega tranzistor ne provodi. Ovde se pod provođenjem tranzistora podrazumeva

postojanje kolektorske struje kao posledice bazne struje (ne treba zaboraviti da je kolektorski PN spoj inverzno polarisan i da kroz njega protiče inverzna struja polarizacije, koja je veoma mala). Tek kada napon U_{BE} dostigne vrednost oko 0.5V provođenje počinje, a U_{BE} brzo dostiže radnu vrednost, koja je za silicijumske tranzistore oko 0.7V. Inverzni probojni napon baza-emiter U_{BER} je mali, najčešće oko 7V.

Kolektorska struja zavisi, osim bazne struje, još i od okolnog kola. Na prethodnoj slici, očigledno je da je kolektorska struja ograničena naponom napajanja V_{CC} i otpornikom R_C . Ako je bazna struja takva da se na osnovu nje može postići kolektorska struja veća od ove maksimalne vrednosti, tada će kolektorska struja biti ograničena na maksimalnu vrednost, zbog čega

$$I_{C\text{MAX}} = \frac{V_{CC}}{R_C}$$

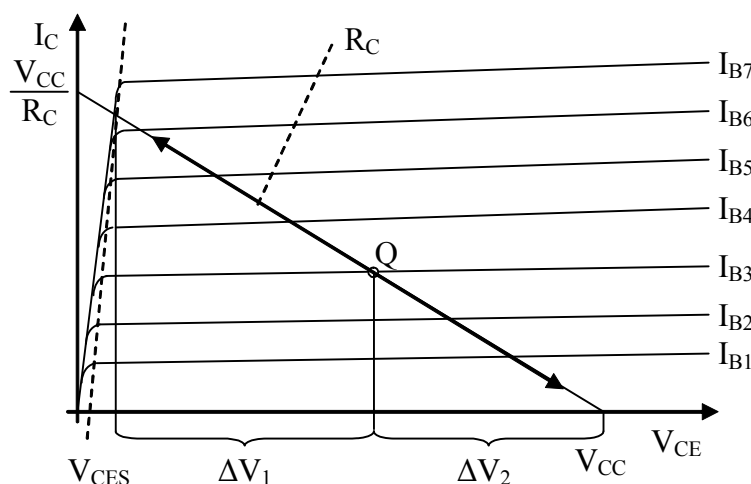
više neće važiti izraz za pojačanje, a napon U_{CE} će biti vrlo mali. Ovaj režim rada tranzistora se naziva zasićenje (na grafiku označeno sa $V_{CES} \Rightarrow V_{CE}$ saturacije). Za određivanje granice kada je tranzistor u zasićenju koriste se dva pravila (zavisno od situacije):

1. Tranzistor je u zasićenju ako je kolektorski napon U_{CE} manji ili jednak od baznog napona U_{BE} .
2. Tranzistor je u zasićenju ako kolektorski spoj dostigne granicu direktne polarizacije, odnosno kada postane za oko 0.5V manji od baznog napona U_{BE} .

Za linearna kola je važan prvi metod, jer je ovde bitno da tranzistor uvek radi u aktivnom režimu, kada u potpunosti važi izraz za pojačanje. Kao zaključak, u proračunima se može smatrati da je tranzistor u zasićenju ako napon U_{CE} padne ispod 0.7V, jer su pri toj vrednosti naponi U_{CE} i U_{BE} izjednačeni.

3.2. Radna prava i radna tačka

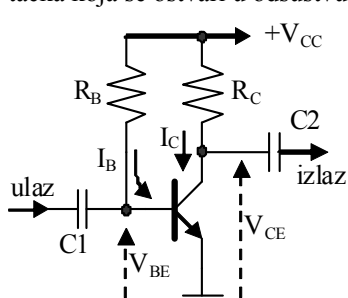
Pravilan rad tranzistora zavisi od polarizacije. Kako tranzistor nije sam u kolu, kolektorski napon (U_{CE}) zavisi od kolektorske struje (tranzistor kao strujni izvor) i okolnog kola. Ako se na dijagram izlaznih karakteristika ubaci i karakteristika kolektorskog otpornika R_C , dobija se sledeća slika.



Kako je zbir kolektorskog napona U_{CE} i napona na kolektorskom otporniku R_C konstantan (jednak naponu napajanja V_{CC}), to znači da su promene ova dva napona iste, ali sa različitim predznacima. Zbog toga je karakteristika otpornika obrnuta, tj. sa povećanjem struje kolektora, napon na otporniku se smanjuje i obrnuto. Trenutni napon na kolektoru može se iz dijagrama dobiti kao presečna tačka jedne izlazne karakteristike (za jednu baznu struju) i karakteristike otpornika (na slici označeno sa Q).

Na ovom dijagramu prava određena kolektorskim otpornikom naziva se

radna prava, a tačka koja određuje trenutnu vrednost kolektorskog napona (i struje) je radna tačka. Radna tačka koja se ostvari u odsustvu ulaznog signala naziva se mirna radna tačka.



Na slici je prikazana električna shema jednostavnog pojačavača naizmeničnih signala. Kondenzatori služe za jednosmerno razdvajanje tranzistorskog kola od ulaza i izlaza. Da bi ovo kolo pravilno radilo, potrebno je polarizovati tranzistor, za šta se koriste otpornici R_B i R_C , pri čemu je R_C istovremeno i otpornik na kome se formira izlazni signal. Kako se naizmenični signal može tretirati kao skup sinusnih signala, za svrhe analize kola, kao ulazni signal, najčešće se uzima jednostavan sinusni signal. Da bi se dobila maksimalna moguća amplituda na izlazu pojačavača, potrebno je mirnu radnu tačku podesiti tako maksimalno odstupanje radne tačke u plus i minus stranu u odnosu na mirnu radnu

tačku bude jednako. Na dijagramu sa radnom pravom, ovo znači da promene ΔV_1 i ΔV_2 treba da budu jednake. Donja naponska granica za radnu tačku je granica zasićenja tranzistora, dok je gornja granica isključenje tranzistora (nulta struja kolektora). Za zahtevanu mirnu kolektorsku struju i poznato jednosmerno pojačanje, mogu se izračunati kolektorski i bazni otpornik:

$V_{CEQ} = \frac{V_{CC} + V_{CES}}{2}$	$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{I_C}$	$I_B = \frac{I_C}{B}$	$R_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_B}$
kolektorski napon	kolektorski otpornik	bazna struja	bazni otpornik

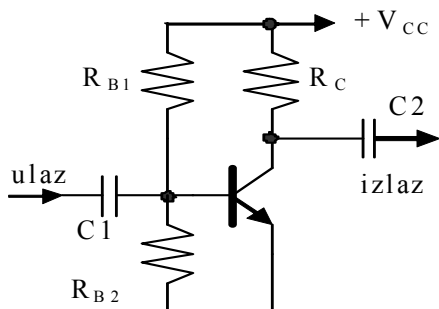
- Za napon zasićenja tranzistora V_{CES} uzima se vrednost od 0.7V

- V_{CEQ} je kolektorski napon mirne radne tačke

Kako kolektorski napon zavisi od kolektorske struje, odnosno od bazne struje i jednosmernog pojačanja, može se videti uticaj pojačanja na kolektorski napon:

$$V_{CE} = V_{CC} \cdot \left(1 - B \cdot \frac{R_C}{R_B} \right)$$

Pojačanje tranzistora u istoj klasi znatno varira (na pr. od 100 do 250, od 200 do 400 itd.). Takođe, na pojačanje tranzistora utiče i temperatura. Zbog toga se prikazana šema može koristiti samo uz dobro poznato pojačanje i za manje signale, kod kojih neće doći do izobličenja (izlazak proračunatog napona kolektora iz granica $V_{CES} - V_{CC}$), čak i ako se mirna radna tačka značajnije šeta.



Alternativa jednom baznom otporniku je spoj sa dva bazna otpornika, koji sa napajanjem formiraju Tevenenov generator. U nekim slučajevima, kada se radi sa malim kolektorskim strujama i velikim naponima, još ako je i pojačanje tranzistora veliko, može biti potreban bazni otpornik vrlo velike otpornosti. Umesto jednog takvog otpornika, ako se primeni šema sa slike, ekvivalentni Tevenenov napon može biti znatno niži, a time i ekvivalentni redni bazni otpornik (tj. otpornost Tevenenovog izvora) može biti znatno manji. Kao i prethodni, i ovaj spoj je osetljiv na promene pojačanja tranzistora.

Da bi se smanjio uticaj promena pojačanja tranzistora na rad kola, mogu se koristiti spojevi kod kojih se primenom negativne reakcije promena pojačanja umanjuju:

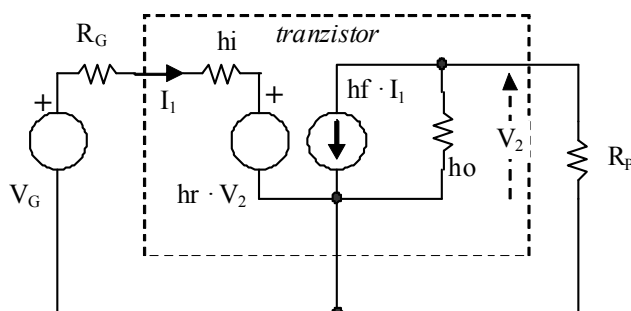
<p>Ako se pojačanje poveća, povećava se kolektorska struja. Usled toga pada kolektorski napon a time i napon na baznom otporniku, zbog čega se smanjuje bazna struja, što kompenzuje promenu pojačanja.</p>	<p>Ako se pojačanje poveća, rastu kolektorska i emitorska struja, a time i pad napona na emitorskom otporniku. Zbog toga se smanjuje napon baza-emiter, a kao posledica i bazna struja, što kompenzuje promenu pojačanja. Emitorski kondenzator C_E kratko spaja emitorski otpornik za naizmenični signal, da bi naizmenično pojačanje ostalo veliko.</p>

3.3. Osnovni načini spajanja bipolarnih tranzistora

Kako tranzistor ima tri priključka, logično je da postoji i tri načina spajanja tranzistora, odnosno tri tipa spojeva. Iz ranije pokazanih primera, vidi se da uvek postoji ulaz, izlaz i zajednička linija (najčešće masa). Prema tome koji od tri priključka tranzistora se koristi kao zajednički za ulaz i izlaz, razlikuju se i spojevi koji se prema tome i nazivaju:

- spoj sa zajedničkim emiterom
- spoj sa zajedničkim kolektorom
- spoj sa zajedničkom bazom

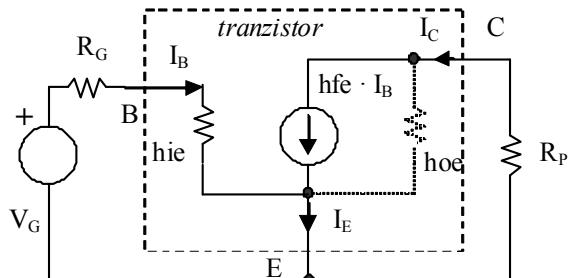
Svaki od ovih spojeva ima neke tipične osobine, ali je za sve njih zajedničko to da moraju biti pravilno polarizovani, korišćenjem osnovnih principa. Kada se jednosmerna radna tačka postavi, za potrebe analize kola u režimu naizmeničnih signala tranzistorsko se može zameniti odgovarajućom ekvivalentnom šemom, u kojoj su jednosmerni naponski izvori zamenjeni kratkim spojem, a jednosmerni strujni izvori otvorenom vezom. Najčešće se koristi ekvivalentna šema sa H parametrima, kao na sledećoj slici:



h_i ili **h11** – ulazna otpornost
 h_f ili **h21** – pojačanje
 h_o ili **h22** – izlazna otpornost (tj. provodnost)
 h_r ili **h12** – povratni uticaj
 V_G – spoljašnji izvor signala
 R_G – otpornost spoljašnjeg izvora
 R_P – otpornost potrošača

Ekvivalentna šema je uokvirena isprekidanom linijom, a predstavlja opštu šemu sa H

parametrima. Najčešće se koriste H parametri za zajednički emiter, i to u pojednostavljenoj varijanti, sa zanemarivanjem povratnog parametra h_r :



Uz naziv H parametra obično se dodaje i indeks E, B ili C, zavisno od toga koji je priključak zajednički. Tako su za zajednički emiter parametri **hie**, **hfe**, **hoe** i **hre**, pri čemu **hfe** odgovara pojačanju tranzistora β za naizmenični signal. Indeksi H parametara se pišu malim slovima za naizmenični signal, a velikim za jednosmerni. Tako jednosmerno pojačanje B odgovara parametru h_{FE} .

Parametar **hoe** je reda veličina nekoliko desetina $K\Omega$, tako da se može zanemariti ako je kolektorski

otpornik (u ovom slučaju otpor potrošača R_P) reda nekoliko $K\Omega$. U primerima koji slede, parametri **hoe** (tj. **h22**) i **hre** (tj. **h12**) će biti ignorisani, čime je proračun pojednostavljen, ali uz smanjenu tačnost.

Osnovni spojevi		
Spoj sa zajedničkim emiterom	Spoj sa zajedničkim kolektorom	Spoj sa zajedničkom bazom
Ekvivalentne šeme		
Bazni otpornik R_B je zanemaren, jer je znatno veći od ulazne otpornosti hie .	Bazni otpornici su R_{B1} i R_{B2} se mogu zanemariti ako im je otpornost znatno veća od otpornosti R_G .	Bazni otpornici su zanemareni, jer je kondenzator C_B kratak spoj za naizmenični signal.

Iz navedenih ekvivalentnih šema vidi se da je jednosmerni izvor V_{CC} zamenjen kratkim spojem pri analizi za naizmenične signale, tj. kratko je spojen sa masom. Takođe, za naizmenični signal i kondenzatori se mogu smatrati kratkim spojem.

Na osnovu ekvivalentnih šema mogu se izračunati sledeći parametri:

- naponsko pojačanje, odnos izlaznog i ulaznog napona
- ulazna otpornost, odnos ulaznog napona i ulazne struje
- izlazna otpornost, koja se meri pri kratkospojenom ulazu (na masu), a sa dodatim naizmeničnim izvorom u tačku izlaza, pri čemu se meri struja ovog izvora. Odnos napona i struje izvora daju izlaznu otpornost.

Spoj sa zajedničkim emiterom:

Naponsko pojačanje:

$$I_B = \frac{V_G}{R_G + h_{ie}} \quad \Rightarrow \quad A = \frac{V_O}{V_G} = \frac{-R_C \cdot h_{fe} \cdot I_B}{V_G} = -\frac{R_C \cdot h_{fe}}{V_G} \cdot \frac{V_G}{R_G + h_{ie}} = -\frac{R_C \cdot h_{fe}}{R_G + h_{ie}}$$

Predznak '−' u izrazu za pojačanje znači da pojačavač obrće fazu (pozitivne ulazne promene odgovaraju negativnim izlaznim promenama i obrnuto).

Ulazna otpornost:

$$R_I = \frac{V_G}{R_G + h_{ie}}$$

Izlazna otpornost:

Kako izlaznu otpornost sačinjava samo kolektorski otpornik, jer strujni generator ima teoretski beskonačnu otpornost, izlazna otpornost je definisana kolektorskim otpornikom:

$$R_O = R_C$$

Spoj sa zajedničkim kolektorom:

$$I_B = \frac{V_G - V_O}{R_G + h_{ie}} \quad V_O = (1 + h_{fe}) \cdot I_B \cdot R_E \quad \Rightarrow \quad A = \frac{(1 + h_{fe}) \cdot R_E}{R_G + h_{ie} + (1 + h_{fe}) \cdot R_E}$$

Za tranzistore malih snaga, koji imaju dovoljno veliko pojačanje, ako je R_E dovoljno veliko, sam tranzistorski stepen ima pojačanje približno 1, ne računajući otpor generatora R_G . Ovo je jasnije ako se ima u vidu da je napon na direktno polarizanoj diodi baznog spoja vrlo malo promenljiv, pa su naponi baze i emitera u odnosu na masu isti, što znači da je naizmenični napon na emiteru praktično isti kao napon na bazi, što odgovara jediničnom naponskom pojačanju. Dobra osobina ovog spoja je što je izlazna (emitorska) struja znatno veća od ulazne (bazne) struje, za faktor $(1 + h_{fe})$

Ulazna otpornost:

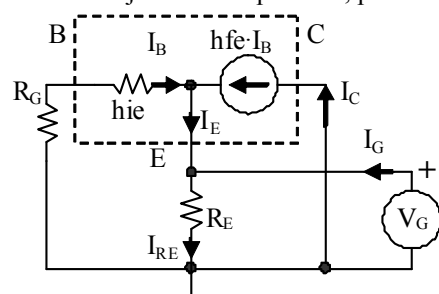
$$I_B = \frac{V_G - (1 + h_{fe}) \cdot I_B \cdot R_E}{R_G + h_{ie}} \quad \Rightarrow \quad R_I = R_G + h_{ie} + (1 + h_{fe}) \cdot R_E$$

Za sam tranzistorski stepen, ne računajući otpornost generatora:

$$R_I = h_{ie} + (1 + h_{fe}) \cdot R_E$$

Ulazna otpornost ovde je vrlo velika, a najviše zavisi od pojačanja i emitorskog otpornika R_E .

Za računanje izlazne otpornosti, potrebno je modifikovati ekvivalentnu šemu:



Kao što se vidi, ulazni generator je zamenjen kratkim spojem a novi generator je priključen na izlaz:

$$I_B = -\frac{V_G}{R_G + h_{ie}} \quad I_E = I_B \cdot (1 + h_{fe}) \quad I_G = I_{RE} - I_E$$

$$I_{RE} = \frac{V_G}{R_E} \quad I_G = \frac{V_G}{R_E} + \frac{V_G \cdot (1 + h_{fe})}{R_G + h_{ie}}$$

$$I_G = V_G \cdot \left(\frac{1}{R_E} + \frac{1 + h_{fe}}{R_G + h_{ie}} \right)$$

$$R_O = \frac{R_E \cdot (R_G + h_{ie})}{R_G + h_{ie} + (1 + h_{fe}) \cdot R_E}$$

Iz izraza za struju generatora I_G vidi se da izlaznu otpornost R_O čini paralelna veza emitorskog otpornika R_E i otpornosti na strani baze umanjene za pojačanje $(1 + h_{fe})$. Ako se otpornost ulaznog generatora R_G zanemari, tada otpornost na strani baze čini samo parametar h_{ie} , koji je vrlo mali. Kada se ova otpornost (h_{ie}) podeli sa pojačanjem i paralelno doda emitorskom otporniku, dobija se izlazna otpornost koja je znatno manja od što znači da je ukupna otpornost ovog stepena jako mala. Kada se ima u vidu velika ulazna otpornost, vidi se da ovaj stepen, kao glavnu ulogu, ima transformaciju i prilagođenje impedanse, sa velike ulazne na malu izlaznu, uz jedinično (približno) pojačanje.

Spoj sa zajedničkom bazom:

Kod ovog spoja ulazni signal se dovodi na emiter, na isti način kao što je signal dovoden na izlaz spoja sa zajedničkim kolektorom radi merenja izlazne otpornosti. Ovo automatski znači da je ulazna otpornost ovog spoja ista kao i izlazna otpornost spoja sa zajedničkim kolektorom, odnosno veoma je mala. Izlazni signal se uzima sa kolektora, zbog čega izlazna otpornost odgovara kolektorskom otporniku (kao kod spoja sa zajedničkim emitorom). Kako je ulazna otpornost daleko manja od emitorskog otpornika, može se reći da je emitorska struja istovremeno i ulazna struja. Sa druge strane, kako su kolektorska i emitorska struja

$$I_C = h_{fe} \cdot I_B \quad I_E = (1 + h_{fe}) \cdot I_B$$

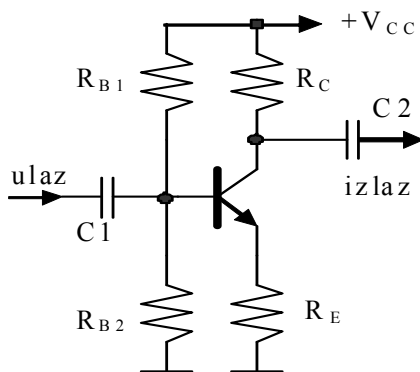
za dovoljno veliko pojačanje može se smatrati da su emitorska i kolektorska struja iste, što znači da je strujno pojačanje ovog stepena približno 1, zbog čega naponsko pojačanje zavisi prvenstveno od odnosa kolektorskog otpornika (tj. izlazne otpornosti) i ulazne otpornosti, što znači da je naponsko pojačanje veliko. Kolo sa malom ulaznom i velikom (tj. srednjom) otpornošću možemo reći da se ponaša kao transformator male na veliku impedansu, što je i prvenstvena namena ovog kola. Na primer, u visokofrekventnoj tehnici, ovakvo kolo se koristi kao ulazni antenski stepen, jer je impedansa antene vrlo mala.

Karakteristike osnovnih spojeva, sumarno:

parametar	zajednički emiter	zajednički kolektor	zajednička baza
Ulazni priključak	baza	baza	emiter
Izlazni priključak	kolektor	emiter	kolektor
Ulazna otpornost	srednja	velika	mala
Izlazna otpornost	srednja	mala	srednja
Naponsko pojačanje	veliko	jedinično	veliko
Strujno pojačanje	veliko	veliko	jedinično
Obrtanje faze	obrće (180 °)	ne obrće (0 °)	ne obrće (0 °)
Gornja granična frekvencija	srednja	srednja	velika
Osnovna namena	univerzalna	transformator impedanse (na pr. ulazni stepen za kristalne gramofonske glave)	transformator impedanse (na pr. antenski ulazni stepen)

3.4. Primeri spojeva sa bipolarnim tranzistorima

Kada je potreban tranzistorski pojačavač sa manjim pojačanjem, ali tako da praktično ne zavisi od pojačanja tranzistora, može se napraviti kolo sa naredne slike:



Slično kolo je već prikazano, ali je tamo postojao i kondenzator vezan paralelno emitorskom otporniku R_E . Ovde tog kondenzatora nema, a osnovna ideja je sledeća:

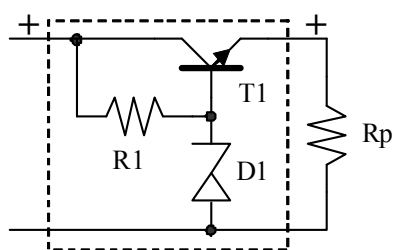
1. Naponsko pojačanje od baze (ulaza) do emitara je jedan (kao kod spoja sa zajedničkim kolektorom).
2. Strujno pojačanje od emitara do kolektora je jedan (kao kod spoja sa zajedničkom bazom), tako da odnosi napona na kolektorskom i emitorskom otporniku zavise samo od vrednosti tih otpornika.

Iz ovoga izlazi da je naponsko pojačanje ovog stepena približno:

$$A \approx -\frac{R_C}{R_E}$$

Vidi se da pojačanje stepena ne zavisi od pojačanja tranzistora, ali samo ako je strujno pojačanje tranzistora dovoljno veliko.

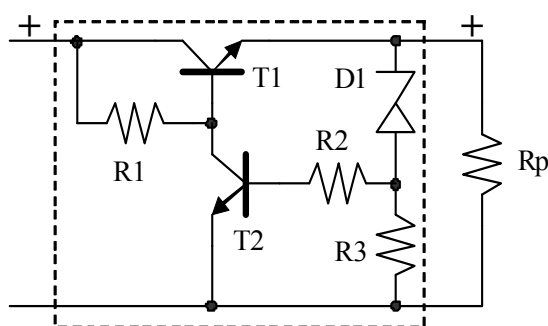
Dodavanjem tranzistora može se poboljšati jednostavan stabilizator sa Zener diodom:



Izlazni napon odgovara naponu Zener diode umanjenim za napon između baze i emitera V_{BE} , koji je približno konstanta (oko 0.7V). Ovakav stabilizator omogućava veće struje potrošača, jer su varijacije struje na Zener diodi manje nego u varijanti bez tranzistora. Pri proračunu ovakvog stabilizatora, treba imati u vidu da se struja otpornika deli na struju diode i baznu struju tranzistora. Ako potrošač povuče veću struju i time počne da smanjuje izlazni napon, pada i napon baze, zbog čega se deo struje iz diode preusmerava u bazu tranzistora, što zaustavlja pad napona i obezbeđuje veću struju potrošaču.

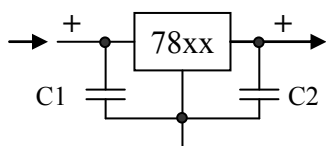
Imajući u vidu pojačanje tranzistora, minimalnu i maksimalnu struju potrošača, dozvoljenu disipaciju diode i varijacije ulaznog napona, može se izračunati vrednost otpornika R1, nakon čega se može proveriti ponašanje u graničnim slučajevima (za minimalnu i maksimalnu struju potrošača i minimalni i maksimalni ulazni napon). Proračun se vrši vrlo slično proračunu za običan stabilizator sa otpornikom i Zener diodom i ovde neće biti predstavljen.

Poboljšanje prethodnog stabilizatora može se izvršiti dodavanjem još jednog tranzistora:

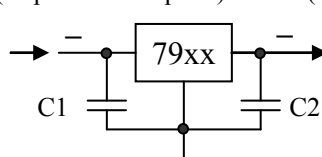


U ovom slučaju, i najmanje povećanje izlaznog napona proizvodi značajno povećanje struje donjeg tranzistora T2, čime se povećava pad napona na otporniku R1, zbog čega pada napon na bazi tranzistora T1, kao i izlazni napon. U slučaju pada izlaznog napona, reakcija deluje na suprotnu stranu, težeći da poveća izlazni napon. Izlazni napon odgovara naponu Zener diode uvećanim za napon baza-emiter tranzistora T2. Ovakav stabilizator ima znatno manje varijacije izlaznog napona nego stabilizator sa prethodne šeme. Takođe, Zener dioda radi sa strujom koja se malo menja, što dodatno smanjuje varijacije izlaznog napona, uz malu disipaciju na diodi.

Stabilizatori napona koji su ovde prikazani nazivaju se linearni stabilizatori, jer tranzistori rade u aktivnom režimu. Postoji veliki broj integrisanih kola koja rade na sličnim principima, a predstavljaju integrisane stabilizatore napona, sa ugrađenim zaštitama od kratkog spoja i pregrevanja, uz veoma stabilan izlazni napon. Primer su stabilizatori iz familija 78xx (za pozitivne napone) i 79xx (za negativne napone):



stabilizator pozitivnog napona

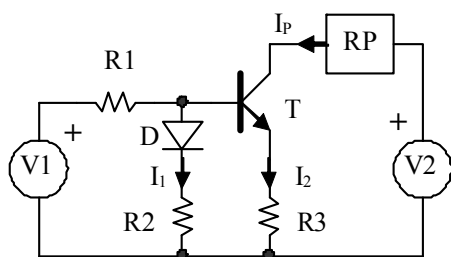


stabilizator negativnog napona

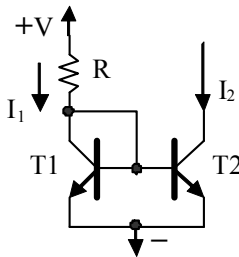
xx:	05 – 5 V
	08 – 8 V
	09 – 9 V
	12 – 12 V
	15 – 15 V
	18 – 18 V
	24 – 24 V

Podrazumeva se da je ulazni napon ispravljen i filtriran odgovarajućim kondenzatorom. Kondenzatori C1 i C2 su keramički, kapaciteta 0.1μF, a imaju za svrhu sprečavanje oscilacija integrisanog stabilizatora. Ovakvi stabilizatori imaju tri priključka i koriste ista kućišta kao i različiti tipovi tranzistora. Osim za različite napone, ovi stabilizatori se proizvode i za različite struje, na primer za 0.1A, 0.5A, 1A, 1.5A, 2A, 3A i 5A.

U elektronici se javlja potreba za strujnim izvorima. Na sledećoj slici su prikazana dva primera strujnih izvora.



Diskretni strujni izvor



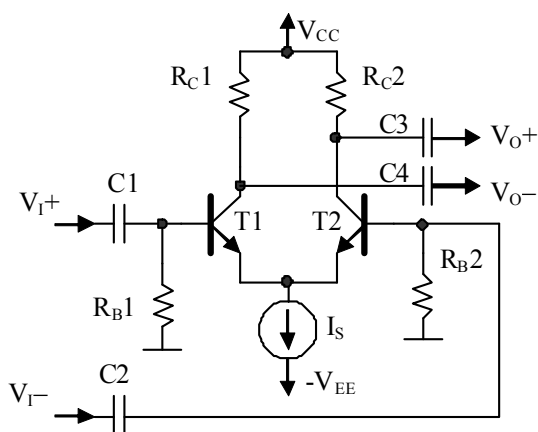
Strujno ogledalo

Diskretni strujni izvor koristi tranzistor kao strujni izvor, pri čemu je struja određena otpornikom R3 i naponom na tom otporniku, jer se za dovoljno veliko pojačanje može smatrati da je emitorska struja jednaka kolektorskoj, što znači da je struja otpornika R3 jednaka struji potrošača (tj. strujnog izvora). Odgovarajući napon na otporniku R3

se postiže podešavanjem napona na otporniku R2, jer su zbog istog pada napona na diodi i bazno-emitorskom spoju tranzistora naponi na R2 i R3 isti. Ovo znači da je uloga diode kompenzacija napona baza-emiter, kako bi se parametri tranzistora mogli isključiti iz proračuna. Podešavanjem otpornika R1 i R2, kao i izvora V1, određuje se napon i na otporniku R3, a time i struja strujnog izvora.

U integrisanim kolima se koristi šema nazvana strujno ogledalo. Ovde se podrazumeva da se u integrisanom kolu mogu napraviti tranzistori praktično istih karakteristika, što znači da ako su naponi V_{BE} oba tranzistora isti, može se smatrati i da su im kolektorske struje iste. Prvi tranzistor T1 je spojen tako da održava odgovarajući napon V_{BE} , jer se radna tačka nalazi u preseku izlaznih karakteristika i bazno-emitorske diodne karakteristike. Za konstantan napon V, ukupna struja T1 ($I_C + I_B$, tj. I_E) određena je otpornikom R. Kolektorska struja T2 jednaka je kolektorskoj struji T1 (zbog čega se i naziva strujno ogledalo), tako da se kolektor T2 ponaša kao strujni izvor, čija se struja podešava otpornikom R.

Na sledećoj slici je prikazan tranzistorski pojačavač koji umesto pojedinačnog signala, pojačava razliku dva signala, zbog čega se i naziva diferencijalni pojačavač. Ulazni signal se priključuje na linije V_{I+} i V_{I-} , a izlazni signal se dobija na kolektorima prvog i drugog tranzistora. Izlazni signali su u protiv-fazi, tako da se i izlazni signal ponaša kao diferencijalni.



Zbir emitorskih struja oba tranzistora je povezan na strujni izvor I_S , zbog čega je zbir obe emitorske struje konstantan, što znači da je (približno) i zbir kolektorskih struja konstantan. Ako se jedna struja poveća, druga se za isti iznos smanji i obrnuto, zbog čega su izlazi uvek u suprotnim fazama. Izlaz označen sa V_{O+} je u fazi sa ulazom označenim sa V_{I+} , dok je izlaz V_{O-} u fazi sa ulazom V_{I-} .

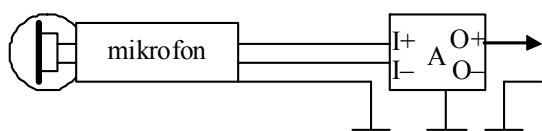
Ograničenje ovog pojačavača je u tome što može da radi samo sa malim ulaznim naponima, da bi se izbeglo

zakočenje, odnosno zasićenje bilo kog od dva tranzistora. Ako postoji potreba, ulazni opseg diferencijalnog napona je moguće povećati proširenjem osnovne šeme diferencijalnog pojačavača dodatnim komponentama.

Diferencijalni pojačavač može da se koristi na više načina:

1. Diferencijalni signal na ulazu i diferencijalni signal na izlazu.
2. Diferencijalni signal na ulazu, ali samo jedan izlazni signal (konvertor dvo-linijskog ulaza na jedno-linijski izlaz).
3. Jedan ulaz (na pr. V_{I-}) spojen na masu, a signal se dovodi na drugi ulaz (na pr. V_{I+}), pri čemu se izlaz koristi diferencijalno. Ovo je konvertor jedno-linijskog ulaza na dvo-linijski (diferencijalni) izlaz.
4. Jedan ulaz (na pr. V_{I-}) spojen na masu, a signal se dovodi na drugi ulaz (na pr. V_{I+}), pri čemu se i na izlazu koristi samo jedan izlaz. Ovakva primena odgovara običnom pojačavaču.

Primer primene diferencijalnog pojačavača prema tački 2 je mikrofonski ulazni stepen:

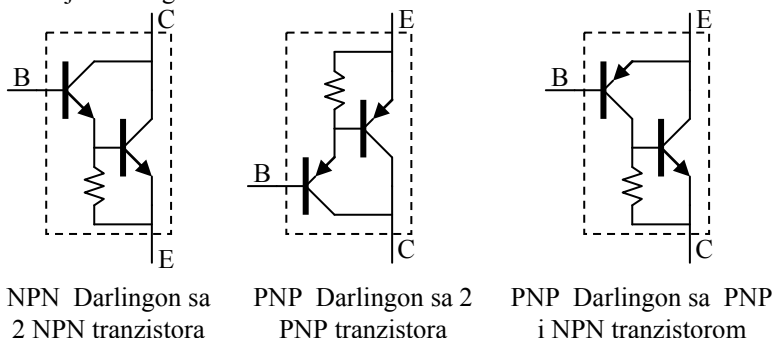


Da bi se izbegao spoljašnji uticaj (brum) na mikrofonski signal, mikrofonska glava je oklopljena metalnim kućištem, sa kojim nije spojena. Do pojačavača se dovode obe linije sa mikrofonske glave, kao i linija koja je spojena sa kućištem mikrofona. Na ulazu u pojačavač,

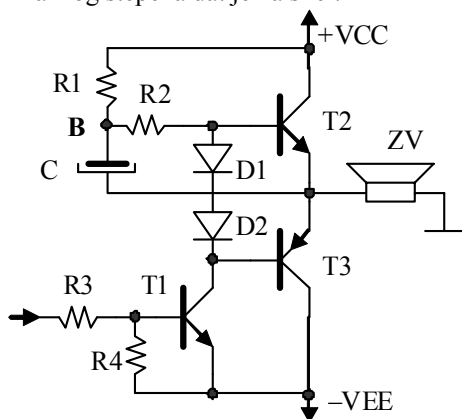
linija vezana za kućište mikrofona spaja se sa masom, a dve linije sa mikrofonske glave se dovode kao diferencijalni signal na ulaze diferencijalnog pojačavača. Ovaj ulazni pojačavač je sa ostalim delom audio sistema vezan jednom linijom (ne mora se koristiti diferencijalni, nego pojedinačni izlaz). Spoljašnje smetnje i brum ne prolaze oklop mikrofona (i oklopljeni kabel), nego se preko veze oklopa provode do mase na ulazu pojačavača. Smetnja koja eventualno ipak prođe do dve linije mikrofonske glave, na obe linije deluje jednako, ali se taj uticaj nema efekta, jer se pojačava samo razlika ulaznih signala, tako da se smetnje ponište.

Ovo poništavanje smetnji ipak nije potpuno, zbog čega se definiše faktor potiskivanja CMRR (*Common Mode Rejection Ratio*), koji predstavlja odnos pojačanja diferencijalnog signala i signala koji se dobije ako se signal dovodi na oba ulaza istovremeno (kratko spojeni ulazi). Što je veći ovaj faktor, to je pojačavač bolji.

Kada su potrebni tranzistori sa većim pojačanjem od uobičajenog, mogu se koristiti spojevi više tranzistora koji se nazivaju Darlingtoni:



Ovakvi spojevi se često koriste kod izlaznih stepena audio pojačavača, jer snažni (izlazni) tranzistori, koji su predviđeni za velike struje, obično imaju malo pojačanje (nekoliko desetina), dok tranzistori za manje struje imaju veće pojačanje (preko 100). Kombinacijom slabijeg i jačeg tranzistora dobija se ekvivalentni tranzistor – Darlington – koji radi sa velikim izlaznim strujama i istovremeno ima dovoljno veliko pojačanje. Primer izlaznog stepena dat je na slici:

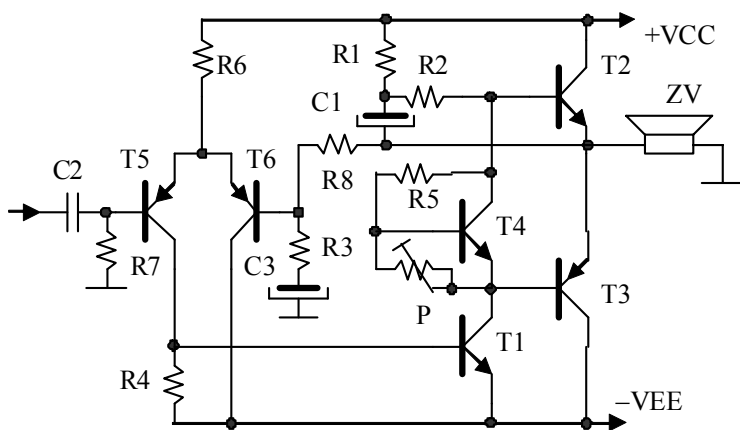


Tranzistori T2 i T3 su Darlingtoni, koji čine snažni izlazni komplementarni par, dok je tranzistor T1 naponski pojačavač, čija je uloga da na bazama izlaznih tranzistora ostvari dovoljno veliki opseg pobudnog napona. Dioda D1 i D2 služe za kompenzaciju B-E spojeva izlaznih tranzistora, jer oba izlazna tranzistora moraju da provode neku malu struju i kada je izlazni napon nula, da bi se sprečilo izobličenje tokom prolaska izlaznog signala kroz nulu.

U odsustvu ulaznog naizmeničnog signala napon na izlazu treba da bude nula, a struja kroz oba izlazna tranzistora se tada naziva mirna struja, koja, kao što je rečeno, mora da postoji, ali i da bude dovoljno mala da se ne bi izlazni stepen nepotrebno zagrevao. Prikazane diode retko kada mogu da ostvare baš

onaj napon na bazama T2 i T3 koji zadovoljava ove uslove. Zbog toga se diode zamenjuju jednim tranzistorom, otpornikom i trimmer-potenciometrom, pomoću koga se mirna struja može podesiti. Istovremeno, ovaj tranzistor može biti mehanički pričvršćen na hladnjak sa izlaznim tranzistorima, tako da povećanje temperature preko ovog tranzistora utiče na smanjenje mirne struje (temperaturna kompenzacija).

Posebno je interesantno kolo R1-R2-C, koje se naziva butstrep kolo. Bez kondenzatora, kada je izlazni napon visok, gornji tranzistor T2 provodi sa velikom strujom, a njegova baza je na naponu bliskom naponu VCC. Iako je tada potrebna i najveća moguća struja baze ovog tranzistora, zbog malog pada napona na otpornicima R1 i R2, kroz njih protiče najmanja moguća struja, što nije dovoljno za pobudu T2. Kada se u kolo doda i kondenzatorom C, on će se najviše napuniti kada izlazni napon bude najmanji. Nakon toga, kada izlazni napon raste, preko kondenzatora se povećava i napon tačke B, a bazna struja za T2 se dobija iz kondenzatora.

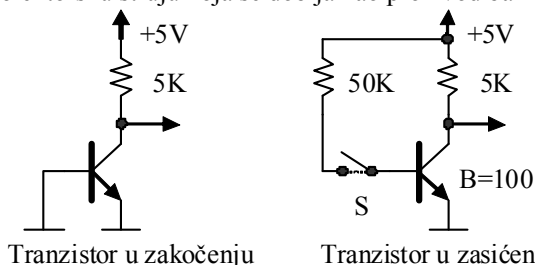


Nešto kompletnija šema audio pojačavača obuhvata i ulazni stepen koji je realizovan kao diferencijalni pojačavač. Tranzistori T2 i T3 su darlingtoni koji čine izlazni stepen. T4 obezbeđuje podešavanje mirne struje i temperaturnu kompenzaciju. Dodatak u ovoj šemi je ulazni stepen u formi diferencijalnog pojačavača sa tranzistorima T5 i T6. Otpornik R7 obezbeđuje jednosmerni napon na emiterima T5 i T6, a time i konstantan napon na otporniku R6, koji se zbog toga ponaša kao strujni generator.

Diferencijalni par meri razliku između ulaznog i izlaznog napona, a u sprezi sa izlaznim stepenom naponi na bazama T5 i T6 se održavaju jednakim. Razlog ovoga je u tome što svaka pozitivna promena na bazi T6 izaziva pozitivne promene na bazi T1, a time i negativne promene na izlazu. Kako su izlaz i baza T6 spojeni (direktno za jednosmerni signal, preko razdelnika za naizmenični), postiže se ravnotežno stanje tako su naponi na bazama T5 i T6 praktično jednaki. Za jednosmerni režim, baza T6 je preko otpornika R8 vezana na izlaz. Kako je baza T5 preko R7 vezana na masu, diferencijalni pojačavač će preko T1 forsirati nulti jednosmerni izlazni napon. Za naizmenični signal, napon se na bazu T6 dovodi sa izlaza, preko razdelnika R8-R3 (kondenzator C3 se ponaša kao kratak spoj) i manji je od izlaznog napona za faktor $R3/(R8+R3)$. Kako napon baze T6 odgovara ulaznom naponu, to znači da je izlazni napon veći od napona na bazi T6 (odnosno ulaznog napona) za recipročnu vrednost ovog faktora, tj. ukupno naizmenično naponsko pojačanje je $1+R8/R3$.

3.5. Tranzistor kao prekidač

Osim aktivnog režima rada, tranzistor može da se ponaša i kao prekidač, ukoliko se nalazi u zakočenom (neprovodnom) stanju ili stanju zasićenja. Tranzistor je zakočen ako je napon baza-emiter manji od praga provođenja (oko 0.5V), dok je zasićenje stanje kada spoljašnje kolo ne može da obezbedi kolektorsku struju koja se dobija kao proizvod bazne struje i pojačanja:



Tranzistor u zakočenju

Tranzistor u zasićenju

U ovom primeru, tranzistor je u zakočenju jer je napon $V_{BE} = 0$, odnosno manji je od praga provođenja. U drugom slučaju, pri uključenom prekidaču, izračunata kolektorska struja iznosi

$$I_C = B \cdot I_B = 100 \cdot 0.1 \text{ mA} = 10 \text{ mA}$$

dok je maksimalna moguća kolektorska struja

$$I_{C\text{MAX}} = \frac{V_{CC}}{R_C} = \frac{5\text{V}}{5\text{K}} = 1 \text{ mA}$$

Očigledno je da kolo ne može da obezbedi potrebnih 10mA kolektorske struje, zbog čega je tranzistor u zasićenju i napon na njegovom kolektoru (V_{CE}) je jako mali (nekoliko desetina mV kod tranzistora male snage). Tranzistor u zasićenju ne može brzo da se isključi, jer su u bazi nagomilani svi oni elektroni koji bi inače prešli u kolektor, ali zbog ograničenja kola to se nije dogodilo. Zbog toga se u ovom slučaju bazno-emitorski spoj ponaša kao napunjeni kondenzator, kome je potrebno izvesno vreme da se isprazni. Kada se struja baze prekine isključenjem prekidača S, elektroni nagomilani u bazi izlaze kroz kolektor sve dok svi elektroni koji su višak ne napuste bazu. Čak i ako se baza tranzistora u zasićenju kratko spoji sa masom (na primer prekidačem S sa slike), postoji otpor tela baze kroz koji se naelektrisanje iz baze prazni, za šta takođe treba vremena. Za vreme dok naelektrisanje postoji u bazi, provodi i kolektorski spoj, do trenutka kada tranzistor izađe iz zasićenja i kada kolektorska struja vrlo brzo pada na nulu. Napon između kolektora i emitera se naziva napon zasićenja V_{CES} , dok se napon baza-emiter u stanju zasićenja označava sa V_{BES} .

Odnos kolektorske struje izračunate kao $B \cdot I_B$ i stvarne kolektorske struje određuje dubinu zasićenja. Što je tranzistor dublje u zasićenju, manji je napon kolektor-emiter, ali je sporije isključenje. Dublje zasićenje više odgovara situaciji kada tranzistor retko menja stanje, jer se najveći deo snage na tranzistoru tada troši baš u zasićenju (dublje zasićenje => manja disipacija). Nasuprot toga, rad tranzistora na granici zasićenja (kada je $B \cdot I_B$ jednako ili malo veće od I_C) više odgovara većim frekvencijama prekidanja, jer je tada važno da se tranzistor što brže isključi, imajući u vidu da se najveća snaga troši baš u toku promene stanja. Naime, disipacija tranzistora sa prethodne slike je data izrazom

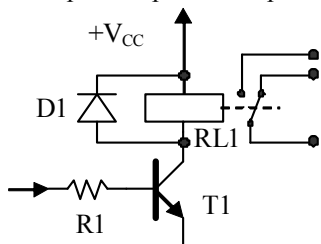
$$P = V_{CE} \cdot I_C = V_{CE} \cdot \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C} = \frac{V_{CC}}{R_C} \cdot V_{CE} - \frac{1}{R_C} \cdot V_{CE}^2$$

Kada je disipacija najveća, prvi izvod ovog izraza je jednak nuli:

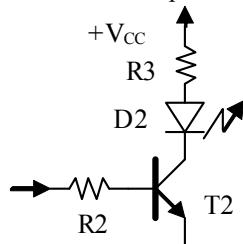
$$\frac{dP}{dI_C} = \frac{V_{CC}}{R_C} - \frac{2}{R_C} \cdot V_{CE} = 0 \Rightarrow V_{CE} = \frac{V_{CC}}{2}$$

Izraz za snagu predstavlja obrnutu kvadratnu jednačinu, što znači da je najmanja disipacija kada je tranzistor u zakočenju ili zasićenju, a najveća za vreme promene stanja, kada je kolektorski napon oko polovine napona napajanja.

Neki primeri primene bipolarnog tranzistora kao prekidača:



Uključenje/isključenje relea

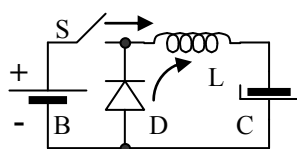


Uključenje/isključenje LED

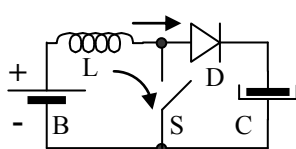
U prvom primeru tranzistorom se uključuje rele RL1. Osim tranzistora kao prekidača, na slici se vidi i dioda D1 čija je svrha zaštita tranzistora od prenapona. Pri isključivanju relea, kako je rele induktivnog karaktera (kalem), struja kroz njega ne može trenutno da se promeni. Kako je pre isključenja struja tekla od napajanja V_{CC} preko tranzistora do mase, nakon isključenja tranzistora indukuje se napon na releu sa težnjom da se održi

postojeća struja. Zbog toga se napon kolektora povećava, sve dok se dioda D1 ne polarise direktno i preuzme struju relea. Zahvaljujući diodi, napon na kolektoru može da poraste najviše do napona V_{CC} uvećanog za napon direktno polarisane diode V_D (oko 0.7V), čime je tranzistor zaštićen od prenapona. Uobičajeno se ova dioda naziva zamajna. U drugom primeru, ove (zamajne) diode nema, jer potrošač, LED sa otpornikom, nema induktivni karakter.

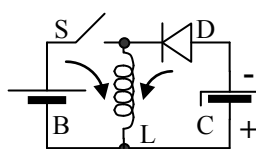
Tranzistori u prekidačkom režimu rada se koriste u digitalnim kolima, jer su ovde i potrebna dva stanja, što odgovara stanjima tranzistora zasićenje/zakočenje. S obzirom na veliku primenu tranzistora u prekidačkom režimu rada, mnogi tranzistori se namenski pravlje za ove svrhe, a nazivaju se prekidački. Pomoću prekidačkih tranzistora moguće je napraviti i izvore napajanja, koji se takođe nazivaju prekidački. Ovakvim izvorima moguće je od jednog ulaznog napona napraviti izlazni veći (*Step-Up*) ili izlazni manji (*Step-Down*) napon, kao i napon suprotnog polariteta:



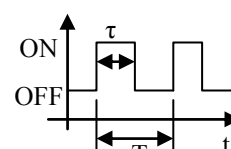
a) Snižavanje napona



b) Povećanje napona



c) Inverzija napona



d) Faktor is pune

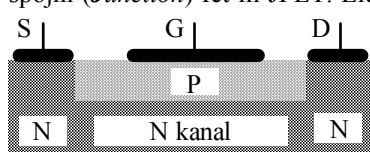
U sva tri slučaja (*a*, *b* i *c*) prekidač S se naizmenično uključuje i isključuje. Odnos trajanja uključenog stanja τ i periode T se naziva faktor is pune (τ/T , prikazano na slici pod *d*). Veći faktor is pune znači i veću srednju vrednost struje. Dok je S uključen, kalem L je priključen na bateriju i struja u njemu raste (struja kalema je integral napona kalema). Kada struja dovoljno naraste, prekidač S se isključuje, a struja kalema se preusmerava kroz diodu D. Tokom ovog perioda, struja kalema se smanjuje, jer se energija kalema prebacuje u kondenzator C. Postupak se ponavlja, a dodatnim kolima se prati izlazni napon (na kondenzatoru) i po potrebi koriguje faktor is pune, čime se dobija stabilisan izlazni napon.

Umesto kalema može se koristiti i transformator koji se ponaša kao kalem, pri čemu je izlazni deo galvanski razdvojen od ulaznog (ne postoji direktna žična veza). Ovo je važno kada se uređaj napaja iz mreže (220V), jer je galvanska razdvojenost uređaja i mreže neophodna zbog sigurnosti korisnika.

Prekidački izvori napajanja rada na frekvencijama znatno višim od standardnih 50 Hz mrežnog napajanja, što za posledicu ima i mnogo manje dimenzije kalema (i transformatora), jer se na višim frekvencijama ista struja postiže na manjim induktivnostima. Manje dimenzije kalema odnosno transformatora znači znatno manji i lakši izvor napajanja, ali i mnogo veću efikasnost (manje gubitke).

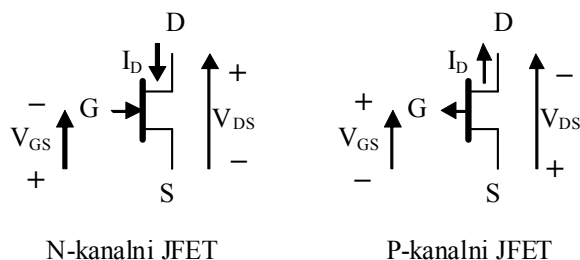
3.6. Tranzistori sa efektom polja

Tranzistori sa efektom polja – FET (*Field Effect Transistor*) baziraju na činjenici da električno polje utiče na kretanje naelektrisanja. Ako N i P tip poluprovodnika formiraju strukturu kao na slici, dobija se spojini (*Junction*) fet ili JFET. Elektrode između kojih teče električna struja su drejn (D – *Drain*) i sors (S – *Source*).



Ove elektrode spojene su N tipom poluprovodnika (N kanal) kroz koji postoji kretanje naelektrisanja (elektrona) ukoliko se između D i S dovede napon (D se spaja na plus, a S na minus). Treća elektroda je gej (G – *Gate*). Ako se ova elektroda ostavi nepriključena, nema prepreke za protok elektrona i struja između drejna i sorsa protiče.

Međutim, ako se na gejt dovede negativan napon u odnosu na sors, u poluprovodniku P se pojavljuje negativno naelektrisanje koje stvara električno polje. Ovo polje odbija elektrone i N kanal se efektivno sužava, čime se povećava otpornost kanala, što dovodi do smanjenja električne struje između drejna i sorsa. Negativan napon gejta u odnosu na sors znači da je P-N spoj inverzno polarisan, odnosno da kroz gejt nema



N-kanalni JFET

P-kanalni JFET

struje (ili je zanemarljivo mala). Način rada ovog tipa tranzistora zahteva da se P-N spoj gejta nikada ne polariše direktno, što znači da je gejt uvek negativniji od sorsa i drejna. Napon gejta u odnosu na sors se označava V_{GS} , napon drejna u odnosu na sors sa V_{DS} , a struja drejna I_D . Kako kroz gejt nema struje, struja sorsa je jednaka struji gejta.

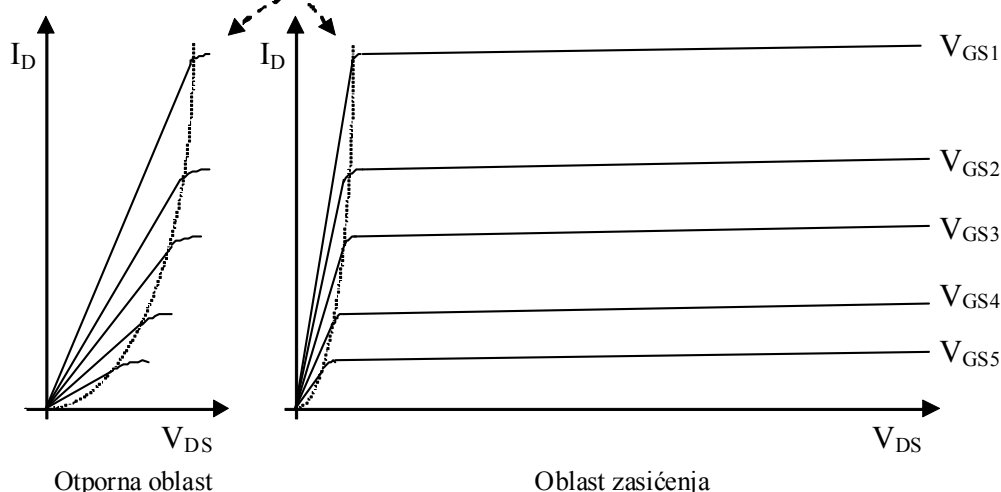
Ako je gejt N tipa, a sors, drejn i kanal P tipa, dobija se P-kanalni JFET, za koji važi isto što i za

N-kanalni JFET, samo što su polariteti obrnuti.

Osnovni parametri feta su:

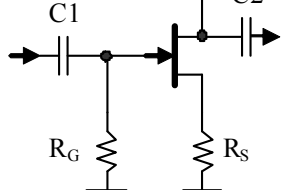
- prenosna provodnost (transkonduktansa), koja je odnos struje drejna i napona gejta: $g_m = \frac{I_D}{V_{GS}}$,
- dinamička otpornost drejna r_d ,
- prekidni napon gejta V_P (ili V_T), napon između gejta i sorsa pri kome struja drejna potpuno prestaje

Kao i kod bipolarnog tranzistora, i za fet se mogu nacrtati izlazne karakteristike, koje određuju zavisnost struje drejna (I_D) od napona između drejna i sorsa (V_{DS}), a za različite napone između gejta i sorsa (V_{GS}):



Levi deo slike predstavlja uvećan deo grafika koji odgovara malim naponima V_{DS} . Vidi se da karakteristika menja nagib zavisno od napona V_{GS} , a kako nagib odgovara karakteristici otpora, to znači da se u ovom delu fet ponaša kao naponski kontrolisani otpornik, zbog čega se ova oblast zove otporna oblast. Često se ova oblast naziva i linearna, odnosno triodna. Na glavnoj slici se vidi i oblast zasićenja, kod koje struja I_D vrlo malo zavisi od napona V_{DS} , a značajno zavisi od napona gejta V_{GS} . Oblast zasićenja feta odgovara aktivnom režimu kod bipolarnog tranzistora.

Kako najmanji napon V_{GS} odgovara najvećoj struji I_D , na dijagramu V_{GS1} odgovara najmanjem, a V_{GS5} najvećem naponu (negativnom za N-kanalni fet). Kako se povećanjem negativnog napona V_{GS} (negativan za N-kanalni, a pozitivan za P-kanalni fet) smanjuje struja I_D , napon V_{GS} pri kome dolazi do prekida struje I_D naziva se prekidni napon V_T ili V_P .



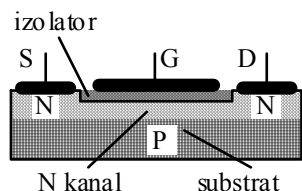
Spojni fetovi (JFET) se najčešće prave simetrični, što znači da je moguće zameniti sors i drejn bez značajnih promena karakteristika.

Na slici je prikazan osnovni način polarizacije N-kanalnog spojnog feta. Kako su gejt preko otpornika R_G , a sors preko otpornika R_S vezani na masu, struja drejna (i sorsa) na otporniku R_S stvara napon tako da je sors pozitivniji od gejta, što znači da je napon V_{GS} negativan i odgovara naponu na otporniku R_S . Ako se

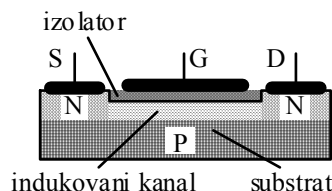
struja drejna I_D poveća, povećava se i ovaj napon, što dovodi do smanjenja struje I_D (veći negativan napon V_{GS} odgovara manjoj struji drejna).

Kako kod spojnih fetova struja drejna (i kanal između sorsa i drejna) postoji ako je napon $V_{GS}=0$, za ovaj tip fetova se kaže da su sa ugrađenim kanalom.

Znatno češća vrsta fetova su MOSFET-ovi, često nazivani i samo MOS (*Metal Oxide Semiconductor*) tranzistori. Ovi tranzistori takođe koriste efekat polja, ali im je gejst izolovan:



Mosfet sa ugrađenim kanalom

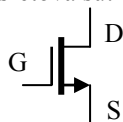


Mosfet sa indukovanim kanalom

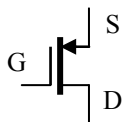
Na slici su prikazane dve vrste mosfetova, sa ugrađenim i sa indukovanim kanalom, u oba slučaja N tipa (N-kanalni mosfet). Mosfet sa ugrađenim kanalom je vrlo sličan spojnom fetu (JFET), ali ne sa gejtom formiranim P-N spojem, nego pomoću izolovanog kontakta. Ova razlika znači da kroz

gejt ne može teći struja, čak i ako je gejst polarisan pozitivno u odnosu na sors. Mosfet sa indukovanim kanalom podrazumeva da kanal ne postoji, odnosno načinjen je od materijala kao i osnova, tj. substrat (P tip poluprovodnika), tako da je potrebno dovesti pozitivan napon na gejst (u odnosu na sors), da bi se formiralo električno polje koje privlačenjem elektrona formira kanal u blizini gejta, odnosno izolatora.

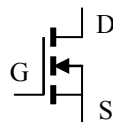
Simboli mosfetova su:



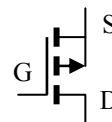
N-kanalni mosfet sa ugrađenim kanalom



P-kanalni mosfet sa ugrađenim kanalom

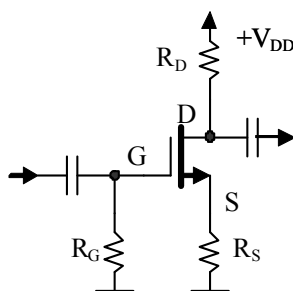


N-kanalni mosfet sa indukovanim kanalom

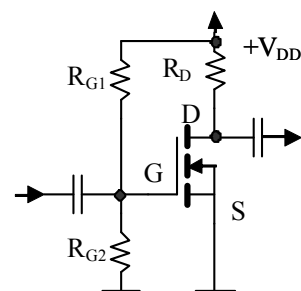


P-kanalni mosfet sa indukovanim kanalom

Za mosfetove sa ugrađenim kanalom važe isti parametri kao i za spojne fetove. Mosfetovi sa indukovanim kanalom razlikuju se samo po tome što je između gejta i sorsa potrebno dovesti pozitivan (za N-kanalne), odnosno negativan (za P-kanalne) napon, da bi struja počela da teče. Ovo znači da je kod ovih tranzistora radni polaritet napona V_{GS} isti kao i napona V_{DS} (kod spojnih fetova i mosfetova sa ugrađenim kanalom ovi polariteti su različiti). Sledeća slika prikazuje način polarizacije N-kanalnih mosfetova, sa ugrađenim i indukovanim kanalom:



Polarizacija N-kanalnog mosfeta sa ugrađenim kanalom

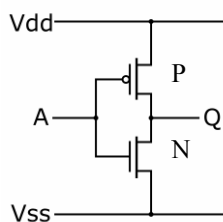


Polarizacija N-kanalnog mosfeta sa indukovanim kanalom

Mosfet sa ugrađenim kanalom ima isti način polarizacije kao i JFET, dok polarizacija mosfeta sa indukovanim kanalom jako liči na polarizaciju bipolarnog tranzistora.

Zbog pogodnog načina polarizacije, mosfetovi sa indukovanim kanalom su veoma rasprostranjeni. Kako nema struje gejta i kada tranzistor provodi (za razliku od bazne struje bipolarnih tranzistora), današnja

integrirana kola visoke integracije (sa velikim brojem tranzistora), kao što su mikroprocesori i memorije, praktično su nezamislivi bez ovih tranzistora.



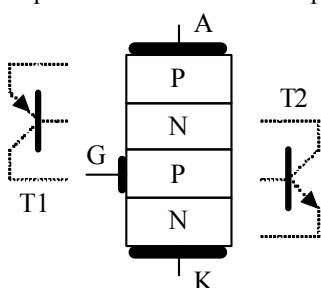
Dva mosfeta sa indukovanim kanalom, jedan N i jedan P kanalni, čine komplementarni par. Ovakav par, prikazan na slici (digitalni invertor, sa pojednostavljenim simbolima mosfetova), predstavlja osnovu u današnjim složenim digitalnim kolima. Tehnologija bazirana na ovakvim parovima se naziva CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*). Invertor sa slike radi tako što je uvek uključen samo jedan tranzistor, zavisno od ulaznog napona koji je nizak ili visok. Kako kroz gejtove nema struje, a samo jedan tranzistor provodi, ovo kolo praktično ne troši nikakvu energiju, osim u trenucima promene stanja (promena ulaznog

nivoa). Najveća potrošnja energije nastaje pri brzim promenama, jer se izolovani gejt ponaša kapacitivno (gejt i substrat čine ploče kondenzatora), što znači da postoje struje punjenja i pražnjenja kapacitivnosti gejta. Uz to, dodatna potrošnja nastaje usled kratkotrajnog provođenja oba mosfeta tokom promene napona.

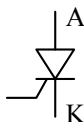
Slično bipolarnim tranzistorima, i mosfetovi se prave i specijalizovano za prekidački način rada. Snažni prekidački mosfetovi, u uključenom stanju, imaju jako mali otpor drejn-sors (tzv. otpor drejna), zbog čega su posebno pogodni u prekidačkom režimu rada. Kako fetovi imaju negativnu temperaturnu karakteristiku (zagrevanjem raste otpor kanala, zbog čega se smanjuje struja, a time i temperatura), mosfetovi se mogu direktno paralelno spojiti, jer će hladniji tranzistor preuzeti deo struje zagrejanog, čime se dobija vrlo ujednačena raspodela struje po pojedinačnim tranzistorima. Zahvaljujući ovoj osobini, direktnim paralelnim spajanjem većeg broja mosfetova unutar jednog kućišta dobijaju se vrlo snažni mosfetovi, koji se koriste u pretežno u prekidačkim izvorima napajanja (na primer napajanje za PC računar).

4. Tiristori i triaci

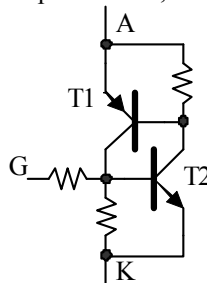
Tiristori i triaci su osnovne poluprovodničke komponente za prekidački način rada pri velikim strujama i naponima. Ako se na NPN spoj doda još jedan P tip poluprovodnika, dobija se komponenta nazvana tiristor.



konstrukcija tiristora



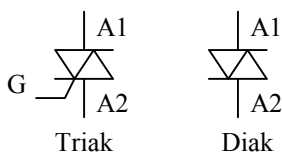
simbol tiristora



ekvivalentna šema

Ovakav spoj se ponaša vrlo slično spoju dva bipolarna tranzistora (komplementarni prekidač), jednog NPN (T2) i jednog PNP (T1), kao na ekvivalentnoj šemi. Priključci tiristora su anoda (A), katoda (K) i gejt (G). Tiristor može biti isključen i tada između anode i katode ne provodi ni u jednom smeru. Ako je uključen tada se ponaša kao dioda (prema

simbolu), odnosno provodi od anode prema katodi, ali ne i obrnuto. Uključenje tiristora se vrši preko gejta (G). Kada se na gejt dovede napon (u odnosu na katodu), pojavi se bazna struja tranzistora T2, koji počinje da provodi. Kolektorska struja T2 (pojačana bazna struja) prolazi kroz bazu T1 i izaziva odgovarajuću struju kolektora T1. Ova struja dodatno pojačava baznu struju T2, tako da ovaj ciklus dovodi do potpunog provođenja i zasićenja oba tranzistora, koji međusobno jedan drugog drže u zasićenju. Pri tome, kada počne provođenje, struja gejta više nije bitna za rad, što znači da nije moguće tiristor isključiti preko gejta, zbog čega se tiristor ne primenjuje u jednosmernim kolima. Jedini način da se tiristor isključi je prekidanje struje (anodne), zbog čega se tiristor primenjuje u kolima sa naizmeničnom strujom, jer kada struja tiristora padne na nulu, prestaju i bazne struje, zbog čega se tiristor isključuje.

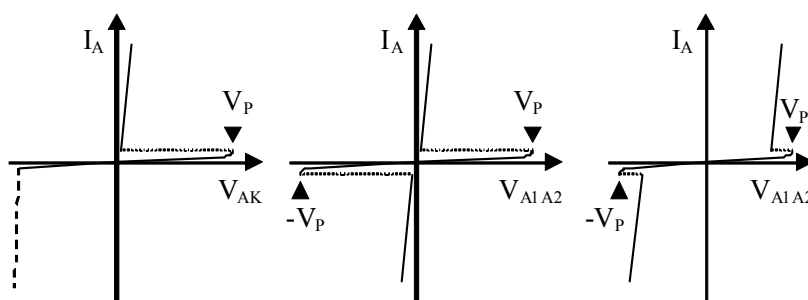


Triak

Diac

Za razliku od tiristora, triak može da provodi u oba smera, zbog čega se dve glavne elektrode nazivaju A1 i A2. Kada provode, na tiristoru i triaku napon je vrlo mali i reda veličine jedan ili više volti. Obe ove komponente se prave za struje i napone od najmanjih (struje ispod 1A, napon ispod 100 V), pa do 1000 i više ampera, kao i preko 1000 V.

Treća komponenta iz ove grupe je diak. Diak ima samo dva priključka, a odgovara triaku bez gejta, sa probojnim naponom najčešće oko 30V. Na narednoj slici su prikazane izlazne karakteristike za sve tri komponente (zavisnost struje od napona).

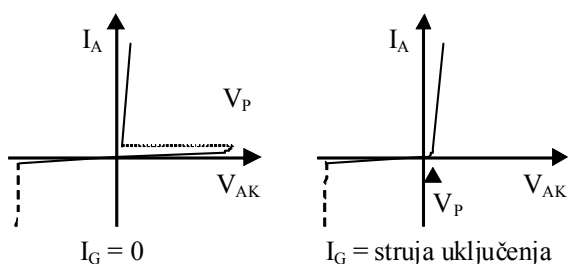


Karakteristika tiristora

Karakteristika triaka

Karakteristika diaka

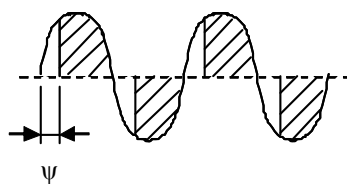
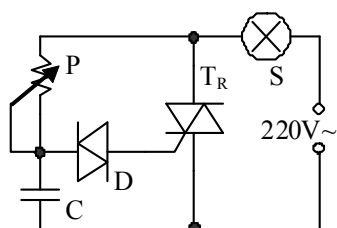
Za tiristor i triak ovde je pretpostavljeno da nema struje gejta, a sa V_P je označen probojni napon uključenja u odsustvu struje gejta. Ako se kroz gejt propusti struja, probojni napon se naglo snižava i komponenta se uključuje i pri vrlo malom naponu.



Uključenje tiristora preko gejta detaljnije je prikazano na narednoj slici. Ovde se vidi da sa odgovarajućom strujom gejta karakteristika tiristora jako liči na karakteristiku diode.

Naravno, kod triaka i diaka karakteristika u trećem kvadrantu je ista kao i u prvom (samo rotirana za 180 stepeni).

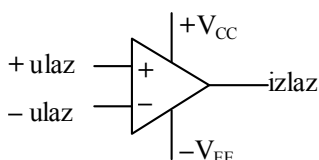
Vrlo česta primena triaka je fazna kontrola struje, na primer za regulatore osvetljenja sijalica. Otpornost



potencijometra P i kondenzator C određuju brzinu porasta napona na kondenzatoru. Kada ovaj napon dostigne probojni napon diaka D (oko 30V), diak provede i izazove strujni impuls na gejt triaka. Ovaj impuls uključi triak, koji se isključuje tek kada struja prođe kroz nulu (tj. na kraju poluperiode sinusnog talasnog oblika). Trenutak uključenja triaka odgovara uglu ψ , a ovaj ugao se može podešavati na prikazani način. Šrafirana površina na grafiku odgovara protoku struje kroz triak i sijalicu, a na osnovu ugla uključenja mogu se izračunati ekvivalentna srednja i efektivna struja sijalice. Treba napomenuti da je ovo pojednostavljena varijanta kola, čija je svrha prezentacija načina upravljanja sijalicom.

5. Operacioni pojačavači

Operacioni pojačavači su složene elektronske komponente koje pojačavaju ulazni diferencijalni signal, odnosno razliku dva ulazna napona. Simbol operacionog pojačavača prikazan je na slici. Za napajanje



se koriste dva priključka, pozitivan V_{CC} i negativan V_{EE} . Za ova dva napona najvažnije je da je njihova razlika u predviđenim granicama. Dva najčešća načina spajanja su da: oba napona imaju iste vrednosti, ali suprotan polaritet; V_{EE} je vezan na masu, a plus se dovodi na V_{CC} . Neke standardne vrednosti za razliku $V_{CC}-V_{EE}$ su od 5 do 30 V. Razlika ulaznih napona takođe ima svoje granične vrednosti, a sve bitne parametre definiše proizvođač.

Operacioni pojačavač ima nekoliko karakteristika koje su bitne za njegov rad. Neke od njih su:

- Pojačanje: Teoretski beskonačno, a realno od nekoliko desetina hiljada do nekoliko stotina hiljada. Ovde se podrazumeva interno pojačanje, kada pojačavač nije vezan u kolo.
- Izlazni otpor: Teoretski nula, realno dovoljno mali da se može zanemariti.
- Ulazni otpor: Teoretski beskonačan, a realno reda $M\Omega$ ili više desetina/stotina $M\Omega$.
- Ulazna struja: Teoretski nula, a realno zanemarljivo mala.
- Ulazni napon (razlika) za nulti izlazni napon: Teoretski nula, realno maksimalno nekoliko desetina mV.

Dodatne karakteristike o kojima treba voditi računa su:

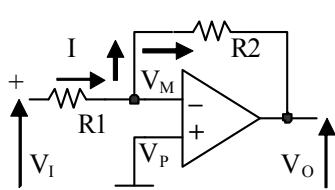
- Opseg izlaznog napona je najčešće manji od opsega napajanja. Kod standardnih operacionih pojačavača najveći izlazni napon je manji od V_{CC} za 1 do 2.5V, dok je najmanji izlazni napon veći od $-V_{EE}$ za sličnu vrednost. Naravno, postoje i operacioni pojačavači kod kojih najniži, najviši, ili čak oba izlazna napona mogu dostići napon napajanja, sa razlikom ispod 100mV.
- Mnogi pojačavači imaju interno ograničenje maksimalne izlazne struje. Za one koji to nemaju, mora se voditi računa da se ne prekorači dozvoljena vrednost.
- Propusni opseg (gornja granična frekvencija), koja se definiše kao proizvod $A \cdot B$, gde je A pojačanje u kolu (ne interno pojačanje), a B je propusni opseg.

Zahvaljujući ovim osobinama, pomoću operacionih pojačavača lako se mogu napraviti najrazličitija elektronska kola. Neka od njih su opisana u daljem tekstu.

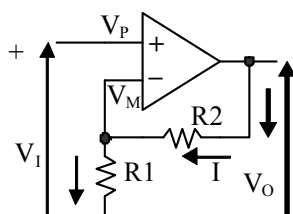
Napomena: Plus ispred V_{CC} i minus ispred V_{EE} ne označavaju stvarni polaritet napajanja, nego samo označavaju da je V_{CC} uvek veće od V_{EE} .

5.1. Osnovna primena operacionih pojačavača

Operacioni pojačavači se najčešće koriste kao linearni pojačavači u dve osnovne konfiguracije, invertujuća i neinvertujuća, kao što je prikazano na slici. Radi razumljivije slike, napajanje nije nacrtano, a



Invertujući pojačavač



Neinvertujući pojačavač

ovde se podrazumeva da su V_{CC} i V_{EE} iste vrednosti, ali suprotnog polariteta (na primer, $V_{CC}=+15V$, $V_{EE}=-15V$).

U proračunu ovih kola polazi se od pretpostavke da je izlazni napon unutar raspoloživog opsega. Izlazni napon se dobija kao

$$V_O = A_I \cdot (V_P - V_M)$$

Ovde je A_I interno pojačanje, V_O izlazni napon, V_P napon na pozitivnom, a V_M na negativnom ulazu. Iz ovoga se može videti i kolika treba da bude razlika ulaznih napona da bi se dobio izračunati izlazni napon:

$V_P - V_M = \frac{V_O}{A_I} \approx 0$ Kako je interno pojačanje A_I teoretski beskonačno, može se zaključiti da je razlika ulaznih napona nula, odnosno da je $V_P = V_M$. Zbog toga se, u standardnim proračunima kola sa operacionim pojačavačima, uvek smatra da su ulazni naponi (pozitivan i negativan ulaz) jednaki, sa rezervom da to važi samo u linearnom režimu rada. Iz ovoga se može izvući još jedan zaključak: Ako ulazni naponi nisu isti, izlaz je ili maksimalno pozitivan (za $V_P > V_M$), ili maksimalno negativan (za $V_P < V_M$).

Napomena: Maksimalno pozitivan izlazni napon podrazumeva najbliže moguće naponu V_{CC} , dok maksimalno negativan podrazumeva najbliže moguće naponu V_{EE} .

Znajući ovo, može se preći na proračun invertujućeg pojačavača (tj. invertujuće konfiguracije). Kako je V_P na masi, to znači da je i V_M na masi. Iz ovoga sledi ulazna struja I :

$I = \frac{V_I}{R1}$ Zbog beskonačne (teoretski) otpornosti ulaza, ova struja nastavlja prema otporniku $R2$. Pošto je jedan kraj otpornika vezan na tačku V_M , koja je na nultom naponu, to znači da je izlazni napon isti kao i napon na otporniku, ali sa suprotnim predznakom (struja teče od tačke V_M do izlaza):

$$V_O = -I \cdot R2 = -\frac{R2}{R1} \cdot V_I$$

Pojačanje je definisano odnosom izlaznog i ulaznog napona, što znači da je:

$$A = -\frac{R2}{R1} \quad \text{Ovo je standardni izraz za pojačanje pojačavača sa operacionim pojačavačem u invertujućoj konfiguraciji.}$$

Za neinvertujući pojačavač (tj. neinvertujuću konfiguraciju) način proračuna je vrlo sličan. Naime, kako su ulazni naponi V_P i V_M isti, struja kroz otpornik $R1$ je

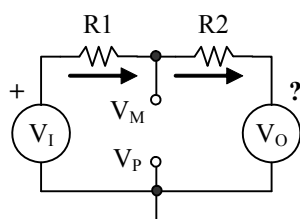
$I = \frac{V_I}{R1}$ Ova struja protiče i kroz otpornik $R2$, jer je ulazna otpornost operacionog pojačavača beskonačna, tako da je izlazni napon zbir napona na oba otpornika. Kako kroz njih teče ista struja, može se izračunati izlazni napon kao

$$V_O = I \cdot (R1 + R2) = \frac{R1 + R2}{R1} \cdot V_I$$

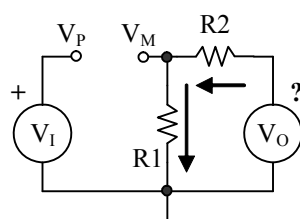
Iz ovoga sledi i pojačanje:

$$A = \frac{R1 + R2}{R1} = 1 + \frac{R2}{R1} \quad \text{što je standardni izraz za pojačanje pojačavača sa operacionim pojačavačem u neinvertujućoj konfiguraciji.}$$

Na osnovu ova dva izraza, lako se može izračunati pojačanje i u složenijim kolima sa operacionim pojačavačima.



Invertujuća konfiguracija



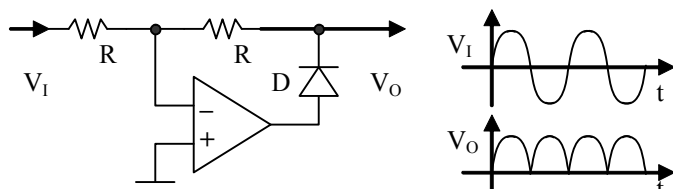
Neinvertujuća konfiguracija

se računa je izlazni napon V_O (određuje se vrednost i smer), a na osnovu njega se dobija i pojačanje celog kola.

Računanje pojačanja za prikazane konfiguracije mogu se izvesti i pomoću ekvivalentne šeme. Ovakva šema uzima u obzir osnovne osobine operacionih pojačavača, koji se u ekvivalentnoj šemi ne crtaju, zbog čega je šema jednostavnija i preglednija, pa je lakše i postaviti jednačine. Kao i osnovna postavka da je $V_P = V_M$, i sam proračun teče na isti način kao što je već pokazano: Prva veličina koja

5.2. Idealni ispravljač

Kod običnog ispravljačkog kola, izlazni napon je uvek manji od ulaznog zbog pada napona na diodi (ili diodama). Uz pomoć operacionog pojačavača, može se napraviti ispravljač koji idealno ispravlja:



negativna reakcija koja održava linearni režim rada. Ako je ulazni napon negativan, smer struje odgovara direktnoj polarizaciji diode, što znači da su ulazna i izlazna struja (koja prolazi i kroz diodu) istog intenziteta. Uzevši u obzir smer struje, izlazni napon je suprotnog smeru, tj. $V_O = -V_I$, odnosno pozitivan.

Kada je ulazni napon pozitivan, struja koja prolazi kroz otpornike, ne prolazi kroz diodu (inverzno polarisana dioda). Zbog toga se na otpornicima ne stvara pad napona, pa je izlazni napon V_O isti kao i ulazni napon V_I . U ovom slučaju operacioni pojačavač ne radi u linearnom režimu, jer se ne ostvaruje

5.3. Diferencijalni pojačavač

Na sledećoj slici prikazan je jednostavan diferencijalni pojačavač. Namena ovakvog pojačavača je da pojačava razliku ulaznih napona, a da za promene koje su zajedničke za oba ulazna napona, bude neosetljiv. Prilikom računanja pojačanja ovog pojačavača, polazi se od pretpostavke da operacioni pojačavač radi u linearnom režimu. Kako su i otpornici linearne komponente, može se primeniti teorema superpozicije. U ovom slučaju, to znači da se rade dva proračuna, jedan za V_1 na nuli i drugi za V_2 na nuli. Na kraju se oba rezultata za izlazni napon sabere.

Kada je V_2 na nuli, R_1 i R_2 su paralelno vezani i kroz njih nema struje (jer je ulazna struja u operacioni pojačavač nula), pa se ova otpornička veza može smatrati kratkim spojem. Ako se ovakva šema u poredi sa invertujućom konfiguracijom operacionog pojačavača, vidi se da su obe šeme iste, te se može primeniti odgovarajući izraz za pojačanje/izlazni napon. Ako se sada V_1 postavi na nulu, može se prepoznati neinvertujuća konfiguracija operacionog pojačavača, koja pojačava signal dobijen od V_2 preko razdelnika napona R_1 - R_2 . Tako se dobija:

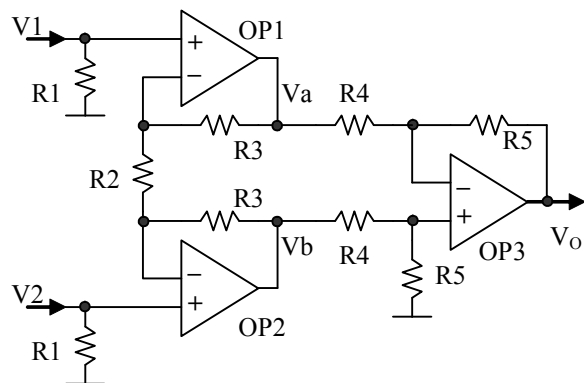
$V'_O = -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_1$	$V''_O = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot V_P; V_P = -\frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_2; V''_O = \frac{R_2}{R_1} \cdot V_2$
Invertujuća konfiguracija	Neinvertujuća konfiguracija

Konačno, kada se sabere oba izraza:

$$V_O = V''_O + V'_O = \frac{R_2}{R_1} \cdot V_2 - \frac{R_2}{R_1} \cdot V_1 = \frac{R_2}{R_1} \cdot (V_2 - V_1) \quad A = \frac{V_O}{V_2 - V_1} = \frac{R_2}{R_1}$$

Ako se prikazani izrazi pogledaju malo detaljnije, jasno je da izvedeni izraz važi samo ako su oba R_1 i oba R_2 otpornika dobro upareni. Kao rezultat, izlazni napon zavisi samo od razlike, a ne i od pojedinačnih vrednosti ulaznih napona.

Osnovna mana ovakvog diferencijalnog pojačavača su ulazni otpornici R_1 , jer u prethodnom proračunu nisu uzete u obzir izlazne otpornosti naponskih izvora V_1 i V_2 . Da bi se ove otpornosti stvarno mogle i ignorisati, potrebno je na odgovarajući način razdvojiti ulazne napone i ovaj diferencijalni pojačavač. Jedno takvo kolo prikazano je na narednoj slici.



OP1 i OP2 su ulazni pojačavači čija je svrha da prilagode ulazni visoku na malu (teoretski nultu) izlaznu impedansu. Metodom superpozicije mogu se izračunati naponi V_A i V_B , na osnovu kojih se računa i izlazni napon (kao što je već pokazano).

Za nulti napon V_2 dobija se:

$$V'_a = \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right) \cdot V_1 \quad V''_a = -\frac{R_3}{R_2} \cdot V_2$$

$$V_a = V'_a + V''_a = \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right) \cdot V_1 - \frac{R_3}{R_2} \cdot V_2$$

$$V_b = V'_b + V''_b = \left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right) \cdot V_2 - \frac{R_3}{R_2} \cdot V_1$$

Slično važi i za napon V_b :

Nakon sređivanja:

$$V_a = \frac{(R_2 + R_3) \cdot V_1 - R_3 \cdot V_2}{R_2}$$

$$V_b = \frac{(R_2 + R_3) \cdot V_2 - R_3 \cdot V_1}{R_2}$$

Sada se može izračunati vrednost izlaznog napona V_0 :

$$V_0 = \frac{R_5}{R_4} \cdot (V_b - V_a) = \frac{R_5}{R_4} \cdot \left(\frac{(R_2 + R_3) \cdot V_2 - R_3 \cdot V_1}{R_2} - \frac{(R_2 + R_3) \cdot V_1 - R_3 \cdot V_2}{R_2} \right)$$

odnosno:

$$V_0 = \frac{R_5}{R_4} \cdot \left(\frac{(R_2 + R_3) \cdot V_2 - R_3 \cdot V_1 - (R_2 + R_3) \cdot V_1 + R_3 \cdot V_2}{R_2} \right)$$

i konačno

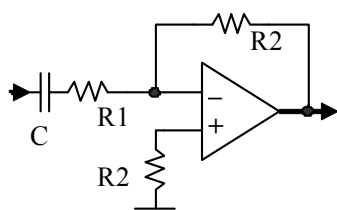
$$V_0 = \frac{R_5}{R_4} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{R_3}{R_2}\right) \cdot (V_2 - V_1) \quad \Rightarrow \text{Pojačanje:} \quad A = \frac{R_5}{R_4} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{R_3}{R_2}\right)$$

Prikazani primeri su podrazumevali rad sa jednosmernim naponima, što je jedna od primena operacionih pojačavača. Osim toga, razmatrana su kola sa idealnim operacionim pojačavačima. U realnim jednosmernim kolima moraju se uzeti u obzir realne karakteristike, jer stvarni napon između pozitivnog i negativnog ulaza nije nula nego do nekoliko desetina mV, a postoje i (vrlo male) ulazne struje polarizacije. Na primer, ako je pojačanje kola 100, tada 10mV razlike na ulazima proizvodi 1V razlike na izlazu. Takođe, ako je ulazna struja polarizacije 1 μA , ona na otporu od 1M Ω stvara pad napona od 1V.

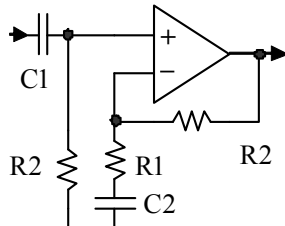
5.4. Pojačavači za naizmenične signale

Kada su u pitanju kola za naizmenične signale, proračun se praktično ne razlikuje, jer se kapacitet kondenzatora i induktivnost kalema tretiraju kao impedanse, za koje važi isti princip kao i za otpornike. Za

ova kola je važno samo naizmenično pojačanje, zbog čega se kola tako da im je jednosmerno pojačanje što



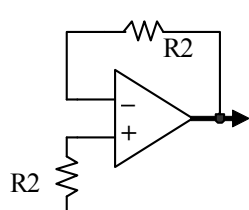
Invertujući pojačavač



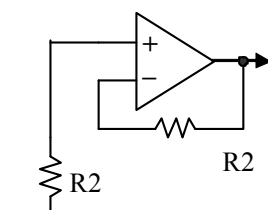
Neinvertujući pojačavač

gde je A_I pojačanje za invertujuću, a A_N za neinvertujuću konfiguraciju. U oba slučaja jednosmerno pojačanje je malo, odnosno jedinično. Naime, ako se kondenzatori izvade iz kola (za analizu jednosmernog načina rada), dobijaju se šeme jednosmerne kola, koje su u ovom slučaju iste, kao na slici. Negativan ulaz je vezan preko R2 na izlaz, što znači da je jednosmerno pojačanje ovog stepena jedinično, a pojačava se napon na

$$A_I = -\frac{R_2}{R_1} \quad A_N = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$



Invertujući pojačavač

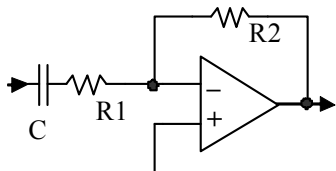


Neinvertujući pojačavač

pozitivnom ulazu. Kako je pozitivan ulaz vezan na masu (nulti napon), to znači da je i izlazni napon nula. Međutim, ako postoji razlika ulaznih napona (ofset napon), tada se i izlazni napon razlikuje od napona mase za istu vrednost, tj. ulazni ofset napon se jedinično pojačava. Svako pojačanje (jednosmerno) veće od jedan dalo bi i veći jednosmerni izlazni napon. Na ovaj način je minimiziran uticaj ulaznog napona ofseta na izlazni napon. Sa druge strane, problem koji mogu da naprave

ulazne struje polarizacije, rešen je tako što je od pozitivnog ulaza prema masi vezan otpornik R2. U neinvertujućoj konfiguraciji ovaj otpornik svakako treba da postoji (radi obezbeđenja pravilne polarizacije kola). Međutim, ako oba ulaza (pozitivan i negativan) 'vide' istu otpornost, ulazne struje polarizacije na oba otpornika prave vrlo slične napone (jer su i ove struje istog reda veličina, tj. vrlo slične), pa se ovi naponi međusobno poništavaju (ako ne potpuno, tada makar delimično).

U analizi koja obuhvata i granične frekvencije, moraju se uzeti u obzir i svi kondenzatori u kolu. U tom slučaju, izraz za pojačanje za invertujuću konfiguraciju je:



$$A = -\frac{R_2}{R_1 + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C}} = -\frac{j \cdot \omega \cdot R_2 \cdot C}{1 + j \cdot \omega \cdot R_1 \cdot C}$$

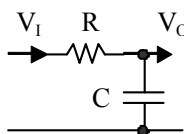
Ako ω teži beskonačnosti (ili je dovoljno veliko), izraz teži već poznatoj vrednosti $A = -\frac{R_2}{R_1}$

a ako ω teži nuli, i pojačanje teži nuli.

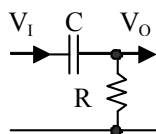
Kada se smanjuje frekvencija, smanjuje se i pojačanje. Frekvencija na kojoj pojačanje padne za koren iz 2, odnosno za 6 dB (Decibela), naziva se granična frekvencija, u ovom slučaju se radi o donjoj graničnoj frekvenciji.

5.5. Integrator i diferencijator

Spoj otpornik-kondenzator je nezaobilazan u impulsnoj elektronici. Dve su osnovne varijante, integrator i diferencijator. Ovi nazivi su potekli od izraza za izlazni napon, koji se dobiju rešavanjem odgovarajućih izraza, a imajući u vidu izraz za struju kondenzatora:



Kvazi-integrator



Kvazi-diferencijator

$$I_C = C \cdot \frac{dU_C}{dt} \quad \text{odnosno} \quad U_C = \frac{1}{C} \cdot \int I_C \cdot dt$$

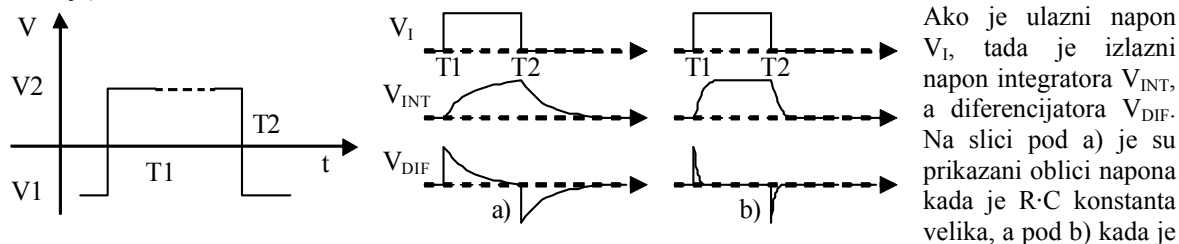
Za integrator važi

$$V_o = \frac{1}{R \cdot C} \cdot \int (V_i - V_o) \cdot dt$$

dok je za diferencijator

$$V_o = R \cdot C \cdot \frac{d(V_i - V_o)}{dt}$$

Posebno je od značaja kako se jedno ovakvo kolo ponaša na nagle promene ulaznog napona (Hevisajdova funkcija):



Rešavanjem izraza za integrator i diferencijator pri ovakvom ulaznom naponu, dobija se izraz

$$V(t) = V(\infty) - [V(\infty) - V(0)] \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

gde su

$V(t)$ – Napon u trenutku t

$V(\infty)$ – Asimptotski napon

$V(0)$ – Početni napon

τ – Vremenska konstanta: $\tau = R \cdot C$

Tako za integrator počevši od trenutka $T2$ važi:

$$V(0) = 0 \quad V(\infty) = V_i \quad V(t) = V_i \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

a za diferencijator

$$V(0) = V_i \quad V(\infty) = 0 \quad V(t) = V_i \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Za oba slučaja, može se izračunati trenutak kada izlazni napon dostigne određenu vrednost:

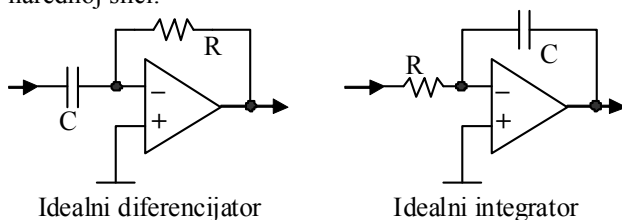
$$t = \tau \cdot \ln \left(\frac{V(\infty) - V(t)}{V(\infty) - V(0)} \right)$$

$V(0)$ predstavlja vrednost napona u početnom trenutku, a $V(t)$ napon za koji se traži vreme. Rezultat je vreme za koje je izlazni napon promenio vrednost sa početne $V(0)$ na tekuću $V(t)$.

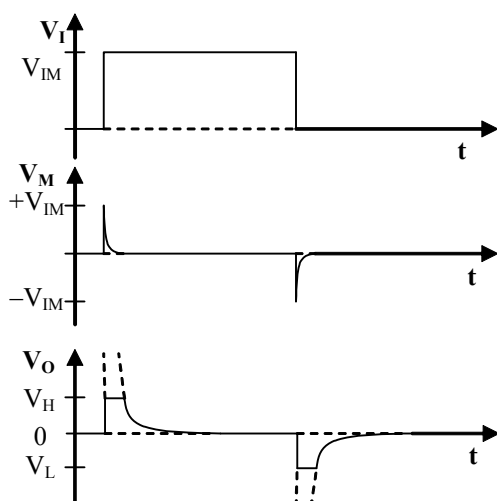
Za konstantnu vrednost integraljenja, rezultat bi treba da bude linearni porast. Ovde to nije slučaj, jer struja punjenja (odnosno pražnjenja) kondenzatora nije konstantna, zato što se punjenjem menja napon na kondenzatoru, a time i napon na otporniku. Zbog toga se ova dva kola nazivaju kvazi-integrator i kvazi-diferencijator.

Za pravi integrator i diferencijator nisu dovoljni samo pasivne komponente. Za ove svrhe mogu se iskoristiti operacioni pojačavači, ali i ovde postoje ograničenja. Na primer, idealni diferencijator bi na pravougaoni (Hevisajdov) signal dao beskonačno kratak impuls beskonačno velike amplitude (Dirakov impuls). Kako bi to zahtevalo i beskonačno veliku struju punjenja kondenzatora, jasno je da se ovakvo kolo ne može napraviti. Umesto toga, moguće je napraviti kola koja i dalje nisu idealna, ali svakako imaju znatno bolje karakteristike

od običnog R-C člana. Primer integratora i diferencijatora sa operacionim pojačavačima je prikazan na narednoj slici.



pojačavača konačno, uz interno ograničenu izlaznu struju, ako izlazni napon dostigne gornju ili donju granicu, pojačavač više ne radi u linearnom režimu, a naponi na pozitivnom i negativnom ulazu nisu isti.

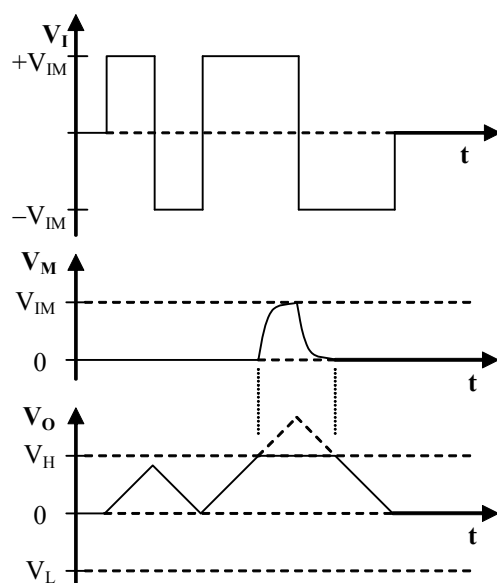


Teoretski, ova dva kola se ponašaju kao idealni integrator i diferencijator. Kod realnih kola, pojavljuju se određena ograničenja. Naime, kolo diferencijatora, za naglu promenu ulaznog napona, zahteva beskonačno veliki strujni impuls, što na otporniku stvara i beskonačno veliki izlazni napon. Kako je napajanje

Tada se R-C veza ponaša kao kvazi-diferencijator, sve dok struja otpornika ne bude dovoljno mala da se ponovo uspostavi linearni režim. Na prikazanom dijagramu se vidi jedan ovakav slučaj. Na dijagramu za izlazni napon V_O sa V_H i V_L su označeni maksimalni, odnosno minimalni izlazni napon operacionog pojačavača. Dijagram za napon na negativnom ulazu V_M prikazuje impulse koji narušavaju linearni režim rada, jer sve dok je V_M različito od nule, izlazni napon je V_H ili V_L (zbog jako velikog internog pojačanja). Kada V_M postane dovoljno malo, operacioni pojačavač se vraća u linearni režim rada.

Da bi se sprečio ulazak operacionog pojačavača u nelinearni režim rada (zasićenje), redno sa kondenzatorom idealnog diferencijatora stavlja se otpornik, čija je uloga da ograniči intenzitet strujnog impulsa. Međutim, postavljanjem rednog otpornika kvari se idealna karakteristika diferencijatora, pa i o tome treba voditi računa.

Kada je reč o idealnom integratoru, ovde ne postoji problem prevelikog strujnog impulsa, ali se nelinearni režim rada takođe može pojaviti. Naime, u linearnom režimu

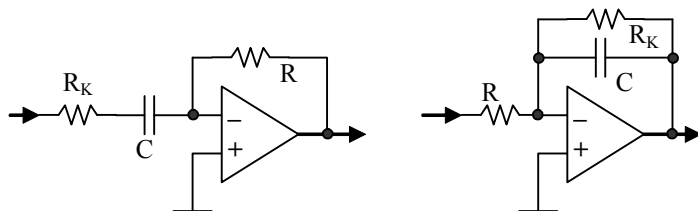


je ulazna struja (kroz otpornik) konstantna, što znači da se napon na kondenzatoru linearno menja. Međutim, kada izlazni napon V_O dostigne maksimalnu (ili minimalnu) moguću vrednost, R-C član počinje da funkcioniše kao kvazi-integrator, a napon na negativnom ulazu (V_M) operacionog pojačavača više nije nula, nego počinje eksponencijalno da se menja.

U slučaju idealnog diferencijatora postoji jednosmerna povratna sprega koja obezbeđuje jedinično pojačanje za jednosmerne signale. Kod idealnog integratora ova sprega ne postoji, jer su izlaz i negativan ulaz operacionog pojačavača povezani samo kondenzatorom. Ako se ulaz u idealni integrator spoji sa masom, napon na otporniku integratora je na nuli (teoretski!), zbog čega nema napona kroz otpornik, a time i struje kroz otpornik i kondenzator. To znači da se izlazni napon ne menja. Kod realnih operacionih pojačavača, zbog ulaznog napona ofseta i ulaznih struja, kroz otpornik idealnog integratora postoji struja, čak i kada je ulaz vezan na masu. Iako je ova struja mala, ona puni, odnosno prazni

kondenzator, tako da se izlazni napon polako menja, na više ili na niže. Ova pojava se zove klizanje (*drift*) izlaznog napona. To je i glavni problem idealnog integratora, jer može izbaciti operacioni pojačavač iz linearnog režima rada. Da bi se ovaj efekat izbegao, paralelno kondenzatoru postavlja se dodatni otpornik čija je otpornost znatno veća od ulaznog otpornika. Iako ovaj otpornik donekle kvari karakteristiku idealnog integratora, znatno se smanjuje mogućnost klizanja izlaznog napona, jer je sada jednosmerno pojačanje tačno

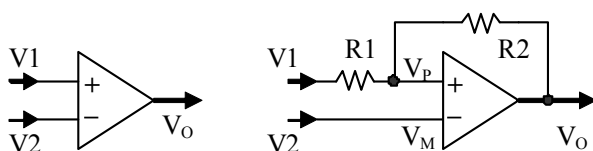
određeno dodatim i postojećim otpornikom. Korigovani idealni diferencijator i idealni integrator sa operacionim pojačavačem su prikazani na narednoj slici.



Korigovani idealni diferencijator Korigovani idealni integrator

5.6. Komparatori

Komparatori su elektronska kola koja mere razliku dva napona i na osnovu izmerene vrednosti određuju koji od dva napona je veći. Vrlo često se i običan operacioni pojačavač koristi kao komparator, ukoliko nema sprege između izlaza i invertujućeg (negativnog) ulaza. Tako su i komparatori u suštini podvrsta operacionih



Komparator bez histereza

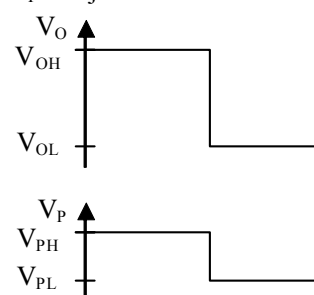
Komparator sa histerezisom

pojačavača, optimizovana za nelinearni režim rada, kada izlazni napon može imati samo dve vrednosti. Šematski simbol komparatora je praktično isti kao i za operacioni pojačavač, pa se na šemi komparator može prepoznati po načinu spajanja, kao i po oznaci kola.

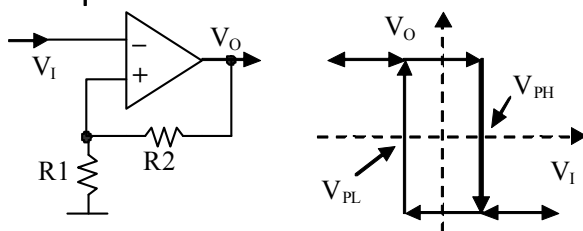
Ako su ulazni naponi isti, tada bi izlazni napon trebao da bude nula. Međutim, već ranije opisani parametri realnih operacionih pojačavača, koji se odnose i na komparatorska kola, dovode do toga da je nulti izlazni napon praktično nemoguće postići. To znači da za izjednačene ulazne napone izlazni napon može imati bilo koju od dve vrednosti, najvišu ili najnižu. Kako i najmanja promena na ulazu (što se odnosi i na promene temperature, šum komponenti i spoljašnji uticaj) dovodi do promene izlaznog napona, izlazni napon može oscilovati, odnosno nekontrolisano se menjati između dve moguće vrednosti. Ovo je moguće sprečiti komparatorom sa histerezisom (kao na slici). Ako se sa izlaza signal vrati preko otpornika na neinvertujući ulaz, umesto jednog praga koji izaziva promenu izlaza, dobijaju se dva različita praga. Naime, sada napon u tački V_P , koji se upoređuje da naponom V_2 (koji je isti kao i napon V_M) iznosi:

$$V_P = V_1 \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} + V_O \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

Ako je izlazni napon visok (V_{OH}), tada je i napon V_P (V_{PH}) veći od napona V_1 , a ako je nizak (V_{OL}), tada je i V_P manji od V_1 :



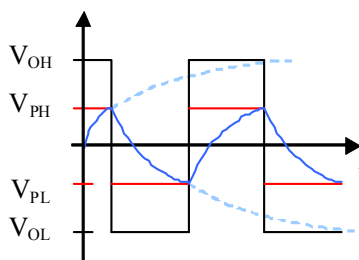
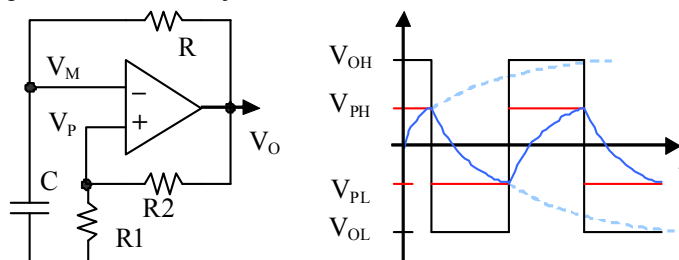
Kada je ulazni napon V_2 manji od oba praga (tj. od V_{OL}), izlazni napon je visok, pa je i napon $V_P = V_{PH}$, odnosno odgovara naponu višeg praga. To znači da ulazni napon V_2 mora da dostigne viši prag V_{PH} da bi počela promena na izlazu, odnosno da bi izlazni napon počeo da pada. Čim se to desi, pada i napon V_P , čime se uvećava razlika ulaznih napona u komparator. Promena se završava kada izlaz dostigne vrednost V_{OL} , a napon neinvertujućeg ulaza napon V_{PL} . Kako je V_{PL} manji od prethodne vrednosti V_{PH} , za ulazni napon V_2 nije dovoljno da padne ispod prethodno dostignute vrednosti V_{PH} , nego mora da padne i ispod V_{PL} da bi promena na izlazu (ovaj put na više) počela.



Ovo znači da se promena na izlazu neće dogoditi ako promene ulaznog napona V_2 nisu dovoljno velike, odnosno postoji histerezis pri komparaciji ulaznih napona. Princip rada može biti jasniji ako se ulazni napon V_1 postavi na nulu (tj. masu), tako da se napon V_2 poredi sa nulom. Odgovarajuće kolo prikazano je na slici, kao i zavisnost izlaznog napona od ulaznog. Strelice na dijagramu označavaju tok

promene izlaznog napona kada ulazni napon raste (gornja strelica u desno) i opada (donja strelica u levo).

Primer primene ovakvog komparatora sa histerezisom je monostabilni multivibrator (oscilator), koji je prikazan na narednoj slici:



Kada je izlazni napon visok, kondenzator se puni sa težnjom da se napuni do vrednosti izlaznog napona V_{OH} . Međutim, pre nego što se to dogodi, napon V_M dostiže gornji prag V_{PH} i menja vrednost izlaznog napona na V_{OL} . Time se menja i smer struje kroz otpornik R , pa se sada kondenzator prazni, sa težnjom da se na njemu dostigne napon V_{OL} . Kao i u

prethodnom slučaju, kada napon V_M pri opadanju dostigne donji prag V_{ML} , opet se menja izlazni napon, sada na vrednost V_{OH} i kondenzator ponovo počinje da se puni. Ovaj postupak se ponavlja, tako da se na izlazu dobija napon četvrtastog talasnog oblika, frekvencije koju određuju gornji i donji prag V_{PH} i V_{PL} , izlazni naponi V_{OH} i V_{OL} , kao i vrednost kondenzatora C i otpornika R .

Na dijagramu su prikazani naponi V_O , V_P i V_M u zavisnosti od vremena. Isprekidana plava linija pokazuje kako bi se kondenzator punio (tj. praznio), kada bi izlazni napon ostao konstantan. Za izračunavanje frekvencije izlaznog signala potrebno je izračunati trajanje impulsa (kada je izlazni napon visok) i trajanje pauze (za nizak izlazni napon), a zatim iz sabrati. Dobijena vrednost predstavlja periodu, a frekvencija se dobija kao recipročna vrednost periode. Za računanje trajanja impulsa i pauze se koristi ranije prikazani izraz

$$\text{trajanje impulsa: } T_I = R \cdot C \cdot \ln\left(\frac{V_{OH} - V_{PH}}{V_{OH} - V_{PL}}\right) \quad \text{trajanje pauze: } T_P = R \cdot C \cdot \ln\left(\frac{V_{OL} - V_{PL}}{V_{OL} - V_{PH}}\right)$$

$$\text{Ukupna perioda je: } T = T_I + T_P \quad \text{a frekvencija: } f = \frac{1}{T} = \frac{1}{T_I + T_P}$$