

Dr Nándor Burány

ANALOGNA ELEKTRONIKA

-skripta-

Visoka tehnička škola strukovnih studija, Subotica, 2019.

1. ELEKTRONSKE KOMPONENTE	5
1.1. PASIVNE KOMPONENTE	6
1.1.1. Otpornici.....	6
1.1.2. Kondenzatori	9
1.1.1.3. Kalemovi.....	11
1.1.4. Transformatori.....	13
1.1.5. Hemijski izvori električne energije	14
1.1.6. Hladnjaci	16
1.1.7. Prekidači.....	17
1.1.8. Elementi za spajanje	18
1.1.9. Osigurači	18
1.1.10. Senzori	20
1.1.11. Provodnici i kablovi.....	21
1.1.12. Kutija uređaja.....	21
1.2. AKTIVNE KOMPONENTE	22
1.2.1. Diode	22
1.2.2. Bipolarni tranzistori	25
1.2.3. Spojni fetovi (jfet, fet)	29
1.2.4. Mosfet-ovi	31
1.2.5. Tiristori.....	34
1.2.6. IGBT	37
1.2.7. Optoelektronske komponente	38
2. OSNOVNA ELEKTRONSKA KOLA.....	41
2.1. PASIVNA KOLA	42
2.1.1. RC niskopropusnik.....	42
2.1.2. RC visokopropusnik.....	44
2.1.3. Razdelnici napona	45
2.1.4. RC propusnik opsega	46
2.1.5. LC filtri	47
2.1.6. Wien-ov most	48
2.1.7. Redno RLC rezonantno kolo	48
2.1.8. Paralelno RLC rezonantno kolo	49
2.2. LOGIČKA KOLA.....	50
2.2.1. Opšte karakteristike logičkih kola	50
2.2.2. Logička kola sa diodama	51
2.2.3. Logički inverter sa tranzistorom.....	52
2.2.4. DTL i TTL kola	53
2.2.5. ECL logička kola	54
2.2.6. I ² L logička kola.....	55
2.2.7. MOS logička kola	56
2.3. POJAČAVAČKA KOLA	59
2.3.1. Modelovanje pojačavača	60
2.3.2. Pojačavači sa povratnom spregom.....	60
2.3.2. Operacioni pojačavači.....	63
2.3.4. Kola sa operacionim pojačavačima.....	64
2.3.5. Pojačavač sa zajedničkim emitorom.....	68
2.3.6. Stepen sa zajedničkim kolektorom	71
2.3.7. Stepen sa zajedničkom bazom.....	73
2.3.8. Diferencijalni pojačavač sa bipolarnim tranzistorima	73
2.3.9. Strujni izvori, aktivna opterećenja, strujna ogledala.....	75
2.3.10. Unutrašnja struktura i realni parametri operacionih pojačavača.....	78
2.4. NELINEARNA ELEKTRONSKA KOLA	82
2.4.1. Kola za zaštitu i ograničenje	82
2.4.2. Modulatori i demodulatori.....	84
2.4.3. Usmerači.....	86

2.4.4. <i>Umnožavači napona</i>	91
2.4.5. <i>Nelinearni pojačavači</i>	92
LITERATURA:	94

PREDGOVOR

Ova skripta je namenjena studentima Visoke tehničke škole strukovnih studija u Subotici i obuhvata predavanja koja se drže iz predmeta Analogni elektronika. Namera autora je bila da sakupi sva saznanja koja su potrebna za savladavanje drugih predmeta vezanih za elektroniku kao i za kasniji inženjerski rad.

Ko god preduzme sličan poduhvat, suočiće se sa preobimnošću materijala. Istorija elektronike je stara svega sto godina, ali se ipak nagomilala ogromna količina naučnih i tehničkih dostignuća. U toku brzog razvoja konstruisane su nove komponente koje su omogućile nove primene. Međutim često su i stare komponente i principi su ostajali u opticaju.

Sa aspekta studenata ovi problemi se manifestuju u suočavanju sa puno novih pojmova. Sa sigurnošću se može tvrditi da je broj novih pojmova u elektronici višestruk u odnosu na neke druge predmete. Situaciju dalje otežava to što te nove pojmove treba upoznati zajedno sa njihovim međusobnim vezama.

Te međuzavisnosti predstavljaju drugu otežavajuću okolnost za autora. Teško je rasporediti gradivo u neki logičan red tako da nema potrebe za stalnim pozivanjem na kasnija poglavlja. U izlaganju elektronike, izuzev zadnjih decenija, vladao je istorijski redosled. Elektronske komponente i kola su proučavana po onom redu kako su pronalazene. Počev od osamdesetih godina pojavio se niz svetskih udžbenika koji istorijski redosled više ne smatraju obavezujućim. Opšte prihvaćenog, novog principa uređivanja - međutim - nema. Neki autori raspoređuju gradivo po važnosti: tako se digitalna elektronika opisuje pre linearnih kola. Drugi autori sličan raspored objašnjavaju sa pedagoškim aspektima: lakše je shvatanje prekidačkog rada elektronskih komponenti nego razumevanje obrade analognih signala.

Ova skripta uzima u obzir nove tendencije, sa druge strane prilagođava se vremenskim ograničenjima nastave na Višoj školi. Izlažu se samo saznanja važna za svakodnevnu praksu i to u sažetoj formi.

Pošto osnovu čine elektronske komponente, prva tema je upoznavanje sa njima (1. deo). Povezivanjem nekoliko komponenti se dobijaju elementarna kola (2. deo). I najsloženije primene se baziraju na tim elementarnim kolima. Ambicija drugog dela je da daje pregled svih danas korišćenim elektronskih kola, uključujući pasivna kola, logička kola, linearna pojačavačka kola i nelinearna kola. Daje se samo kratak opis funkcionisanja. Eventualna teorijska pozadina se može naći u navedenoj literaturi. Svugde su izbegavani složeni proračuni pošto je to danas zadatak računara i simulacionih softvera.

Želim da studenti uspešno koriste ovu skriptu i da postanu stručnjaci koji žive od svog znanja.

Autor.

1. ELEKTRONSKE KOMPONENTE

Kao i bilo koja druga oblast tehnike, i elektronika je bazirana na osnovnim, za nju specifičnim komponentama. Radi boljeg pregleda te komponente se dele na pasivne i aktivne. Atribut aktivan se odomaćio jer su aktivne komponente sposobne za pojačanje i prekidanje signala, dok pasivne komponente imaju drugu primenu (slabljenje, filtracija, ograničenje, podešavanje itd.). Praksa ponegde odstupa od navedenog principa. Ranije su se pod aktivnim komponentama podrazumevale elektronske cevi, dok danas tu ubrajamo sve poluprovodničke komponente, čak i da nemaju efekat pojačanja ili prekidanja. Postoje i suprotni primeri.

Drugi slični udžbenici obično se ne bave i pasivnim komponentama. Pošto program Visoke tehničke škole ne predviđa drugi predmet u tu svrhu, smatralo se važnim da se u prvoj glavi izlože elementarna saznanja iz oblasti pasivnih komponenti. U inženjerskoj praksi proračun, izbor, nabavka i ugradnja pasivnih komponenti se ne može smatrati za drugorazredni zadatak. U obavljanju tog zadatka želi da pomogne prva glava.

Druga glava je posvećena poluprovodničkim komponentama. Opšte je prihvaćeno da se savremeni udžbenici elektronike ne bave elektronskim cevima. Primena elektronskih cevi nije u potpunosti prestala ali je toliko sužena da u ovakvoj uvodnoj literaturi nije opravdano njihovo navođenje. Kod drugih autora opis poluprovodničkih komponenti je mnogo detaljniji, sa dubljom teoretskom osnovom. Praksa pokazuje da studenti nakon diplomiranja nemaju puno koristi od toga. Simbolički rečeno, ako nekoga želimo naučiti da šije, naglasak ne treba staviti na hemijski sastav igle.

U skladu sa ovim principima daje se kratak opis poluprovodničkih komponenti. Kod svih je naglasak na istim praktičnim aspektima (grafički simbol, struktura, karakteristike, modeli, tipovi, kućišta). Smatra se da je to dovoljno za savladavanje kasnijih delova gradiva.

1.1. PASIVNE KOMPONENTE

Kao što je objašnjeno u prethodnom uvodu, u pasivne komponente se danas ubrajaju sve komponente koje nisu na bazi poluprovodnika. Njihovu važnost najbolje potvrđuje činjenica da sveobuhvatni trgovački katalozi elektronskih komponenti posvećuju veći prostor njima nego poluprovodničkim komponentama. Pasivne komponente se redovno mogu opisati sa malim brojem parametara. Nasuprot tome njihovom proračunu i izboru treba posvetiti adekvatnu pažnju jer pouzdanost i primenljivost nekog uređaja u velikoj meri zavisi od njih.

U daljem tekstu daje se kratak opis pojedinih pasivnih komponenti, uključujući grafički simbol, parametre i oblasti primene.

1.1.1. Otpornici

Za otpornike se mogu smatrati sve komponente kod kojih postoji jednoznačna veza između napona na komponenti i struje koja prolazi kroz nju bez obzira na vremenski oblik napona i struje. Znači, za svaki otpornik postoji veza $v=f(i)$ koja se u većini slučajeva uprošćava na linearan oblik $v= Ri$, gde je: v napon, R je otpornost otpornika, i struja. Razne otpornike iz svakodnevne prakse delimo u tri grupe:

a) Običnim otpornicima se smatraju oni linearni otpornici kod kojih je otpornost R fabrički fiksirana. Aktivni deo otpornika se pravi od tankog sloja grafita ili metala, eventualno od otporne žice. Aktivni materijal se nanosi na keramičku podlogu, naprave se izvodi a slobodne površine se zaštićuju farbanjem.

Glavne karakteristike otpornika su: otpornost, nazivna snaga i tolerancija. Otpornost može da se bira iz širokog opsega; dobra je praksa ako se možemo zadržati unutar granica $10\Omega - 1M\Omega$ ali se dešava da umesto iz navedenih pet dekada biramo otpornike iz sedam dekada.

Unutar jedne dekade proizvođači određuju otpornosti po geometrijskim nizovima. Ovakvi nizovi su niz E6, E12, E24 itd. Broj u nazivu niza se odnosi na broj vrednosti unutar jedne dekade. Narednu vrednost u nizu računamo množeći prethodnu vrednost sa $(10)^{1/n}$ (gde je n broj koji figuriše u nazivu niza), uz zaokruživanje na 2-3 cifre. Spomenuti nizovi sadrže sledeće vrednosti:

niz E6: 1,0; 1,5; 2,2; 3,3; 4,7; 6,8.

niz E12: 1,0; 1,2; 1,5; 1,8; 2,2; 2,7; 3,3; 3,9; 4,7; 5,6; 6,8; 8,2.

niz E24: 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,5; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,7; 3,0; 3,3; 3,6; 3,9; 4,3; 4,7; 5,1; 5,6; 6,2; 6,8; 7,5; 8,2; 9,1.

Električna snaga dovedena u otpornik se pretvara u toplotu - što dovodi do zagrevanja. Nazivna snaga je ona električna snaga koja još ne uzrokuje prekomerno zagrevanje otpornika. Jače zagrevanje dovodi do naglog smanjenja radnog veka. Decenijama su otpornici nazivne snage od $\frac{1}{4}W$ bili najpopularniji. Danas, radi smanjenja dimenzija, sve češće se koriste otpornici snage od $\frac{1}{8}W$ i manji.

Tolerancija otpornika određuje očekivano odstupanje otpornosti od nazivne vrednosti. Kao kod svakog serijskog proizvoda, moguća su manja ili veća odstupanja u vrednostima parametara. Tolerancija se zadaje u procentima, moguća su odstupanja u oba smera (na pr. $\pm 1\%$).

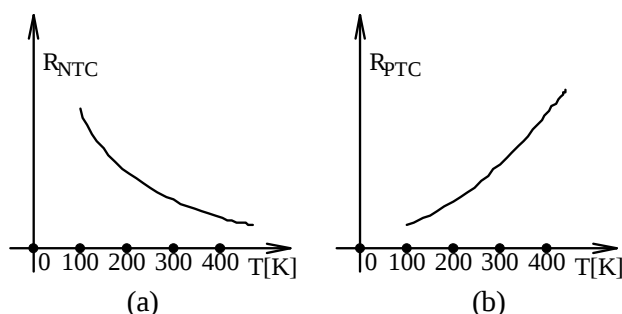
Otpornost i tolerancija se obično obeležavaju na otpornicima uz pomoć kombinacije boja, retko se koriste natpisi (izuzetak čine otpornici veće snage i otpornici predviđeni za površinsku montažu). Vrednost otpornosti se očitava tako da se cifre koje odgovaraju za prve dve ili tri boje, napišu jedan pored drugog i dobijeni broj se pomnoži sa onolikim stepenom broja deset koliki odgovara narednoj boji. Zadnja cifra određuje toleranciju. Značenje pojedinih boja pri određivanju otpornosti i tolerancije dato je u tabeli 1.1.

boja	cifra	množilac	tolerancija
crna	0	1	
braon	1	10	1%
crvena	2	100	2%
narandžasta	3	1000	-
žuta	4	10 000	-
zelena	5	100 000	-
plava	6	1000 000	-
ljubičasta	7	-	-
siva	8	-	-
bela	9	-	-
zlatno	-	0,1	±5%
srebrno	-	0,01	±10%

Tabela 1.1. Značenje boja pri obeležavanju otpornika.

b) Obični otpornici se konstruišu tako da ispoljavaju minimalnu zavisnost od temperature. Za razliku od njih postoje otpornici čija otpornost se značajno menja sa temperaturom. U njih spadaju NTC otpornici kod kojih sa porastom temperature otpornost opada i PTC otpornici kod kojih je suprotna tendencija (slika 1.1).

Slika 1.1. Temperaturna zavisnost (a) NTC i (b) PTC otpornika.

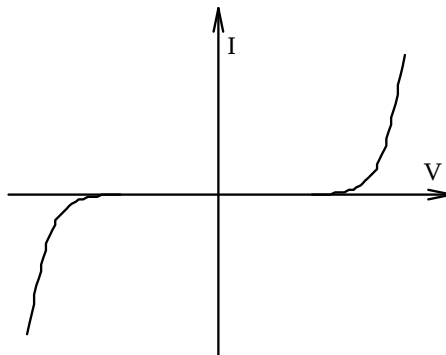


Postoje dve oblasti primene NTC otpornika: merenje temperature i ograničenje udarnih struja pri uključivanju uređaja. Pri uključivanju NTC otpornik je hladan, otpornost mu je velika zato uspešno limitira struju i na taj način zaštićuje ulazno kolo uređaja i mrežni osigurač. U toku rada otpornik se greje, opada mu otpornost i time se smanjuju gubici i ograničava dalje zagrevanje. Osnovni podaci za takve otpornike, pored dimenzija su: otpornost (u hladnom stanju) i najveća efektivna vrednost struje na kojoj se još mogu primeniti.

Dobar deo PTC otpornika se takođe koristi za merenje temperature; u novije vreme su razvijeni PTC otpornici za zaštitu od preopterećenja. Ove poslednje redno vezuju sa potrošačem. U hladnom stanju otpornost im je mala i omogućavaju normalno funkcionisanje uređaja. Pri preopterećenju otpornost im naglo poraste i time praktički prekidaju dalje napajanje potrošača. Čim se ohlade, otpornost im padne i ponovo uključuju potrošač. Važniji podaci za ove otpornike su nazivna otpornost, nazivna struja i struja iskopčavanja.

Kod varistora - zavisnost $v=f(i)$ je nelinearna - ali važi simetrično ponašanje za pozitivne i negativne napone. Slika 1.2. prikazuje tipičnu karakteristiku varistora. Suština te krive je da do nazivnog napona varistor ne propušta značajnu struju, a preko izvesnog praga struja naglo poraste. Varistori se obično vezuju paralelno na ulaz potrošača i ostvaruju zaštitu potrošača od prenapona.

Slika 1.2. Nelinearna strujno-naponska karakteristika uobičajena kod varistora.



Glavni podaci za varistore su: nazivni (radni) napon, probojni napon i opteretljivost (kratkotrajno ili u ustaljenom režimu).

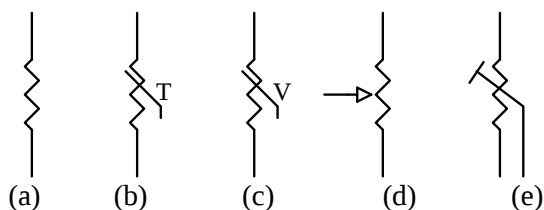
c) Potenciometri su takvi otpornici kod kojih, pored krajnjih izvoda, postoji i jedan klizni kontakt (klizač). Aktivni materijal je i u ovom slučaju tanak sloj grafita, metala ili je otporna žica. Klizač se može pomerati po aktivnom sloju po želji. Na ovaj način se ostvaruje promenljiva otpornost ili promenljiva razdela napona. Pomeranje klizača se ostvaruje okretanjem osovine ili pravolinijskim pomeranjem određene ručke.

Promena otpornosti je obično srazmerna sa veličinom pomeraja klizača (linearni potenciometri) ali može postojati i logaritamska zavisnost (logaritamski potenciometri). U slučaju da se pomeranje klizača vrši sa alatom, govorimo o trimer potenciometrima.

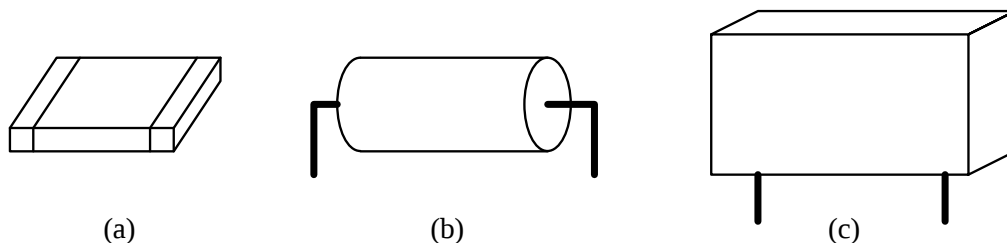
Najvažniji podaci za potenciometre su otpornost, maksimalna snaga i maksimalni ugao okretanja. Većina potenciometara se može okretati nešto manje od punog kruga (na pr. 330°). Postoje međutim i potenciometri sa više okretaja, kod njih osovina se može okretati na pr. za tri ili deset krugova. Potenciometri sa više okretaja su skupi i koriste se samo u slučaju posebno preciznih podešavanja.

Na slici 1.3. su prikazane uobičajene grafičke oznake za razne otpornike.

Slika 1.3. Grafičke oznake raznih otpornika: a) običan otpornik, b) temperaturno zavisani otpornik (NTC, PTC), c) varistor, d) potenciometar, e) trimer potenciometar.



Mehanička izvedba većine otpornika je aksijalna: telo otpornika je valjkasto, izvodi se priključuju duž osovine valjka. Otpornici predviđeni za površinsku montažu su u obliku paralelepipeda. Sa dve bočne strane postavljaju se metalne kapice koje čine izvode. NTC i PTC otpornici kao i varistori su radijalne izvedbe: telo otpornika je u obliku diska, žice koje čine izvode postavljaju se paralelno sa jedne strane. Pojedine mehaničke izvedbe su prikazane na slici 1.4.



Slika 1.4. Mehaničke izvedbe otpornika: a) izvedba za površinsku montažu, b) aksijalna izvedba, c) radijalna izvedba.

1.1.2. Kondenzatori

Kondenzatori su elektronske komponente koje u svom unutrašnjem električnom polju mogu da akumuliraju značajnu energiju. Energija se akumulira u izolacionom sloju (dielektrik) između dve metalne površine - kada na te metale površine naneseemo elektricitet suprotnog polariteta. Pri tome se pojavljuje potencijalna razlika između metalnih površina što se može izmeriti na izvodima koji se priključuju na te metalne površine.

Obično važi linearna veza između količine naelektrisanja (Q) i napona (V): $Q=CV$, gde je C (jedinica je *Farad*) koeficijent srazmernosti koji se zove kapacitivnost kondenzatora. Akumulisana energija se može izračunati po formuli:

$$W = \frac{CV^2}{2} \dots\dots\dots(1.1.)$$

Kapacitivnost kondenzatora se obično proračunava po formuli za pločaste kondenzatore:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} \dots\dots\dots(1.2.)$$

gde je:

- ϵ_0 - dielektrična konstanta vakuuma,
- ϵ_r - relativna dielektrična konstanta primenjenog izolatora,
- S - veličina metalnih površina,
- d - razmak između metalnih površina (što se poklapa sa debljinom izolacionog sloja).

Glavni cilj pri konstrukciji kondenzatora je postizanje što veće kapacitivnosti odnosno akumulacione sposobnosti u što manjoj zapremini. Zato je poželjno da se koristi što tanji sloj dielektrika. Smanjenje mera ograničava mehanička čvrstoća dielektrika i opasnost od proboja.

Po konstrukciji razlikujemo četiri vrste kondenzatora: elektrolitski kondenzatori, blok kondenzatori, keramički kondenzatori i promenljivi kondenzatori.

a) Elektrolitski kondenzatori imaju četvoroslojnu strukturu. Velika površina se postiže primenom tanke metalne folije (aluminijum, tantal, zlato). Površina jedne folije (anoda) se oksidiše. Taj tanak oksidni sloj igra ulogu izolatora (dielektrik). Druga metalna folija ne naleže direktno na oksidni sloj već se između postavlja sloj papira natopljen dobro provodnim elektrolitom.

Opisana struktura ispoljava usmeračko dejstvo pošto elektroni iz anode preko oksidnog sloja mogu da pređu u elektrolit, međutim joni elektrolita ne mogu proći preko oksidnog sloja do anode. Zbog usmeračkog efekta elektrolitske kondenzatore možemo opterećivati samo naponom jednog smera, zato se za njih ponekad koristi naziv polarizovani kondenzatori. U manjim serijama

proizvode se i elektrolitski kondenzatori bipolarnog tipa tako što se oksidišu površine kod obe folije. Glavni nedostatak je što se na ovaj način postiže upola manja kapacitivnost.

Zahvaljujući vrlo maloj debljini oksidnog sloja (opseg $1\text{nm}-10\text{nm}$), kod elektrolitskih kondenzatora mogu se postići velike kapacitivnosti u maloj zapremini. Radni vek im je relativno kratak zbog isušivanja elektrolita. Sa porastom temperature isušivanje se ubrzava, pri porastu za $7-10\text{K}$ radni vek se prepolovi.

Osnovi podaci kod elektrolitskih kondenzatora su: kapacitivnost, nazivni napon, ekvivalentna redna otpornost (ESR , uzima u obzir gubitke), maksimalna radna temperatura, tolerancija i očekivani radni vek.

Brojne vrednosti kapacitivnosti se redovno biraju iz niza $E6$ (videti kod otpornika pod tačkom 1.1.1). Tolerancija je redovno $\pm 20\%$ - ili još gora. Kapacitivnost aluminijumskih elektrolitskih kondenzatora redovno spada u opseg od $1\mu\text{F}$ do 100mF .

Po naponu razlikujemo niskonaponske ($6,3\text{V}-100\text{V}$) i visokonaponske ($100\text{V}-400\text{V}$) elektrolitske kondenzatore. Savremeni elektrolitski kondenzatori se redovno prave u radijalnoj izvedbi, telo kondenzatora je valjkastog oblika. Ranije je aksijalna izvedba bila uobičajena, takođe sa valjkastim telom. Za manje kapacitivnosti i napone prave elektrolitske kondenzatore i za površinsku montažu. Navedene mehaničke izvedbe su prikazane kod otpornika (slika 1.4).

Tantalski elektrolitski kondenzatori se redovno prave u suvoj izvedbi tako da se kod njih ne manifestuje isušivanje. Na žalost primenjena tehnologija ne omogućava realizaciju kondenzatora velike kapacitivnosti. Obično se koriste u profesionalnim uređajima za filtraciju i odvajanje jednosmerne komponente.

Zlatni kondenzatori su vrlo velike kapacitivnosti (red veličine 1F), ali radni napon im je svega nekoliko *Volti*. Ekvivalentna redna otpornost (ESR) im je velika. Koriste se za besprekidno napajanje potrošača sa malom potrošnjom (na pr. memorije).

b) Blok kondenzatori se dobijaju motanjem. Ranije su namotavali naizmenično postavljene trake metala i izolatora. Danas se koriste metalizovane plastične folije. Nakon priključivanja izvoda aktivni deo kondenzatora se ubacuje u plastično kućište i zalije veštačkom smolom.

Glavni podaci za blok kondenzatore su kapacitivnost, nazivni napon, tolerancija i faktor gubitaka ($\text{tg}\delta$). Kapacitivnost im obično spada u opseg od 100pF do $10\mu\text{F}$, vrednosti se uzimaju iz niza $E6$ ili $E12$. Radni napon može biti od 50V do nekoliko kV . Tolerancija je znatno bolja nego kod elektrolitskih kondenzatora ($\pm 10\%$, $\pm 5\%$). Faktor gubitaka na određenoj frekvenciji je odnos snage gubitaka i reaktivne snage kondenzatora:

$$\text{tg}\delta = \frac{P}{Q} \dots\dots\dots(1.3.)$$

Gubici blok kondenzatora pri modelovanju se uzimaju u obzir pomoću rednog ili paralelnog otpornika (R_S , R_P). Na vrlo visokim frekvencijama dolazi do izražaja i redna induktivnost kondenzatora (L_S). Primenu kondenzatora limitira rezonantna učestanost koja je određena formulom:

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L_S C}} \dots\dots\dots(1.4.)$$

Dati kondenzator se samo ispod te učestanosti ponaša kao kondenzator a iznad je induktivnog karaktera.

Blok kondenzatori se redovno proizvode u radijalnoj izvedbi, telo kondenzatora je u obliku paralelepipeda (slika 1.4). Ranije je aksijalna izvedba bila uobičajena.

Zahvaljujući stabilnom ponašanju blok kondenzatora se koriste u preciznim vremenskim i filtarskim kolima.

Jedna posebna oblast primene blok kondenzatora je filtracija mrežnih smetnji. Najvažniji parametar tih kondenzatora, pored kapacitivnosti i napona je rezonantna učestanost pošto se efekat filtriranja ostvaruje samo ispod rezonantne učestanosti.

Kondenzatore za filtraciju smetnji delimo na dve klase: postoje takozvani X kondenzatori koji se povezuju između linija za napajanje i postoje Y kondenzatori koji se vezuju od linija za napajanje prema uzemljenju. Konstrukcija tih kondenzatora je slična ali se Y kondenzatori prave sa znatno debljim slojem izolatora (dielektrika) pošto pri njihovom probodu vod za uzemljenje može da dođe pod napon i može da ugrozi korisnika.

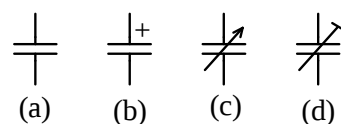
c) Keramički kondenzatori se formiraju od dvostrano metalizirane keramičke pločice. Kapacitivnost koja se može postići na ovaj način je relativno mali: od $1pF$ do $100nF$ - sa tim da se veće vrednosti postižu višeslojnom strukturom. Lako se dobijaju visokonaponski keramički kondenzatori. Rezonantna učestanost im je vrlo visoka zato se uspešno koriste za filtraciju i sprežanje signala visoke učestanosti. Vrednosti kapacitivnosti se redovno biraju iz niza E6. Tolerancija je relativno loša ($\pm 20\%$), zavisnost od temperature je izražena. Mehanička izvedba je redovno radijalna telo kondenzatora je u obliku diska, eventualno pravougaone ploče (videti sliku 1.4).

d) Promenljivi (podesivi) kondenzatori se redovno koriste za podešavanje rezonantnih kola i filtara. Promena kapacitivnosti se postiže promenom međusobnog položaja dve ploče ili dva sistema ploča. Red veličine kapacitivnosti je od $1pF$ do $100pF$ - sa tim da kod istog kondenzatora odnos maksimalne i minimalne kapacitivnosti redovno nije veći od deset.

Ako je kondenzator predviđen za podešavanje u toku rada, govorimo o obrtnom kondenzatoru. Jednostruko (fabričko) podešavanje se vrši sa trimer kondenzatorom. Obrtni kondenzatori se prave sa odgovarajućom osovinom i dugmetom za ručno podešavanje, a trimer kondenzatori se nameštaju uz pomoć alata.

Grafičke oznake za razne tipove kondenzatora su navedene na slici 1.5.

Slika 1.5. Grafičke oznake za razne tipove kondenzatora: a) opšta oznaka, b) polarizovani (elektrolitski) kondenzator, c) obrtni kondenzator, d) trimer kondenzator.



1.1

1.1.3. Kalemovi

Kalemovi su elektronske komponente koje mogu da akumuliraju značajnu energiju u svom magnetnom polju. Magnetno polje se formira pod uticajem električne struje koja prolazi kroz provodnike. Mera magnetnog polja je magnetni fluks (Φ). Kod linearnog elementa važi:

$$\Phi = LI \dots\dots\dots(1.5.)$$

gde je:

L – induktivnost kalema,

I – struja kalema.

Količina akumulirane energije se proračunava po formuli:

$$W = \frac{LI^2}{2} \dots\dots\dots(1.6.)$$

Kalemovi se redovno prave od bakarne žice sa lak izolacijom.

U zavisnosti od toga da li se u magnetnom polju kalema nalazi neki feromagnetni materijal, razlikujemo dve grupe kalemova:

a) Kalemovi sa vazdušnim jezgrom su ili samodržeci ili se prave na držaču od nemagnetnog materijala (papir, plastika). Za njih zaista važi linearna veza $\Phi=LI$, ali na žalost na ovaj način se mogu postići samo kalemovi male induktivnosti.

Ovakvih kalemova obično nema u prodaji, korisnik treba da ih pravi sam. Kod solenoidnog oblika namotaja induktivnost se može proračunati uz pomoć sledeće empirijske formule:

$$L = \frac{(\pi ND)^2}{l + 0,45D} 10^{-7} \dots\dots\dots(1.7.)$$

gde je:

- N – broj navojaka,
- D – unutrašnji promer,
- l – dužina kalema.

Zadata formula važi za relativno dugačke kalemove ($l > 0,3 D$). Za kratke (pljosnate) kalemove može se primeniti modifikovana formula:

$$L = \frac{(\pi ND)^2}{(l + 0,45D - 0,01 \frac{D^2}{l})} 10^{-7} \dots\dots\dots(1.8.)$$

Kalemovi sa vazdušnim jezgrom se najviše koriste u radiotehnici ali mogu da se nađu i u energetskim kolima, iz tog razloga što se kod njih ne javlja zasićenje.

b) Primenom feromagnetnog materijala smanjuje se rasipanje polja, fluks se skoncentriše u malu zapreminu gde je indukcija (B) znatno povećana, čime se povećava i akumulaciona sposobnost kalema.

Važno je spomenuti da nije poželjno da jezgro bude potpuno zatvoreno, već je potreban izvestan vazdušni zazor. Uloga jezgra je da skoncentriše fluks - ali akumulacija energije se dobrim delom odigrava u vazdušnom zazoru.

Primena jezgra dovodi i do izvesnih mana: javljaju se dodatni gubici usled histerezisa što je karakteristično za magnetne materijale; u slučaju da je jezgro ujedno i dobar provodnik, pojavljuju se i vrtložne struje što isto dovodi do gubitaka.

Značajne probleme može da stvara i zasićenje što je uzrokovano time da se magnetni materijali ne mogu magnetisati preko izvesne mere. Ulaskom u zasićenje induktivnost kalema naglo opada, kalem ne može da obavlja svoju funkciju.

Na industrijskim frekvencijama (50Hz-400Hz) za realizaciju jezgra primenjuju se limovi od legiranog čeličnog lima - radi smanjenja vrtložnih gubitaka. Jezgro od punog gvožđa se može koristiti samo na jako niskim frekvencijama odnosno pri jednosmernoj struji.

Na višim frekvencijama koriste se feritna jezgra odgovarajućeg sastava. Feriti su oksidi gvožđa koji sa jedne strane poseduju magnetne osobine gvožđa, a sa druge strane ne provode električnu struju, pa se u njima ne mogu formirati vrtložne struje.

Jezgra kalemova se prave i od gvozdenog praha sa dodatkom lepila. Takva jezgra toroidnog oblika se ponašaju kao da imaju vazdušni zazor raspoređen po obodu.

I kalemove sa jezgrom redovno proračunava i pravi korisnik. Na raspolaganju je veliki izbor čeličnih i feritnih jezgara. Induktivnost kalema sa jezgrom se može proračunati po formuli:

$$L = N^2 A_L = N^2 \mu_0 \frac{A_e}{l_0} \dots\dots\dots(1.9.)$$

gde je:

- N - broj navojaka,
- A_L - faktor induktivnosti,
- μ_0 - permeabilnost vakuuma [$4\pi 10^{-7} H/m$],
- A_e - površina preseka jezgra,

l_0 - visina vazdušnog procepa.

Veličina procepa se određuje tako da ni pri vršnoj vrednosti struje jezgro ne dođe u zasićenje:

$$l_0 = \frac{\mu_0 N I_m}{B_m}, \dots \dots \dots (1.10.)$$

gde je:

I_m - vršna vrednost struje,

B_m – najveća dozvoljena magnetna indukcija.

Drugo ograničenje pri projektovanju kalema pored zasićenja je zagrevanje. Zagrevanje se javlja zbog gubitaka u provodnicima i u jezgru. Proračun gubitaka je relativno složen zadatak. Realna slika o zagrevanju se često može stvoriti samo uz merenje na realizovanom kalemu.

Pri korišćenju kalema na malim signalima glavna stvar nije zagrevanje već faktor dobrote koji je dat formulom:

$$Q = \frac{\omega L}{R_s} \dots \dots \dots (1.11.)$$

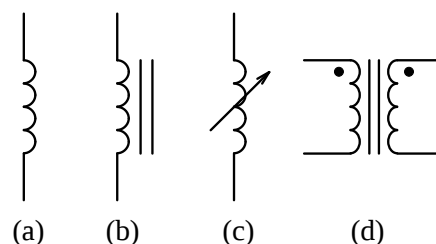
gde je R_s ekvivalentna redna otpornost kalema koja uzima u obzir gubitke u kalemu.

Slično kao kod kondenzatora, i kod kalemova postoji rezonantna učestanost iznad koje se kalem više ponaša kao kondenzator zbog parazitne kapacitivnosti između susednih navojaka i slojeva.

Na jedno isto jezgro može se namestiti i više od jednog namotaja. Pri tome treba uzeti u obzir da se polja koja potiču od pojedinih namotaja, algebarski sabiraju. Strujno kompenzovani kalemovi, kod kojih se na jednom zatvorenom jezgru nalaze dva istovetna namotaja, vrlo su važni za primenu. Po jedan od tih namotaja se povezuje na red u linije za napajanje određenog uređaja. Pri povezivanju treba voditi računa da se ponište polja koja su rezultat radnih struja a struje smetnji treba da se priguše u što većoj meri.

Kalemovi sa jezgrom se uglavnom koriste za filtraciju, usrednjavanje i kašnjenje signala, a postoje i radiotehničke primene. Grafički simboli za kalemove su prikazani na slici 1.6.

Slika 1.6. Grafički simboli za kalemove: a) opšta oznaka, b) kalem sa feromagnetnim jezgrom, c) kalem promenljive induktivnosti, d) magnetno spregnuti kalemovi sa označavanjem početaka motanja.



1.1.4. Transformatori

Skoro bez izuzetaka transformatori se prave sa jezgrom od feromagnetnog materijala. Na jezgru se redovno nalaze dva ili više namotaja. Zahvaljujući zajedničkom magnetnom polju koje obuhvata namotaje, mogu se preneti signali odnosno energija iz jednog namotaja u drugi.

Jezgra se realizuju od istih materijala kao jezgra kalemova (tačka 1.1.3) s tim da je ovde jezgro obično zatvoreno. Vrlo retko, na pr. kod indukcionog grejanja se koriste transformatori sa vazdušnim jezgrom (bez feromagnetnog materijala). Namotaji se prave od bakarne žice sa lak izolacijom, ređe od lima ili cevi.

Osnovi podaci za određeni transformator su: nazivna snaga, radna frekvencija, prenosni odnos i koeficijent sprege. Snaga je ograničena zasićenjem i zagrevanjem. Radna učestanost

uglavnom zavisi od materijala jezgra - ali na višim frekvencijama bitan faktor je i raspored namotaja.

Prenosni odnos je odnos napona i struja na odgovarajućim namotajima - što približno odgovara odnosu broja zavoja u tim namotajima. U slučaju dva namotaja na primer važi:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1}, \dots\dots\dots(1.12.)$$

de su:

N_1, N_2 - brojevi zavoja,

V_1, V_2 - naponi na odgovarajućim namotajima,

I_1, I_2 - struje kroz odgovarajuće namotaje.

Koeficijent sprege ima veze sa rasipanjem magnetnog fluksa transformatora. Ako bi sav fluks prolazio kroz oba namotaja, koeficijent sprege bi bio jedinični odnosno 100 %. U svakom realnom slučaju postoji rasipanje polja, što smanjuje koeficijent sprege ispod jedinične vrednosti. Posledica toga je promena prenosnog odnosa pri opterećenju transformatora

Transformatori sa koeficijentom sprege blizu 100 % se koriste u jedinicama za napajanje i pojačavačima. Transformatori sa lošijom spregom su predviđeni za punjače akumulatora, za aparate za zavarivanje i za indukciono zagrevanje.

Glavna primena transformatora je prenos signala odnosno energije sa visokim stepenom iskorišćenja, bez galvanske sprege. U toku prenosa nivoi signala se mogu proizvoljno menjati što omogućava prilagođenje impedanse.

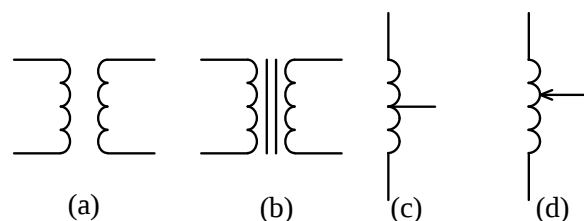
Jednu posebnu vrstu transformatora čine auto-transformatori i regulacioni transformatori. Kod njih se ulazni napon priključuje između dve tačke jednog jedinstvenog namotaja, a izlaz se skida sa druge dve tačke. Izostavljanjem drugog namotaja nazivna snaga transformatora kod datog jezgra se može povećati. Nedostatak je što u ovom slučaju postoji galvanska sprega između ulaza i izlaza.

Regulacioni transformator je specijalan auto-transformator kod koga se priključna tačka izlaza može pomerati pomoću jednog klizača i time se kontinualno može podešavati izlazni napon.

Jedan deo transformatora se može naći kao gotova komponenta (na pr. mrežni transformatori) dok druge korisnik sam mora da proračunava i da mota na odgovarajuće čelično ili feritno jezgro.

Grafičke oznake za razne tipove transformatora su prikazane na slici 1.7.

Slika 1.7. Grafičke oznake za transformatore: a) transformator bez feromagnetnog jezgra, b) transformator sa jezgrom, c) auto-transformator, d) regulacioni transformator.



1.1.5. Hemijski izvori električne energije

Većina elektronskih uređaja napaja se iz gradske mreže - ali kod prenosnih uređaja i uređaja za besprekidno napajanje mora postojati alternativni izvor energije. Takvi alternativni izvori mogu biti hemijski izvori kod kojih se energija čuva u vidu hemijskih jedinjenja. Hemijskim putem u datoj zapremini se može akumulirati za nekoliko redova veličine više energije nego u električnom

polju kod kondenzatora. Nasuprot tome brzina vraćanja energije iz hemijskih izvora je za redove veličina manja.

Hemijski izvori se sastoje iz odgovarajućih ploča između kojih se nalazi elektrolit. Aktivni materijali za čuvanje energije se nalaze na površinama ploča.

Hemijske izvore delimo u dve grupe: akumulatori i suve ćelije. Akumulatori su ponovo punjivi nakon iskorišćenja sadržane energije - dok suve ćelije nisu ponovo punjive.

Prema primenjenim materijalima razlikujemo: olovne akumulateure, nikl-kadmijum (NiCd) akumulateure, NiMH akumulateure, Li-ion akumulateure itd. Vrsta materijala dobrim delom određuje radni vek akumulatora i količinu energije koja se može akumulirati u datoj zapremini (gustina energije).

Osnovni tehnički podaci za akumulateure su nazivni napon i kapacitet. Napon jedne ćelije obično nije dovoljan (1V-2V) zato se više ćelija vezuje redno i dobijaju se akumulatorske baterije. Kod akumulatora - pod kapacitetom se podrazumeva ukupna količina naelektrisanja ($\int idt$) koja se može dobiti iz akumulatora u toku pražnjenja. Stvarni kapacitet može znatno da odstupa od nazivnog kapaciteta: sa porastom struje pražnjenja dolazi do pada kapaciteta.

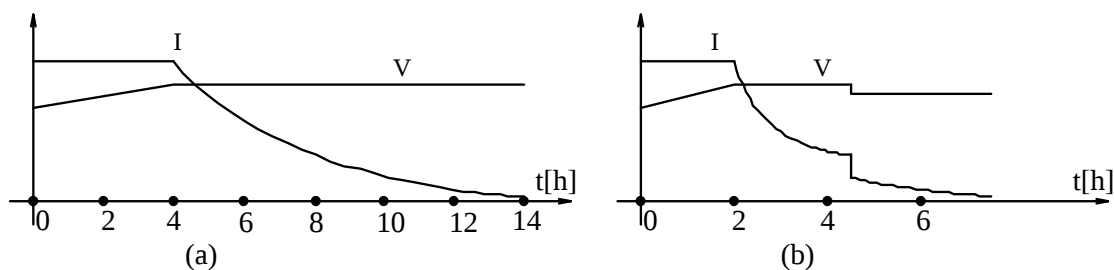
Radni vek akumulatora se može zadati u godinama (u slučaju stand-by režima) ili preko očekivanog broja punjenja i pražnjenja. Broj ciklusa može da se menja od nekoliko stotina do nekoliko hiljada u zavisnosti od materijala i od tehnologije. Značajan uticaj ima i vremenski tok punjenja i pražnjenja.

Ranije su se akumulatori proizvodili sa tečnim elektrolitom, danas sve više ima akumulatora sa gel elektrolitom. Prednost ovih drugih je da se mogu okretati i ugraditi u bilo kom položaju, elektrolit neće iscuriti.

Po oblasti primene razlikujemo „stand-by” akumulateure, startne akumulateure i akumulateure za električnu vuču. Kod „stand-by” primena najvažnije je malo samopražnjenje i dugačak radni vek. Startni akumulatori moraju da podnesu velike struje pražnjenja bez oštećenja. Akumulatori za električnu vuču se prazne sa umerenim strujama - ali moraju biti optimizovani za veliki broj ciklusa punjenja i pražnjenja.

Punjenje akumulatora zahteva izvesnu stručnost i odgovarajući punjač. Olovni akumulatori se pune sa takozvanom IV ili IVV metodom. Suština IV metode jeste da se na početku punjenja akumulator napaja konstantnom strujom - a kad napon punjenja postigne odgovarajući nivo, dalje se održava konstantan napon - uz opadajuću struju.

Kod IVV metode početak scenarije punjenja je sličan kao kod IV metode - s tim da je u početku podešen viši naponski prag a kad struja u toku punjenja padne ispod nekog nivoa, prelazi se na niži napon korišćen kod IV metode. Usložnjavanje postupka punjenja je opravdano zbog skraćivanja ukupnog vremena punjenja. Na slici 1.8 prikazani su karakteristični dijagrami za navedene dve metode.



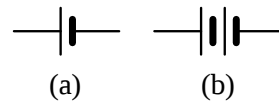
Slika 1.8. Krive punjenja olovnih akumulatora: a) IV metoda, b) IVV metoda.

Kod NiCd i NiMH akumulatora takođe se može primeniti konstantna struja za punjenje, međutim postoji izvesna nesigurnost u određivanju kraja procesa punjenja. Ranije su predlagali punjenje do proračunatog vremena - pri čemu se podrazumevalo da je akumulator bio potpuno prazan na početku punjenja. Danas se primenjuje metoda dv/dt - što polazi od toga da na kraju punjenja prestaju povoljni hemijski procesi i time stane i dalji porast napona akumulatora. Kada se ispuni uslov $dv/dt \leq 0$, punjač treba automatski da se isključi.

Suve ćelije, kao što je rečeno, ne mogu se puniti. Najvažniji tehnički podaci za njih su nazivni napon, kapacitet (daje se samo u detaljnijim opisima) i dimenzije. Jedan deo njih se optimizuje na kratkotrajna ali velika opterećenja. To su takozvani „heavy-duty” tipovi koji se koriste u prenosnim radio prijemnicima, magnetofonima itd. Nasuprot tome kod „long-life” tipova najvažniji je dugačak radni vek (nekoliko godina) pri maloj potrošnji. Ovaj tip se primenjuje u časovnicima, daljinskim upravljačima televizora itd.

Grafičke oznake hemijskih izvora su date na slici 1.9.

Slika 1.9. a) Akumulator ili suva ćelija od jedne ćelije, b) baterija izrađena od više suvih ćelija ili od više akumulatorskih ćelija.



1.1.6. Hladnjaci

Hladnjaci su elektromehaničke komponente. Uloga im je da sačuvaju druge komponente velike snage od pregrevanja. Preuzetu toplotu izbacuju u okolinu (obično u okolni vazduh). Redovno se prave od aluminijuma uz odgovarajuće oblikovanje da se dobije velika površina (rebrasti profili).

Za hladnjake najvažniji podaci su toplotna otpornost i dimenzije. Toplotna otpornost se računa po formuli:

$$R_T = \frac{\Delta T}{P} \dots\dots\dots(1.13.)$$

gde je:

- ΔT – priraštaj temperature hladnjaka,
- P – snaga predana hladnjaku.

Hladnjak se mora tako dimenzionisati da temperatura elementa koji se hladi ne poraste iznad dozvoljene vrednosti. Treba poći od najviše moguće temperature okoline i treba uzeti u obzir i unutrašnje priraštaje temperature komponente koja se hladi. Po potrebi - efekat hlađenja se može pojačati dogradnjom ventilatora ili cirkulacijom tečnog medijuma kroz hladnjak.

U većini slučajeva - komponenta koja se hladi ne sme da bude u galvanskoj vezi sa hladnjakom. Ranije je za izolaciju korišćen liskun pošto je on dobar električni izolator - a ujedno i dobar provodnik toplote.

Zbog loših mehaničkih osobina (krtost) - danas se umesto liskuna koristi silikonska guma. Zahvaljujući svojoj elastičnosti, silikonska guma već pod laganim pritiskom ispunjava neravnine na kontaktnim površinama hladnjaka i elementa koji se hladi. Takođe je prednost da se efekat hlađenja ne kvari ni nakon velikog broja ciklusa grejanja i hlađenja - isto se ne može reći za liskuna.

Ako je moguće, hladnjak treba postaviti van kutije uređaja (može da se koristi kao jedan zid kutije), inače se može očekivati pregrevanje celog uređaja. Alternativno rešenje je da se obezbedi kanal za prolaz vazduha za hlađenje kroz kutiju (praveći odgovarajuće rupe).

Hladnjaci se obično ne obeležavaju na električnim šemama.

1.1.7. Prekidači

Uloga prekidača je modifikacija električnih kola po potrebi (povezivanje ili razdvajanje izvesnih tačaka). Upravljanje sa njima može biti mehaničko (pritiskom, povlačenjem...), elektromagnetom (sopstvenom ili spoljnom strujom), pod uticajem temperature (reagovanje na sopstveno grejanje ili spoljno grejanje), ili elektronsko (solid-state releji).

Osnovni podaci kod prekidača su broj polova i broj položaja, opteretljivost i parametri upravljanja. Pol je pokretni deo prekidača koji može da spaja određene izvode prekidača. Kod prostijih prekidača postoji samo jedan pol ali za istovremeno obavljanje složenijih funkcija prekidanja prave se višepolni prekidači.

Broj položaja definiše u koliko različitih položaja se može dovesti pol. U većini slučajeva nakon prebacivanja prekidači ostaju u novom položaju, inače je reč o tasteru.

U vezi opteretljivosti navode se izvesni naponi i struje. Što se tiče napona, važno je koliki napon može da izdrži prekidač u toku isključivanja i u isključenom stanju. U vezi struje - potrebno je znati termičku struju (vrednost koju prekidač može da toleriše u uključenom stanju) i struju prekidanja (struja koja može da postoji pre isključivanja odnosno u toku isključivanja).

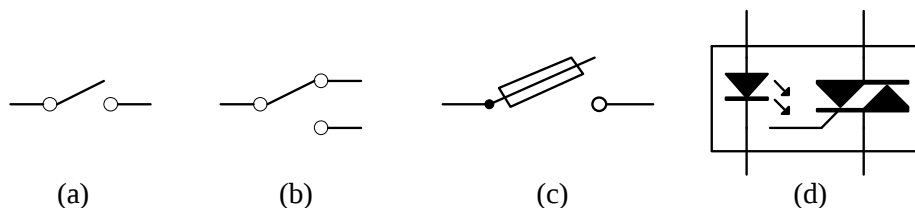
Bitno je znati da i u pogledu napona i u pogledu struje važe bitno drugačiji podaci pri naizmeničnoj i pri jednosmernoj struji za isti prekidač. Mnogo je lakše prekinuti naizmničnu struju jer električni luk koji se javlja između kontakata u toku prekidanja - prirodno se gasi pri prolascima naizmnične struje kroz nulu - što nije slučaj kod jednosmerne struje. Iz ovog razloga naizmnična opteretljivost prekidača je uvek daleko veća od jednosmerne.

Mehanički prekidači se mogu aktivirati prebacivanjem, potiskivanjem, povlačenjem, okretanjem itd.

Kod elektromagnetnih prekidača (releji, kontaktori, zaštitni prekidači) treba zadati struju, napon i otpornost namotaja koji vrši upravljanje. Treba znati da li se upravljanje vrši jednosmernom ili naizmničnom strujom.

Namotaji elektromagnetnih prekidača koji se upravljaju naizmničnom strujom su manji od onih za jednosmernu struju. U toku aktiviranja krene velika struja kroz namotaj zbog male impedanse namotaja. U toku uključivanja zatvori se jezgro namotaja, poraste impedansa i pobudna struja padne na malu vrednost (koju prekidač može da izdrži trajno).

Pri upravljanju jednosmernom strujom vrednost struje se ne menja u toku uključivanja, namotaj se dimenzioniše tako da može trajno da izdrži veliku struju koja je potrebna za uključivanje.



Slika 1.10. Grafički simboli za prekidače: a) jednopolni prekidač, samo radni kontakt, b) jednopolni dvopoložajni (naizmnični prekidač, c) elektromagnetni prekidač (osigurač), d) soli-state relej.

Kod svakog elektromagnetnog prekidača postoji izvestan histerezis u upravljanju: potreban je znatno veći signal za aktiviranje nego što je potrebno za održavanje stanja. U ovom pogledu problemi se obično pojavljuju pri isključivanju: ako upravljački signal ne padne baš na nultu vrednost, prekidač može (greškom) da ostane u uključenom stanju.

Kod elektronskih prekidača struju ne prenose mehanički kontakti već se otvara/zatvara izvestan poluprovodnički kanal. Pošto i tu ima potrebe za galvanskim odvajanjem kanala od upravljačkog signala, obično se koristi optička sprega.

S obzirom da postoji velik broj različitih vrsta prekidača, koristi se i veliki broj grafičkih oznaka. Nekoliko njih je prikazano na slici 1.10.

1.1.8. Elementi za spajanje

Pod elementima za spajanje se podrazumevaju različiti elektronski elementi čija uloga je da omogućavaju električno sprezanje i raspresanje između određenih delova uređaja. Tu ubrajamo redne stezaljke, konektore, utikače itd.

Redne stezaljke su metalni kontakti sa vijakom zaliveni u plastični nosač. Kod nekih postoje izvodi za lemljenje, kod nekih ne. Njihova uloga je da unutrašnje ožičenje uređaja učine lakšim i pouzdanijim.

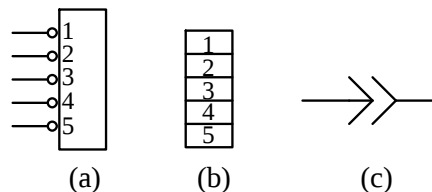
Konektori se sastoje iz metalnih vrhova ili čaura koji su zaliveni u plastični nosač. Tako formirane komponente se leme u štampanu ploču ili se montiraju na kabel. Sastavljanjem dela sa vrhovima i dela sa čaurama možemo međusobno spajati štampane ploče, kabel sa štampanom pločom, itd.

Utikači omogućavaju spajanje određenih tačaka jedno po jedno. I ovi se sastoje od metalnih vrhova i čaura ali su znatno masivnije izvedbe. Obično se koriste za povezivanje instrumenata u merno kolo.

Osnovni podaci u vezi elemenata za spajanje su broj kontakata (vrhovi ili čaure), dimenzije i opteretljivost u pogledu napona i struje. Struja je limitirana zagrevanjem usled prelazne otpornosti kontakata a napon je određen probojnim naponom plastičnog nosača.

Razni grafički simboli koji se koriste za elemente za spajanje prikazani su na slici 1.11.

Slika 1.11. Grafički simboli elemenata za spajanje: a) konektor, b) redna stezaljka, c) utikač.



1.1.9. Osigurači

U vanrednim situacijama (preopterećenje, kratak spoj) u elektronskim uređajima se pojavljuju prevelike struje. Te prekostruje mogu da stvaraju značajne probleme za uređaj i okolinu, može da nastupi i požar.

Protiv prekostruja uređaj se može zaštititi primenom osigurača. Zaštita se ostvaruje na taj način što osigurač u kritičnom momentu odvoji potrošač od izvora energije. Treba odmah naglasiti da osigurači ne mogu da se koriste za tačno ograničenje struje odnosno snage jer postoje velike tolerancije među krivama okidanja pojedinih osigurača. Takođe je važno napomenuti da je okidanje osigurača relativno spor proces sem ako je prekostruja višestruka od nazivne (kratak spoj).

Iz sporosti okidanja sledi da se osigurači ne mogu koristiti za zaštitu poluprovodničkih komponenti - ali uspešno štite štampane veze, ožičenja, prekidače, konektore i druge elektromehaničke komponente.

Na osnovu principa rada razlikujemo: topljive, elektromagnetne i termičke osigurače.

Aktivni deo kod topljivih osigurača je jedna tanka nit koja se usled prekostruje pregreje i istopi i time prekine strujni krug u kome se nalazi. Vreme reagovanja (topljenja) se može fabrički podešavati zato razlikujemo brze, obične i spore osigurače koji se redom obeležavaju slovima F, M i T. Brzi osigurači pružaju bolju zaštitu ali kod potrošača kod kojih se regularno pojavljuju

prekostruje nakon uključivanja (motor, transformator, prekidačko napajanje) neophodno je koristiti spore osigurače.

Što se tiče mehaničke izvedbe topljivih osigurača, postoje staklene, porculanske i pločaste izvedbe. Kod staklenih osigurača nit se namesti duž osovine jedne staklene cevčice čiji krajevi se zatvaraju metalnim kapicama. Slične konstrukcije su i osigurači predviđeni za površinsku montažu s tim da se koristi keramičko telo i dimenzije su znatno manje. Stakleni osigurači se ili montiraju na elastične metalne nosače u štampanoj ploči ili se postavljaju u plastična kućišta montirana na zid kutije.

Telo porculanskih osigurača je vretenastog oblika, aktivni deo se nalazi duž osovine, krajevi su zatvoreni sa metalnim kapicama. Obično se primenjuju u energetici jer se na ovaj način mogu proizvesti osigurači za veliki napon i veliku struju.

Pločaste osigurače najviše primenjuju u industriji automobila. Dve pločice koje ujedno čine izvođe povezuju sa tankom provodnom trakom, a zatim se sve to zalije u plastično kućište. Ovako dobijeni osigurači su relativno sporog okidanja, pogodni su za niske napone i velike struje.

Elektromagnetni osigurači su u stvari prekidači koji se isključuju sopstvenom strujom. Vrlo su popularni jer nakon aktiviranja mogu se ponovo vratiti u radni položaj (ništa ne pregori) i ujedno mogu da služe i kao prekidači za uključivanje/isključivanje uređaja (mada ne mogu da podnesu toliki broj prekidanja kao pravi prekidači).

Termičkih osigurača ima dve vrste: topljive i bimetalne izvedbe. Topljivi termički osigurači sadrže specijalnu leguru koja se topi na tačnoj temperaturi i tako prekida strujni krug. Ugrađuju se u namotaje transformatora i motora, nameštaju se pored grejača i na taj način pružaju zaštitu od pregrevanja.

Aktivni deo bimetalnih termičkih osigurača čini jedno parče lima presovano od dve vrste metala. Usled različitog termičkog koeficijenta širenja, pri promeni temperature, dolazi do deformacije lima. Na određenoj temperaturi deformacija bude tog nivoa da se prekinu kontakti vezani na lim i time se prekine strujni krug. Lim može da se greje usled struje kroz njega (u slučaju zaštite motora) ili od okoline (zaštita grejača).

Za razliku od drugih osigurača termički osigurači isključuju pri dosta tačnoj vrednosti struje odnosno temperature. Kod bimetalnih osigurača redovno postoji i mogućnost podešavanja praga isključivanja.

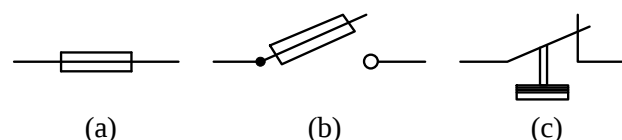
Pored dimenzija osnovni tehnički podaci za osigurače su nazivna vrednost struje i napona (kod termičkih osigurača i temperatura). Nazivnu struju osigurači mogu da izdrže trajno, reagovanje se dešava iznad te struje. Vreme reagovanja zavisi od veličine prekostruje što se daje u vidu dijagrama

Nazivni napon predstavlja maksimalnu vrednost napona koju osigurač može da trpi u toku prekidanja strujnog kola. U slučaju pogrešnog dimenzionisanja može da se desi da pri prekidu niti struja nastavi da teče kroz nastali električni luk. Tako nastaju veliki gubici što dovodi do razaranja tela osigurača i razorno dejstvo može da se proširi i na okolinu.

I kod osigurača važi primedba koja je data kod prekidača: mnogo lakše se prekida naizmenični strujni krug pošto se u tom slučaju luk prirodno gasi pri prolascima naizmenične struje kroz nulu. Osigurači konstruisani za veliki jednosmerni napon su zato nesrazmerno veliki.

Grafički simboli za razne tipove osigurača su dati na slici 1.12.

Slika 1.12. Grafički simboli osigurača: a) topljivi osigurač, b) elektromagnetni osigurač, c) bimetalni osigurač.



1.1.10. Senzori

Senzori su komponente koje primaju i pretvaraju neelektrične signale sredine u kojoj se nalaze. Veličina koju treba detektovati i pretvarati može biti temperatura, pomeraj (translacija, rotacija, istezanje), pritisak, svetlost ili drugo elektromagnetno zračenje, magnetno polje itd.

Temperatura je verovatno najčešće merena neelektrična veličina zato je razvijeno puno tipova senzora. Tu spadaju neki NTC i PTC otpornici (videti tačku 1.1.1) i termoparovi. Termoparovi se sastoje od dve žice različitog hemijskog sastava. Po jedan kraj od tih žica se spoji zavarivanjem a između slobodnih krajeva se može meriti napon koji je srazmeran razlici temperature između spojenih i slobodnih krajeva. Obrada signala termopara zahteva veliku pažnju jer dobijeni napon je vrlo male vrednost.

Za postizanje i održavanje jedne temperature mogu se primeniti i bimetalni sklopovi.

Detekcija pomeraja može da se ostvari kontinualnim i diskretnim (digitalnim) senzorima. Potenciometri daju kontinualan signal (promena otpornosti). Slična je situacija i kod nekih induktivnih senzora. Kod njih pri pomeranju senzorskog kalema ili pri pomeranju nekog metalnog dela u blizini senzorskog kalema dolazi do promene neke električne veličine (napon, frekvencija) u strujnom kolu kalema. Po potrebi izlaz induktivnog senzora može da se digitalizuje (uključivanje/isključivanje u određenoj poziciji).

Merne trake se formiraju od tankih metalnih traka koji se čvrsto zalepe na određenu metalnu površinu. Pri elastičnoj deformaciji metalnog dela pod uticajem sile dolazi do promene otpornosti trake. Veličina promene je izuzetno mala zato obrada dobijenih signala zahteva primenu preciznih kola. Glavna oblast primene mernih traka su elektronske vage.

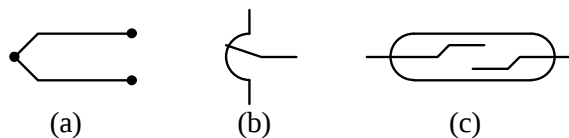
Enkoderi su senzori pomeraja sa digitalnim izlazom. Svetlosni mlaz opipava linije odnosno tamne i svetle površine sa optičkog diska i dobijeni rezultat se pretvara u brojni kod. Glavna oblast primene su delovi za pozicioniranje kod alatnih mašina i mašinski merni instrumenti sa digitalnim prikazivanjem rezultata.

Senzori svetlosti se redovno prave na bazi poluprovodnika. Upadajuća svetlost modifikuje broj slobodnih nosilaca ili utiče na unutrašnje električno polje što spolja gledano prouzrokuje promenu otpornosti, struje odnosno napona. Koriste se mnogi različiti senzori svetlosti u alarmnoj tehnici, ali ima i drugih primena, na primer uključivanje/isključivanje javne rasvete, zaštita rukovaoca kod opasnih mašina - itd.

Pod uticajem magnetnog polja rade reed-prekidači i Hall-ove sonde. Reed prekidači su metalni kontakti od feromagnetnog materijala zatopljeni u staklenu cevčicu. U prisustvu magnetnog polja - kontakti se privuku i zatvaraju spoljašnji strujni krug. Magnetno polje redovno potiče od stalnog magneta. Uz pomoć tih senzora rade digitalni merači brzine na biciklima, neki granični prekidači, detektori rotacije itd.

Kod Hall-ovih senzora propušta se - struja kroz jednu poluprovodničku pločicu. U prisustvu magnetnog polja pojavljuje se napon između dve - ivice pločice. Na tom principu mogu se meriti magnetna polja električnih mašina, ali se može ostvariti i beskontaktno merenje struje. Grafički simboli nekih senzora su dati na slici 1.13.

*Slika 1.13. Grafički simboli za različite senzorske komponente:
a) termopar, b) detektor položaja sa potenciometrom, c) reed-prekidač.*



1.1.11. Provodnici i kablovi

Za unutrašnje ožičenje, motanje i spoljno povezivanje uređaja koriste se razni provodnici i kablovi. Provodni deo se skoro isključivo pravi od bakra, eventualno se površina pocinkuje (Zn) ili posrebr (Ag). Kao izolacioni materijal koristi se lak, PVC, polietilen, guma i ponekad svila i papir.

Žice sa lak izolacijom se uglavnom koriste za namotaje električnih mašina. Lak je dobar električni izolator, podnosi dosta visoke temperature, na žalost mehanički je jako osetljiv pošto se koristi vrlo tanak sloj laka. Ipak ove žice su najbolje za namotavanje jer omogućavaju racionalno korišćenje prostora za motanje (izolacioni sloj zauzima samo mali deo preseka), takođe preko njih se ostvaruje efikasan prenos toplote iz unutrašnjosti električnih mašina.

PVC izolacija je jeftina, elastična i veliki joj je probojni napon. Nedostatak je što se PVC već na 70°C omekša a oko 0°C je već jako krut, lomljiv. Takođe je nedostatak što su joj veliki dielektrični gubici na visokim frekvencijama, zato se ne može koristiti u radiotehnici. Gubici polietilena su znatno manji, zato se na primer izolacija antenskih kablova pravi od polietilena.

Prednost gumene izolacije je što izdržava visoke temperature i ne gubi elastičnost u širokom temperaturnom području.

Osnovni tehnički podaci u vezi kablova su: broj žila (provodnika), presek provodnika, sastav i konstrukcija izolacionog sistema. Provodnici se mogu praviti od pune žice i od licni. Licnasti kablovi se mnogo lakše savijaju i oblikuju i teže se lome. Presek kabla može biti okrugao ili pljosnat (trakasti kablovi). Za prenos osetljivih signala koriste se širmovani kablovi. Kod tih kablova ispod spoljne izolacije nalazi se metalni plašt koji prigušuje razne smetnje.

1.1.12. Kutija uređaja

U većini slučajeva, elektronski uređaji se ugrađuju u kutiju koja, sa jedne strane, pridržava i fiksira određene blokove i komponente, a sa druge strane, pruža zaštitu od mehaničkih oštećenja, prašine, hemikalija i stranih polja. Kutija se može napraviti od metala ili od plastike. Prednost plastike je što obezbeđuje besplatnu izolaciju što čini suvišnim druge metode zaštite od opasnog napona dodira. Mana je što većina plastičnih materijala se omekša pri porastu temperature, loše odvođe toplotu nastalu u kutiji i postoji opasnost od požara.

Metalne kutije (čelik ili aluminijum) bolje podnose mehanička opterećenja i povišene temperature. Kod njih obavezna je primena zaštitnog uzemljenja. Pri unutrašnjoj montaži - mora se paziti da se delovi uređaja pod opasnim naponom ne smeste blizu metalnih delova kutije.

Pri montaži - delovi uređaja se mogu fiksirati direktno na zidove kutije ili na neki ram ili šine. Poželjno je držati se pravila da spolja treba da su pristupačni samo oni vijci koji služe za otvaranje kutije.

Kod velikoserijskih proizvoda proizvođači konstruišu svoju kutiju ili im to konstruiše neko drugi. Kod pojedinačnih i maloserijskih proizvoda na raspolaganju je veliki izbor gotovih tipskih kutija. U slučaju skromnijih zahteva, uz pomoć odgovarajućih alata za sečenje i savijanje lima kutija se može napraviti i u kućnoj režiji.

1.2. AKTIVNE KOMPONENTE

Nastajanje i razvoj elektronike su omogućili aktivni elementi. Prvo su se pojavile elektronske cevi i vladale su u elektronici u prvoj polovini XX veka. Njihovo korišćenje su ograničavali veliki gabariti i značajna potrošnja.

U međuvremenu je uloženo puno truda u razvoj poluprovodničkih sklopova ali komponenta koja je mogla vršiti kontrolisano prekidanje i pojačanje je iznađena tek posle drugog svetskog rata (1946). Ta komponenta je bila bipolarni tranzistor, i ona je u primeni sve do danas. Nakon tog pronalaska usledila je serija drugih pronalazaka iz kojih su proizašli tiristori i razne varijante tranzistora sa efektom polja.

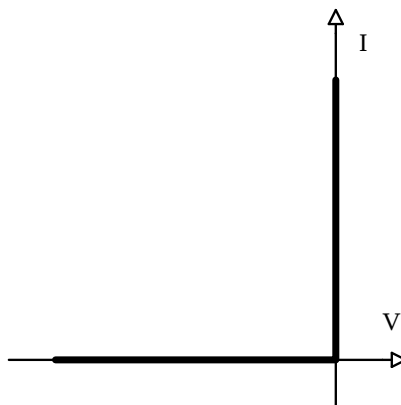
Pored diskretnih elemenata ubrzo se razvijala i integrisana tehnika (počev od 1958. godine), gde se na jednoj poluprovodničkoj pločici može napraviti i povezati veći broj aktivnih i pasivnih komponenti. Zahvaljujući integrisanoj tehnici, postignuta je značajna minijaturizacija, što je omogućila razvoj i primenu novih, složenih kola. U ovom delu će se napraviti kratak pregled važnijih diskretnih elemenata.

1.2.1. Dioda

Poluprovodničke diode su svoj naziv nasledile od elektronskih cevi slične namene, sa dve elektrode. Dioda ne mogu da vrše pojačanje signala (struja, napon), ali u ograničenom smislu mogu da vrše prekidanje. Preciznije rečeno, grana električnog kola koja sadrži diodu postaje jednosmerna. Mnoge primene su upravo bazirane na tom svojstvu (usmerači, limiteri napona, demodulatori).

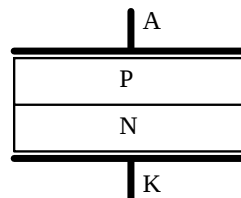
U idealnom slučaju karakteristika diode se sastoji iz dve poluprave (slika 1.14). Od dva moguća smera, dioda u jednom smeru (direktni smer) propušta struju i pri tome ispoljava zanemarljivi pad napona. U drugom smeru (inverzni smer) ne može da potekne značajna struja, bez obzira na primenjeni napon.

Slika 1.14. Strujno-naponska karakteristika idealne diode.



Poluprovodnička dioda je dvoslojne strukture (slika 1.15) koja se formira tako da se u jedan deo poluprovodničke pločice (P sloj) dodaju primesni atomi, čiji je broj valentnih elektrona manji od broja valentnih elektrona polaznog poluprovodnika, dok se u drugi deo (N sloj) dodaju atomi sa većim brojem valentnih elektrona. U P sloju - na mestu valentnih elektrona - postoji manjak elektrona, što odgovara pozitivnom naelektrisanju (šupljina), isto može da se pomera pod uticajem električnog polja i može da učestvuje u provođenju električne struje. U N delu postoje slobodni elektroni koji takođe mogu da provode struju.

Slika 1.15. Struktura poluprovodničke diode.



Povezivanjem diode u spoljno kolo struja može da potekne od P sloja prema N sloju, a u suprotnom smeru ne može da dođe do proticanja struje. To se objašnjava time što električno polje usmereno od P dela prema N delu može da prebaci šupljine u N oblast i elektrone u P oblast, a pri suprotnom smeru električnog polja ne postoje nosioci koji bi prelazila preko granične oblasti (PN spoj). Postojeći nosioci naelektrisanja pod uticajem spoljnog polja će se u ovom slučaju udaljiti od granične oblasti. Time se objašnjava usmeračko dejstvo diode.

Nakon dopiranja primesnim atomima, na poluprovodničku pločicu se priključe izvodi (na P deo se priključuje anoda – A, na N deo katoda – K) i ugrade je u odgovarajuće kućište.

Strujno-naponska karakteristika poluprovodničke diode je eksponencijalna, može se opisati sledećom formulom:

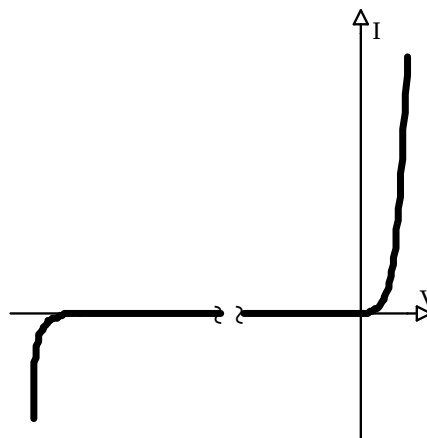
$$I = I_S (e^{\frac{V}{\eta V_T}} - 1) = I_S (e^{\frac{qV}{\eta kT}} - 1) \dots\dots\dots(1.14.)$$

gde je:

- I_S – struja zasićenja,
- η – faktor koji zavisi od primenjenog poluprovodnika (konstanta),
- V_T – termički napon,
- q – naelektrisanje elektrona,
- k – Boltzmann-ova konstanta,
- T – apsolutna temperatura.

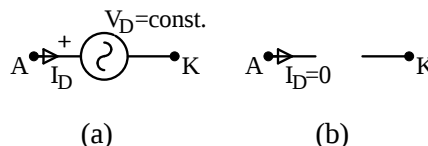
Stvarna karakteristika je prikazana na slici 1.16. Obično se smatra da je ova karakteristika dobra aproksimacija idealne karakteristike - sa slike 1.14. U inverznom smeru struja je zaista zanemarljiva ($I = -I_S \approx 0$), međutim u direktnom smeru neophodno je uzeti u obzir konačan prag otvaranja odnosno pad napona (obično spada u opseg od 0,5 V do 1 V). U slučaju velikog inverznog napona kod stvarne diode se pojavljuje proboj (slika 1.16).

Slika 1.16. Stvarna karakteristika poluprovodničke diode.



Pri približnoj analizi elektronskih kola sa diodama koriste se modeli dati na slici 1.17. U direktnom smeru pad napona se uzima u obzir sa naponskim generatorom konstantnog napona (V_D), nezavisno od vrednosti struje, dok u inverznom smeru prosto prekidamo granu koja sadrži diodu. Smer polarizacije diode (direktan ili inverzan) treba odrediti iz preostalog dela kola. Na visokim frekvencijama odnosno u prekidačkom režimu treba uzeti u obzir parazitne kapacitivnosti poluprovodničkih slojeva i konačno vreme uključivanja/isključivanja.

Slika 1.17. Približni mrežni modeli za diode: a) u provodnom stanju, b) u zakočenom stanju.

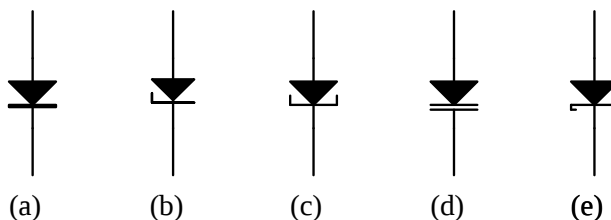


Pored osnovne varijante poluprovodničke diode razvijeno je i nekoliko posebnih vrsta. To su: Zener-ova dioda, tunel dioda, varikap dioda i Schottky-jeva dioda. Grafički simboli za razne diode su dati na slici 1.18.

Zener-ova dioda je predviđena da trajno radi u probnoj oblasti, naravno inverznu struju odnosno snagu gubitaka (proizvod napona i struje) treba ograničiti. Pošto je probni napon relativno stabilne vrednosti, Zener-ove diode su pogodne za formiranje izvora referentnog napona ali mogu da se koriste i za ograničenje napona (zaštita od prenapona).

Karakteristika tunel diode nije monotono rastuća, već sadrži jedan segment sa negativnom diferencijalnom otpornošću. Zahvaljujući negativnoj otpornosti sa tunel diodom se mogu konstruisati oscilatori, modulatori itd. za visoke učestanosti.

Slika 1.18. Grafički simboli za razne diode: a) obična dioda, b) Zener-ova dioda, c) tunel dioda, d) varikap dioda, e) Schottky-jeva dioda. Kod svih oznaka gornji kraj je anoda.



Kod varikap dioda iskorišćava se pojava da kapacitivnost između slojeva poluprovodnika zavisi od primenjenog inverznog napona. Varikap diode se koriste za podešavanje uređaja, za nameštanje frekvencije.

Umesto dva sloja poluprovodnika Schottky-jeve diode se sastoje od sloja metala spojenog sa slojem poluprovodnika. Ovom konstrukcijom može se otprilike prepoloviti pad napona na diodi, što kod primena za velike struje donosi značajnu uštedu. U drugim slučajevima ista osobina omogućava efikasniju limitaciju napona nego što je moguće sa diodom sa PN spojem. Nedostatak strukture metal-poluprovodnik je što se ne mogu realizovati komponente sa velikim inverznim probnim naponom.

Osnovni tehnički podaci za diode su:

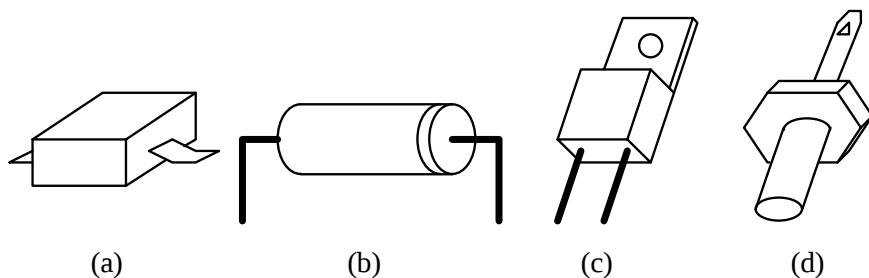
- Radna struja (srednja vrednost - I_{FAV} , ili efektivna vrednost - I_{FRMS}) je ona vrednost struje koju dioda može trajno da izdrži pri izvesnoj temperaturi kućišta.

- Dioda se kratkotrajno može opteretiti sa vršnom strujom, koja je obično za red veličine veća od radne struje. Detaljniji katalogi posebno daju ponavljajuću (I_{FRM}) i jednostruku vršnu vrednost struje (I_{FSM}).

- Probni napon (V_{BR}) je najveći napon do kojeg dioda može da se primenjuje.

- Pri naglom prelasku iz direktnog smera u inverzni, kroz diodu može u kratkom vremenu da protekne značajna struja dok se ne isprazne svi nosioci naelektrisanja iz okoline PN spoja. To kratko vreme naziva se vreme oporavka diode (t_{rr}). Po ovom kriterijumu diode delimo na obične, brze i ultrabrze.

U zavisnosti od struje, napona i oblasti primene poluprovodničke diode se ugrađuju u razna kućišta, od koji je nekoliko prikazano na slici 1.19.



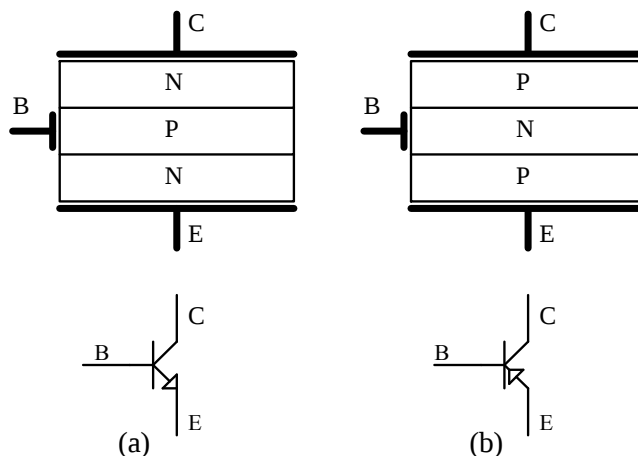
Slika 1.19. Razni oblici kućišta za diode: a) kućište za površinsku montažu SOD-123, b) aksijalno kućište DO-41, c) plastično kućište TO-220AC, d) metalno kućište DO-4 sa navojem.

1.2.2. Bipolarni tranzistori

Bipolarni tranzistor je istorijski gledano prva poluprovodnička komponenta koja primenom kontrolnog signala u pomoćnom strujnom kolu može postepeno ili skokovito da menja struju u glavnom strujnom kolu. Sam naziv tranzistor je engleska kovanica (transfer+resistor) što upućuje na kontrolabilnu otpornost. Atribut bipolarni (koji se često i izostavlja) je u upotrebi jer obe vrste nosioca naelektrisanja (elektroni i šupljine) igraju značajnu ulogu u radu bipolarnog tranzistora.

Po strukturi bipolarni tranzistor je troslojna komponenta. Drugačije rečeno, sadrži dva PN spoja kod kojih je jedan od slojeva (baza – B) zajednička. Spoljašnji slojevi čine emitor (E) i kolektor (C). Pošto je baza tanka, između navedenih PN spojeva postoji međusobni uticaj, struja jednog PN spoja modifikuje struju drugog PN spoja.

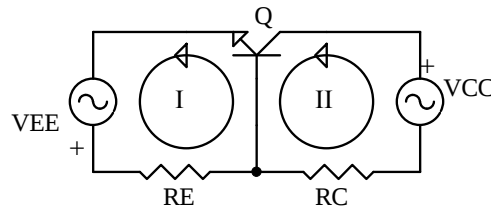
Slojevi poluprovodnika P i N tipa se mogu poredati na dva načina u strukturi tranzistora: tako postoji NPN i PNP tranzistor. Dva moguća rešenja sa svojim grafičkim simbolima su prikazana na slici 1.20. Karakteristike NPN tranzistora su redovno bolje zato se češće koriste u praksi. Postoje međutim elektronska kola koja su rešiva samo PNP tranzistorima ili primenjuju obe vrste tranzistora.



Slika 1.20. a) Struktura i simbol NPN tranzistora, b) struktura i simbol PNP tranzistora. Tu su izvodi označeni odgovarajućim slovima, to kasnije neće se praktikovati.

Tipičan način polarizacije NPN tranzistora je dat na slici 1.21. Po navedenoj šemi spoj kolektor-baza (CB) je inverzno polarizovan odakle bi sledilo da ne provodi struju odnosno da u glavnom strujnom kolu nema struje. To će i važiti sve dok ne pokrenemo struju u pomoćnom strujnom kolu. Pri pozitivnoj polarizaciji spoja BE krene pomoćna struja, dovode se nosioci naelektrisanja u blizinu spoja kolektor-baza što dovodi do nastanka glavne struje.

Slika 1.21 Uobičajeni način polarizacije NPN tranzistora:
I – u pomoćnom strujnom kolu, II - u glavnom strujnom kolu.



Postepenom promenom struje u pomoćnom strujnom kolu struja u glavnom strujnom kolu se takođe menja postepeno (to je takozvani linearni ili pojačavački režim) - a skokovita promena dovodi do uključivanja/isključivanja glavne struje (prekidački režim). U oba slučaja snaga signala primenjenog u pomoćnom strujnom kolu je za redove veličina manja od snage regulisane u glavnom strujnom kolu.

Osnovni problem oko matematičkog opisivanja tranzistora je da treba dati vezu između tri napona (V_{BE} , V_{CB} , V_{CE}) i tri struje (I_C , I_E , I_B). Olakšavajuća okolnost je da su samo po dva napona i dve struje međusobno nezavisne, treća se uvek može izraziti kao zbir ili razlika prve dve.

Od raznih matematičkih modela za opisivanje tranzistora zlatnu sredinu (u pogledu složenosti i tačnosti) čine Ebers-Moll-ove jednačine. Za NPN tranzistor te jednačine su sledeće:

$$I_E = I_{SE} (e^{\frac{V_{BE}}{\eta V_T}} - 1) - \alpha_R I_{SC} (e^{\frac{V_{BC}}{\eta V_T}} - 1) \dots\dots\dots (1.15.)$$

$$I_C = -I_{SC} (e^{\frac{V_{BC}}{\eta V_T}} - 1) + \alpha_F I_{SE} (e^{\frac{V_{BE}}{\eta V_T}} - 1) \dots\dots\dots (1.16.)$$

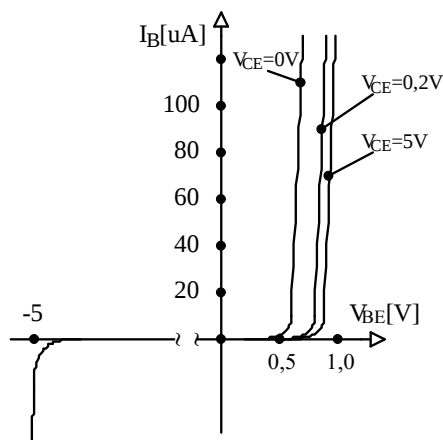
gde je:

- I_{SE} – struja zasićenja spoja BE,
- I_{SC} - struja zasićenja spoja BC,
- α_F - faktor strujnog pojačanja od emitora prema kolektoru,
- α_R – faktor strujnog pojačanja od kolektora prema emitoru.

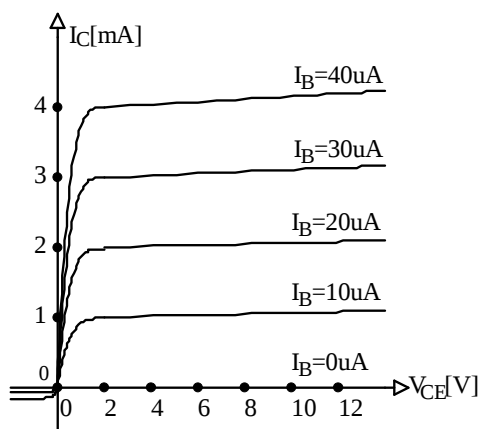
Odgovarajućim promenama predznaka jednačine (1.15) i (1.16) se mogu primeniti i na PNP tranzistor. Prvi članovi na desnim stranama jednačina daju struje odgovarajućeg PN spoja za slučaj da ne postoji međusobni uticaj PN spojeva, dok drugi članovi upravo potiču od međusobnog uticaja (tranzistorski efekat).

Pri grafičkom prikazivanju navedenih jednačina ne može se govoriti o krivama nego o familijama krivih. Oblik krivih zavisi od toga, između kojih promenljivih se prikazuje veza, ali i od toga koji izvod se smatra za ulaz, izlaz i referentnu tačku. Slika 1.22 prikazuje tipičnu familiju ulaznih karakteristika a na slici 1.23 su izlazne karakteristike. U oba slučaja emitor je uzet za zajedničku tačku u pomoćnom i glavnom strujnom kolu. U ovakvom slučaju govorimo o vezi tranzistora sa zajedničkom bazom. Na sličan način se može formirati i veza sa zajedničkim kolektorom i zajedničkom bazom.

Slika 1.22. Ulazne karakteristike NPN tranzistora (za jedan tipičan tranzistor za male signale).



Slika 1.23. Izlazne karakteristike NPN tranzistora (za jedan tipičan tranzistor za male signale).



Iz složenosti tranzistora proizilazi da se u toku eksploatacije mogu razlikovati različiti radni režimi. Za potrebe pojačanja tranzistor se dovodi u aktivni režim. Preduslov za aktivni režim je direktna polarizacija spoja BE i inverzna polarizacija spoja BC. U aktivnom režimu važi približno linearna veza između struje kolektora i struje baze:

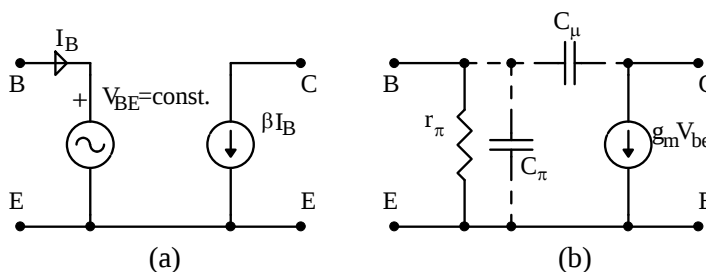
$$I_C = \beta I_B \dots\dots\dots(1.17.)$$

gde je:

β – faktor strujnog pojačanja od baze prema kolektoru.

Napon V_{BE} je približno konstantne vrednosti u celom aktivnom režimu. Po tome u aktivnom režimu za približni proračun tranzistorskih kola možemo koristiti mrežne modele prikazane na slici 1.24 (modeli za velike i male signale). Pri upotrebi tranzistora na visokim frekvencijama potrebno je uzeti u obzir i parazitne kapacitivnosti između slojeva poluprovodnika što je na slici 1.24.b naznačeno isprekidanom linijom.

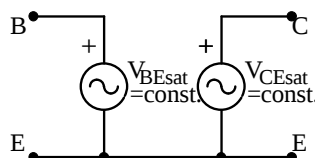
Slika 1.24. Mrežni modeli bipolarnog tranzistora: a) za velike signale i b) za male signale (hibridni- π ili Giacoletto-ov model).



Granice aktivnog režima čine zasićenje i zakočenje. Inverznom polarizacijom spoja BE (pretpostavimo da je spoj BC već ranije bio inverzno polarizovan zbog aktivnog režima) pomoćna struja padne na nulu i govorimo o zakočenju. U ovakvom slučaju celo modelovanje se svodi na odstranjivanje tranzistora iz kola pošto su mu sve struje približno nulte vrednosti.

Tranzistor ulazi u zasićenje ako mu se oba PN spoja direktno polarišu. U takvom slučaju se može smatrati da su padovi napona na PN spojevima približno konstantne vrednosti a struje su određene spoljašnjim elementima. Treba da važi nejednakost $I_C < \beta I_B$. Odgovarajući mrežni model je dat na slici 1.25.

Slika 1.25. Mrežni model tranzistora u slučaju zasićenja. Referentni smerovi su odabrani za NPN tranzistor.



Ako se tranzistor naizmenično nalazi u zasićenju i zakočenju i čini brze prelaze preko aktivnog režima, govorimo o prekidačkom režimu. U prekidačkom režimu rade tranzistori u digitalnoj tehnici i u energetskej elektronici.

Inverzni aktivni režim nastupa ako, u odnosu na aktivni režim, emitor i kolektor zamene mesta. Ovakva kombinacija se retko primenjuje.

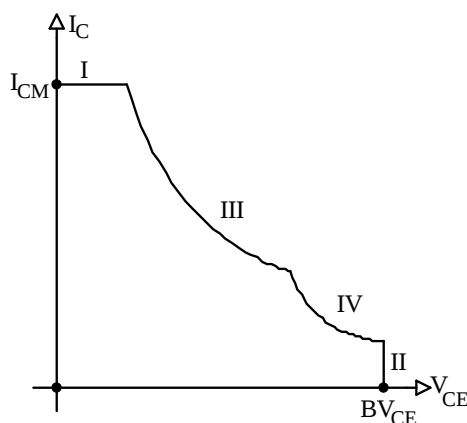
Granice oblasti sigurnog rada daju se preko takozvanog SOAR dijagrama (Safe Operating Area – oblast sigurnog rada, videti sliku 1.26). Pored osa I_C i V_{CE} navedena oblast je omeđena maksimalnom strujom kolektora (I_{CM}), probojnim naponom BV_{CE} (eventualno BV_{CB}), maksimalnom snagom gubitaka i sekundarnim probojem.

Smisao maksimalnih struja i napona je sličan kao kod dioda. Snaga gubitaka je limitirana pregrevanjem poluprovodničke pločice. Hlađenjem kućišta tranzistora dozvoljena snaga gubitaka se može povećati.

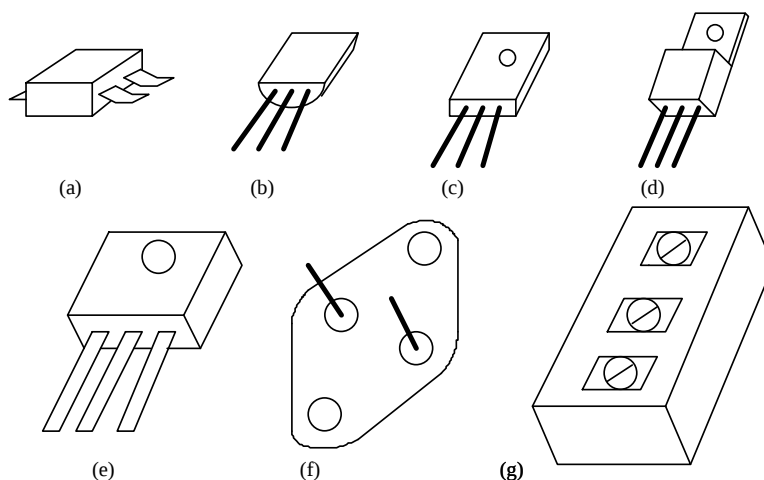
Sekundarni proboj je složena pojava koja u prekidačkom režimu dovodi do stradanja tranzistora. Suština je u tome da u momentu isključivanja nastaje velika gustina struje u baznoj oblasti koja je daleko od izvoda baze odnosno pri uključivanju struja se skoncentriše oko baznog priključka. U oba slučaja tranzistor gubi kontrolu i od lokalnog pregrevanja propadne (pukne ili se istopi poluprovodnička pločica).

Slika 1.26. Granice oblasti sigurnog rada bipolarnog tranzistora (SOAR):

I – maksimalna struja,
II – maksimalni napon,
III – maksimalna snaga,
IV – sekundarni proboj.



U zavisnosti od snage za koju su predviđene, bipolarni tranzistori se ugrađuju u različita kućišta. Nekoliko izvedbi je prikazano na slici 1.27.



Slika 1.27. Tranzistorska kućišta: a) kućište SOT-23 za površinsku montažu, b) izvedba TO-92, c) izvedba TO-126, d) izvedba TO-220, e) izvedba TO-247, f) izvedba TO-3, g) tranzistorski modul velike snage.

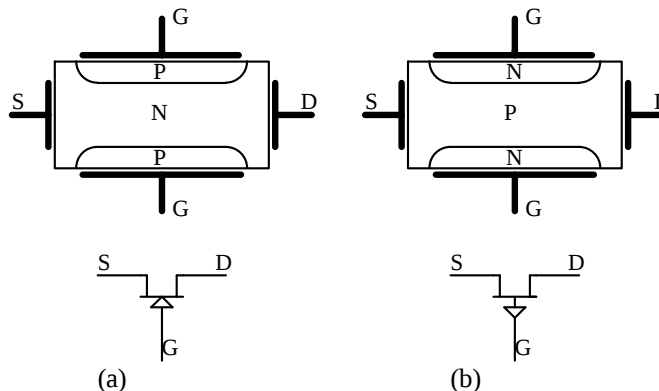
1.2.3. Spojni fetovi (jfet, fet)

Ideja o kontroli poluprovodničkog kanala poprečnim električnim poljem je daleko starija od bipolarnog tranzistora (Lilienfeld, 1925), međutim na realizaciju je trebalo puno čekati. Tehnološka dostignuća vezana za razvoj bipolarnog tranzistora su omogućila realizaciju takvih poluprovodničkih kanala koja su pokazala zadovoljavajuću osetljivost, odnosno bila su pogodna za upravljanje.

Od tranzistora sa efektom polja prvo su se pojavili spojni fetovi (jfet). Naziv (junction field effect transistor – tranzistor sa efektom polja na bazi PN spoja) ukazuje na činjenicu da, sa jedne strane, upravljački signal je izolovan od kanala pomoću PN spoja, odnosno sa druge strane napon polarizacije PN spoja modifikuje provodnost kanala.

Struktura jfet-a je prikazana na slici 1.28. Polaznu poluprovodničku pločicu N tipa dopiraju atomima P tipa sa obe strane, tako se formiraju PN spojevi sa obe strane kanala. Tako se pravi N kanalni jfet. Polazeći od pločice P tipa, sa N tipom dopiranja, dobija se P tip jfet-a. Odgovarajuće grafičke oznake su takođe prikazane na slici 1.28. Izvodi kanala imaju sledeće nazive: drejn (drain - D) i sors (source - S). Upravljačka elektroda sa nazivom gej (gate - G) se formira tako što se dva bočna izvoda sa poluprovodničke pločice spoje.

Slika 1.28. Struktura i grafički simbol za: a) N kanalni i b) P kanalni jfet. Na grafičkim oznakama dati su slovni simboli za pojedine izvode, što se pri normalnoj upotrebi ne praktikuje.



Princip rada jfet-a je relativno prost. Bez polarizacije PN spojeva ($V_{GS}=0$) kanal provodi relativno dobro. Pri inverznoj polarizaciji isprazne se nosioci naelektrisanja iz dela kanala u okolini PN spoja i time se smanjuje provodnost kanala. Kontrola kanala može da bude postepena (pojačavački režim) ili skokovita (prekidački režim).

Kod jfet-ova se ne primenjuje direktna polarizacija. To prilično uprošćava modelovanje jer se uvek može uzeti da je struja upravljačke elektrode (gejt) uvek jednak nuli. Ponekad se tranzistori sa efektom polja zovu i unipolarni tranzistori jer, u zavisnosti od tipa, struju provode ili samo elektroni ili samo šupljine.

Matematički opis jfet-a daje formula:

$$I_D = I_{DSS} \left[2 \left(\frac{V_{GS}}{V_P} - 1 \right) \frac{V_{DS}}{V_P} - \left(\frac{V_{DS}}{V_P} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (1.18.)$$

gde je:

I_{DSS} – struja zasićenja,

V_P – napon stiskanja kanala.

Druga jednačina nije ni potrebna jer važi $I_G=0$, $I_S=I_D$. Zadana jednačina važi u takozvanoj triodnoj oblasti, a granice te oblasti su definisane nejednačinom: $0 < V_{DS} < V_{GS} - V_P$.

Za male vrednosti V_{DS} može se koristiti aproksimacija:

$$I_D \cong 2I_{DSS} \left(\frac{V_{GS}}{V_P} - 1 \right) \frac{V_{DS}}{V_P} \dots\dots\dots (1.19.)$$

koja definiše jfet kao kontrolisanu otpornost na bazi poluprovodnika:

$$R_{DS} = \frac{V_P}{2I_{DSS} \left(\frac{V_{GS}}{V_P} - 1 \right)} \dots\dots\dots (1.20.)$$

Zato se ovaj granični region triodne oblasti zove omska oblast

Povećanjem napona V_{DS} iznad granice $V_{DS}=V_{GS}-V_P$, suprotno jednačini 1.18 neće doći do daljeg povećanja struje I_D već se struja zaustavi na vrednosti:

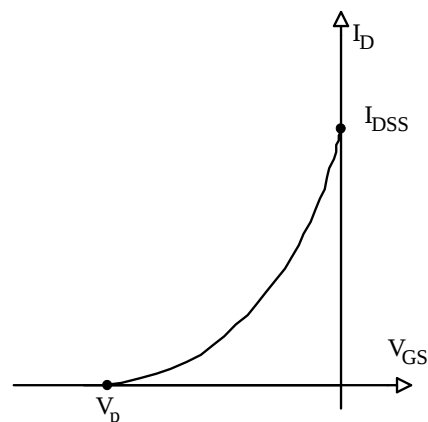
$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_P} \right)^2 \dots\dots\dots (1.21.)$$

Ta oblast se zove oblast zasićenja jfet-a.

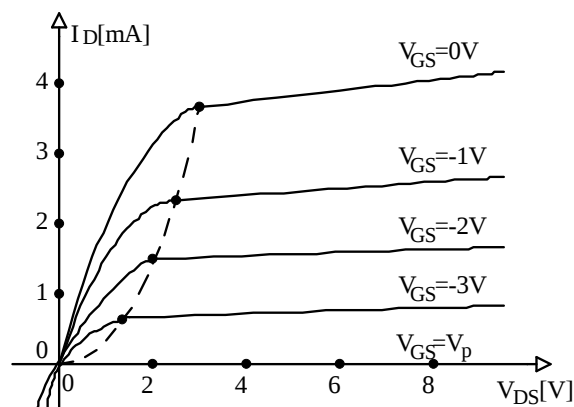
Konačno, ako napon V_{GS} padne ispod V_P , važi $I_D=0$, jfet se zakoči. Sa izvesnim promenama predznaka navedene jednačine se mogu primeniti i kod P kanalnog jfet-a.

Pošto je struja gejt-a jednaka nuli kod jfet-a, dovoljno je crtati familiju prenosnih i izlaznih karakteristika. Na slici 1.29 nacrtana je samo jedna prenosna karakteristika (za N kanalni jfet) koja važi u oblasti zasićenja. Kod izlaznih karakteristika (slika 1.30) naznačena je i granična kriva koja razdvaja triodnu oblast od oblasti zasićenja.

Slika 1.29. Prenosna karakteristika jfet-a (za N kanalni jfet).

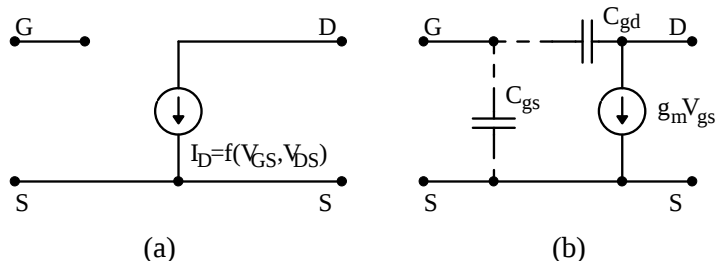


Slika 1.30. Izlazne karakteristike jfet-a (za tipičnu N kanalnu komponentu).



Pri formiranju mrežnog modela za jfet, kanal se zamenjuje sa kontrolisanim strujnim izvorom čiju struju računamo po formuli 1.18 ili 1.21. (slika 1.31.a). Kod malih signala navedene jednačine se mogu linearizovati, tako dolazimo do modela na slici 1.31.b. Na visokim frekvencijama moraju se uzeti u obzir i parazitne kapacitivnosti prikazani isprekidanim linijama.

Slika 1.31. Mrežni modeli jfet-a: a) za velike signale, b) za male signale.



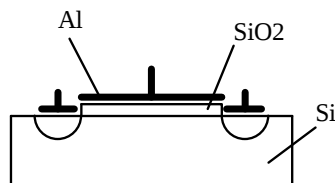
Jfet ovi imaju brojnu primenu i u analognoj i u digitalnoj tehnici i kao diskretne i kao integrisane komponente. Pošto se ne proizvode komponente za veće snage, koristi se samo nekoliko kućišta za površinsku montažu i kućište TO-92 spomenuto kod bipolarnih tranzistora.

Osnovni tehnički podaci za jfet-ove su probojni naponi (BV_{GS} , BV_{DS}), maksimalna struja drejn-a ($I_{D_{MAX}}$) i maksimalna snaga gubitaka ($P_{D_{MAX}}$). Ovi podaci određuju granice oblasti sigurnog rada. Dodatni podaci su napon stiskanja kanala (V_P) i struja zasićenja (I_{DSS}).

1.2.4. Mosfet-ovi

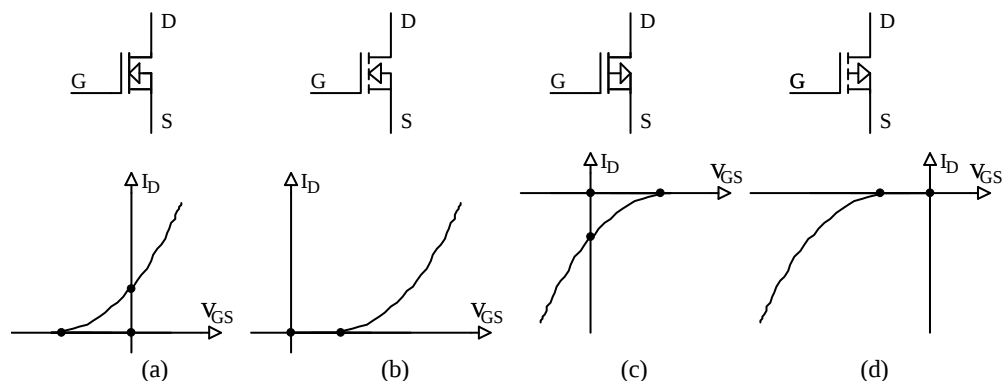
Drugu grupu unipolarnih tranzistora odnosno tranzistora sa efektom polja čine mosfet-ovi različitih vrsta. Skraćenica MOS (metal-oxide-semiconductor) upućuje na troslojnu strukturu od metala, silicijum-dioksida kao izolatora i poluprovodnika (slika 1.32).

Slika 1.32. Troslojna MOS (metal-oksid-poluprovodnik) struktura.



Sloj poluprovodnika (Si-silicijum) čini kanal čiju provodnost treba da modifikuje napon doveden na sloj metala (Al-aluminijum). Eventualnu galvansku spregu između sloja metala i poluprovodnika sprečava sloj oksida sa izolacionim svojstvom.

Kanal može biti od N tipa ili P tipa poluprovodnika; po tome razlikujemo N kanalne i P kanalne mosfet-ove. Za razliku od jfet-ova gde je dovedeni napon na gejt mogao samo da smanji provodnost kanala, ovde smo svedoci dvojakog ponašanja. Kod takozvanih mosfet-ova sa ugrađenim kanalom - zavisno od smera polarizacije na gejt-u - provodiće struju bolje ili lošije nego bez polarizacije. Kod mosfet-ova sa ugrađenim kanalom - bez polarizacije - nema struje kroz kanal. Grafički simboli i prenosne karakteristike za sva četiri moguća tipa mosfet-a su prikazane na slici 1.33.

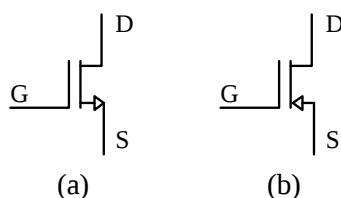


Slika 1.33. Grafički simboli i prenosne karakteristike za različite tipove mosfet-ova (smatrajući ulazni smer struje): a) sa ugrađenim N kanalom, b) sa indukovanim N kanalom, c) sa ugrađenim P kanalom, d) sa indukovanim P kanalom. Na grafičkim oznakama su navedene i slovne oznake izvoda što kasnije neće biti potrebno.

Izvodi mosfet-ova se nazivaju na isti način kao kod jfet-ova. Priključci kanala su drejn D-drain) i sors (S-source) a upravljačka elektroda je gejt (G-gate). Pri simetričnoj konstrukciji drejn i sors bi mogli menjati ulogu, u stvarnosti, međutim, većina komponenti nije simetrična.

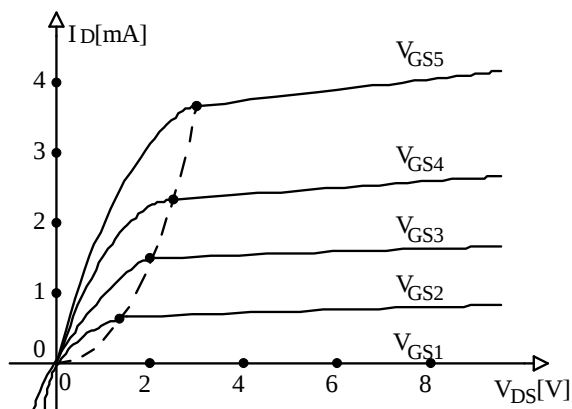
Dati grafički simboli nisu i najpopularniji. U slučaju da nije potrebno naglasiti da li je komponenta sa ugrađenim kanalom ili sa indukovanim kanalom, koriste se uprošćene oznake sa slike 1.34.

Slika 1.34. Uprošćeni grafički simboli za: a) N kanalni i b) P kanalni mosfet.



Familija izlaznih karakteristika je u svakom slučaju slična (slika 1.35) s tim da se razlikuje opseg za napon V_{GS} i različit je smer struje I_D i napona V_{DS} kod N kanalnih i P kanalnih izvedbi.

Slika 1.35. Tipične izlazne karakteristike za N kanalni mosfet (komponenta male snage).



Za mosfet-ove sa ugrađenim kanalom važi isti matematički model kao za jfet-ove. Kod varijante sa indukovanim kanalom, međutim, u triodnoj oblasti koristi se jednačina (za N tip kanala):

$$I_D = K[2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2] \dots\dots\dots(1.22.)$$

gde je:

K – odgovarajuća konstanta,

V_T – prag otvaranja.

Za male vrednosti V_{DS} jednačina 1.22 se uprošćava na oblik (Ohmska oblast):

$$I_D = K[2(V_{GS} - V_T)V_{DS}] \dots\dots\dots(1.23.)$$

U ovom slučaju može se smatrati da je kanal zapravo naponom kontrolisana otpornost sledeće vrednosti:

$$R_{DS} = \frac{1}{2K(V_{GS} - V_T)} \dots\dots\dots(1.24.)$$

Povećanjem napona V_{DS} iznad granice $V_{DS} = V_{GS} - V_T$ - ulazi se u oblast zasićenja. Tu prestaje dalji porast struje, važi formula:

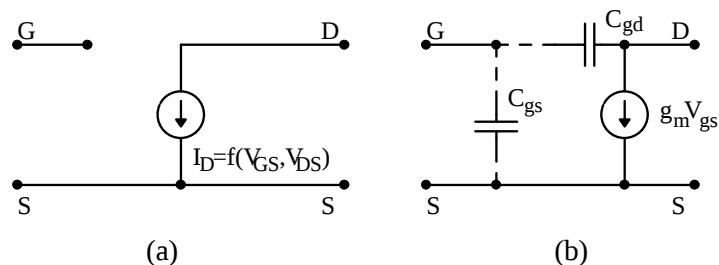
$$I_D = K(V_{GS} - V_T)^2 \dots\dots\dots(1.25.)$$

Ako je $V_{GS} < V_T$, mosfet ne provodi struju.

Sličan matematički model važi za mosfet-ove sa indukovanim P kanalom, s tim da treba promeniti određene predznake, odnosno smerove napona i struje.

Što se tiče mrežnog modela, mosfet se može zameniti sa kontrolisanim strujnim generatorom ali treba uzeti u obzir razlike između pojedinih oblasti rada (slika 1.36.a). Za male signale strujni generator se može linearizovati, a na visokim frekvencijama treba uzeti u obzir uticaj parazitnih kapacitivnosti mosfet-a (slika 1.36.b). Isti modeli su dati kod jfet-ova, a razlika je samo u jednačinama koje prate te modele.

Slika 1.36. Mrežni modeli mosfet-ova: a) za velike signale i b) za male signale.



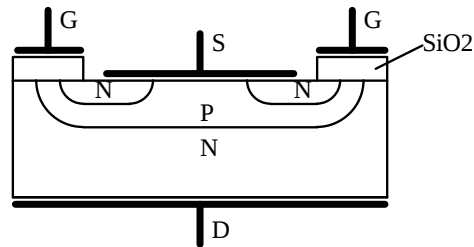
Osnovni tehnički podaci u vezi mosfet-ova su granice oblasti sigurnog rada (BV_{GS} , BV_{DS} , I_{Dmax} , P_{Dmax}) i parametri modela (V_P odnosno V_T , I_{DSS} odnosno K , a za male signale g_m). Kod većine diskretnih mosfet-ova prag otvaranja (V_T) je standardizovan, spada u opseg od 2V do 4V, a kod jedne manje grupe (takozvani logic-level tipovi) je između 1V i 2V.

Mosfet-ovi se prave za razne snage. Za manje snage ($P_{Dmax} < 1W$) koristi se kućište TO-92 ili neko od kućišta za površinsku montažu. Za veće snage su karakteristična plastična kućišta TO-220 i TO-247, metalno kućište TO-3 i razni moduli (videti sliku 1.27). Veliki broj mosfet-ova se koristi u integrisanoj tehnici za neka analogna kola ali su mnogo brojnije digitalne primene.

Struktura snažnih mosfet-ova odstupa od gore prikazane. Princip rada je isti, međutim kanal potrebnog velikog preseka i male dužine ostvaruju vertikalnim rasporedom, okomito na ravan poluprovodničke pločice (slika 1.37). Većina tih komponenti je sa N tipom kanala pošto su im karakteristike bolje u odnosu na P tipove. Kanal N tipa se formira u uzanoj P oblasti ispod gejta, pod uticajem pozitivnog prenapona na gejtu. Elektroni koji čine glavnu struju polaze iz N oblasti ispod sorsa, prolaze kroz kanal ispod gejta i ulaze u N oblast koja je vezana na drejn. Komponente

velike snage dobijaju tako što ostvare velik broj ćelija prikazanih na slici 1.37 po celoj površini poluprovodničke pločice i na kraju ih spoje paralelno.

Slika 1.37. Vertikalna mosfet struktura.

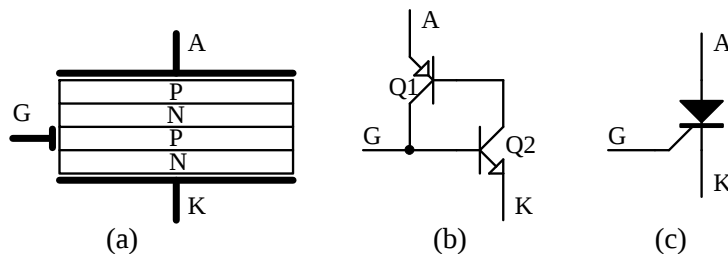


1.2.5. Tiristori

Kao prva komponenta koja je mogla da reguliše značajne nivoe snage pojavio se tiristor krajem 1950-tih godina. Nasuprot ograničenoj upravljivosti (problematično je isključivanje) sve do današnjeg dana, tiristor je u širokoj upotrebi.

Struktura tiristora, ekvivalentna šema za objašnjenje principa rada i grafički simbol su prikazani na slici 1.38. U četvoroslojnoj strukturi naizmenično su smešteni P i N slojevi. Tiristor se preko izvoda sa gornjeg i donjeg sloja (A-anoda, K-katoda) uključuje u glavno strujno kolo u kojoj će funkcionisati kao prekidač. S unutrašnjeg P sloja pravi se izvod za upravljačku elektrodu (G-gejt)

Slika 1.38. (a) Struktura tiristora (b), ekvivalentna šema i (c) grafički simbol.



Bez upravljačke struje, tiristor ne provodi glavnu struju ni u kom smeru, čak i da postoji odgovarajući polarizacioni napon između anode i katode. Prelazak u provodno stanje i održavanje tog stanja se može pratiti preko ekvivalentne šeme na slici 1.38. Upravljačka struja koja se propusti od gejta prema katodi pobuđuje NPN tranzistor (Q2), usled čega nastaje struja kolektora tog tranzistora. Struja kolektora NPN tranzistora upravlja PNP tranzistorom (Q1), pokreće struju kolektora tog tranzistora. Ta kolektorska struja ulazi u isti čvor kao upravljačka struja tiristora, pa ga može zameniti. Na taj način nastaje samodržćeće provodno stanje. Glavna struja može da teče od anode prema katodi bez stalnog prisustva upravljačke struje, dovoljno je dovesti jedan kratak impuls struje (nekoliko μs) na gejt.

Iz ekvivalentne šeme može se izvesti i matematički model tiristora. Polazeći od Ebers-Moll-ovih jednačina za pojedine tranzistore izvodi se formula za struju anode:

$$I_A = \frac{\alpha_1 I_G + I_{CO1} - I_{CO2}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \dots \dots \dots (1.26.)$$

gde je:

α_1, α_2 – faktori strujnog pojačanja za pojedine tranzistore,

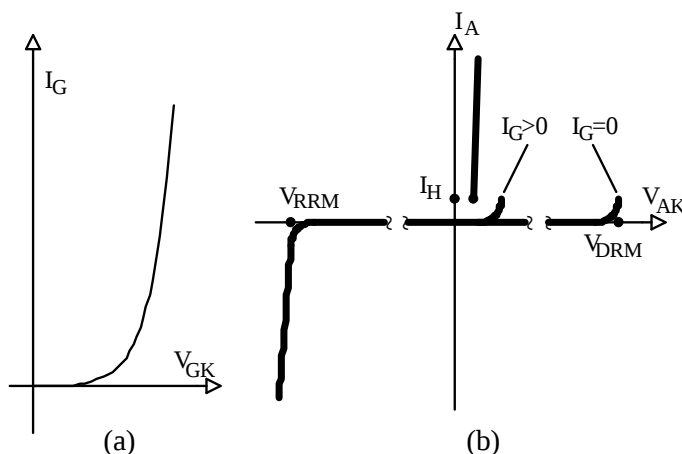
I_{CO1}, I_{CO2} – struje zasićenja pojedinih tranzistora.

Pre uključivanja (paljenja) faktori strujnog pojačanja su jednaki nuli. Pod dejstvom upravljačke struje α_1 i α_2 raste, kad se postigne kritična vrednost $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$, dalje I_A može da opstane i pri $I_G = 0$.

Na osnovu ekvivalentne šeme ne može se zaključiti jednoznačno da se tiristor ne može isključiti prekidanjem struje gejta, odnosno, eventualnom promenom smera upravljačke struje. Takvim pokušajima, međutim, možemo modifikovati samo provodnost delova pločice oko gejta, ostali delovi ostaju u provodnom (samodržećem) stanju. Do isključivanja tiristorske strukture dolazi samo ako, zbog spoljnih razloga, struja u glavnom strujnom kolu padne na malu vrednost ($I_A < I_H$), eventualno pokuša da krene u suprotnom smeru. U naizmeničnim strujnim kolima struja prirodno pada na nulu i menja smer, dok u jednosmernim kolima moraju se primeniti posebna kola za gašenje tiristora.

Tiristor se može opisati sa dve karakteristike: jedna je ulazna karakteristika (igra ulogu pri dimenzionisanju kola za paljenje), druga je izlazna karakteristika (opisuje ponašanje tiristora u glavnom strujnom kolu. Ulazna karakteristika (slika 1.39.a) praktički odgovara karakteristici jednog PN spoja, eventualno vrše prespajanje spoja jednim otpornikom.

Slika 1.39. Karakteristike tiristora a) za ulazno (pomoćno) strujno kolo, b) za izlazno (glavno) strujno kolo.



U isključenom stanju izlazna karakteristika se uglavnom poklapa sa osom V_{AK} (slika 1.39.b). Pri prevelikoj inverznoj polarizaciji javlja se proboj tiristora slično kao kod Zener-ove diode koja će u slučaju velikih struja uništiti tiristor. Bez upravljačke struje javlja se proboj tiristora u direktnom smeru kod prenapona slične vrednosti kao kod inverzne polarizacije. Bitna razlika u ovom slučaju je da, pod uticajem proboja, tiristor prelazi u provodni režim. U provodnom (uključenom) stanju strujno/naponska karakteristika leži u blizini ose I_A , nezavisno od vrednosti glavne struje, pad napona na tiristoru je oko 1V (vrednost glavne struje određuju spoljni elementi). Najnižu tačku dijagrama koji se odnosi na uključeno stanje određuje struja držanja I_H . Pri nižoj vrednosti glavne struje tiristor prelazi u isključeno stanje.

Pri normalnoj upotrebi tiristor se ne dovodi u probojnu oblast već se pali preko gejta. Pri dovoljnoj struji gejta tiristor se može upaliti već pri jako niskim vrednostima napona V_{AK} . Ako se smanji struja gejta, potreban je veći napon u glavom kolu.

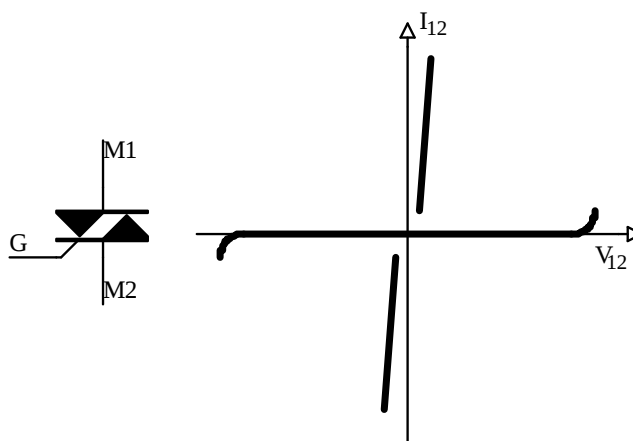
Prema dosad rečenom radne oblasti tiristora su provodna oblast, zakočenje i proboj. Osnovni tehnički podaci za tiristore su probojni naponi u direktnom smeru (V_{DRM}) i u inverznom smeru ($V_{RRM} \approx V_{DRM}$), odnosno maksimalna struja u glavom strujnom kolu (vršna vrednost I_{SM} i srednja vrednost I_{AV}).

Detaljniji katalozi navode takozvano vreme oporavka tiristora (t_{rr}). To je vreme potrebno za prelazak tiristora u isključeno stanje nakon pada glavne struje ispod struje držanja. Prema vrednosti vremena oporavka tiristore svrstavamo u mrežne tiristore i brze tiristore.

Tiristori mogu da podnesu samo konačne vrednosti dv_{AK}/dt i di_A/dt . Pri suviše velikoj vrednosti gradijenta napona unutar tiristora se pojave kapacitivne struje dovoljne veličine da se tiristor samostalno uključi. Sa druge strane, suviše veliki gradijent struje, zbog neravnomerne raspodele glavne struje, dovodi do lokalnog pregrevanja i uništenja tiristora.

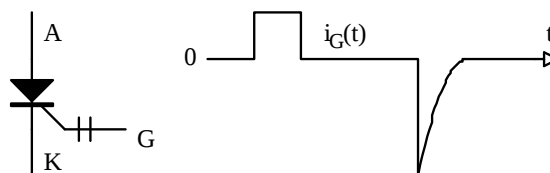
Pored osnovne varijante tiristora u tu familiju spada još nekoliko sličnih komponenti. Trijak je dvosmerni tiristor sa kojim se može vršiti upravljanje u obe poluperiode naizmeničnog napona. Grafički simbol i karakteristika trijaka su dati na slici 1.40.

Slika 1.40. Grafički simbol i karakteristika trijaka.



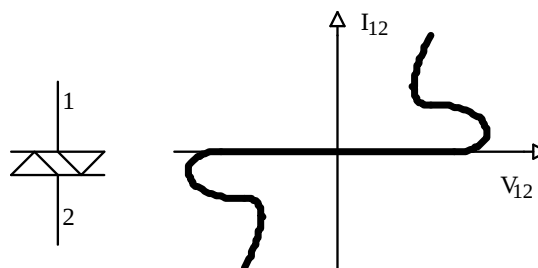
Za razliku od običnog tiristora takozvani GTO tiristor se može isključiti pomoću negativnog impulsa dovedenog na gejt. Potreban je impuls velike amplitude i velikog gradijenta. Grafički simbol i karakteristični impulsi za paljenje i gašenje te komponente su prikazani na slici 1.41.

Slika 1.41. Grafički simbol GTO tiristora i karakteristični impulsi za paljenje i gašenje.



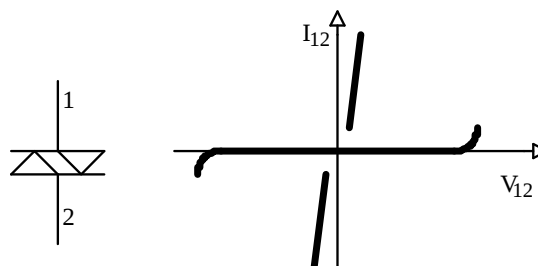
Dijak je dvosmerna komponenta kao trijak samo što nema gejt nego se pali dovođenjem u probojnu oblast. Dijaci se koriste u raznim kolima za paljenje. Grafički simbol i karakteristika je prikazana na slici 1.42.

Slika 1.42. Grafički simbol i karakteristika dijaka.

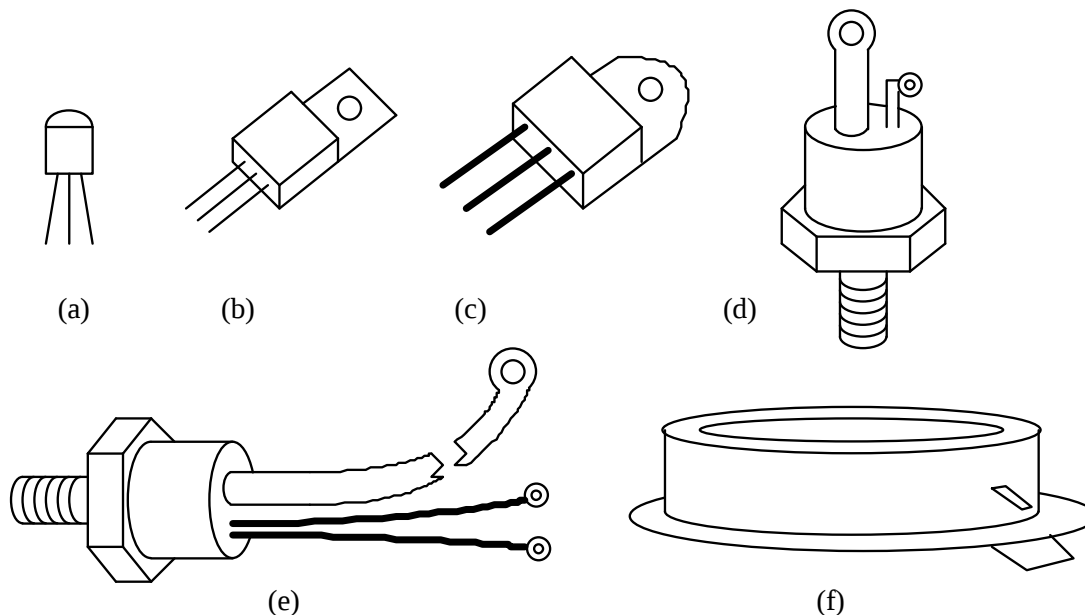


Slično dijaku, i SIDAC je komponenta bez gejta, ali sa znatno manjim padom napona u provodnom režimu. Koristi se za zaštitu od prenapona i u kolima za paljenje. Grafički simbol i karakteristika su dati na slici 1.43.

Slika 1.43. Grafički simbol i karakteristika SIDAC-a.



Tiristori se prave za vrlo širok opseg napona i struje (gornja granica je više kA i kV). Nekoliko od poznatijih kućišta za tiristore je prikazano na slici 1.44.



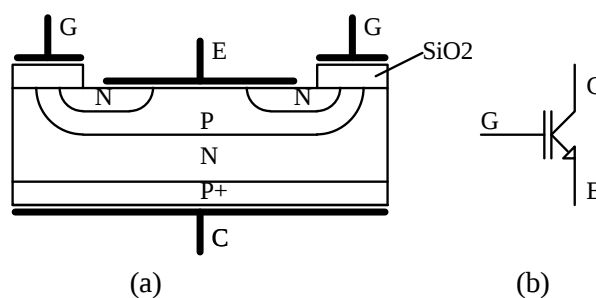
Slika 1.44. Kućišta tiristora: a) kućište TO-92, b) kućište TO-220, c) kućište TOP-3, d) kućište TO-208AA, e) kućište TO-209AB, f) kućište TO-200AB.

1.2.6. IGBT

IGBT-i su komponente energetske elektronike koje čine prelaz između bipolarnih tranzistora i mosfet-ova. Sam naziv IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor – bipolarni tranzistor sa izolovanim gejtom) upućuje na srodstvo sa bipolarnim tranzistorom. Značajna je sličnost da glavnu struju čine obe vrste nosilaca (elektroni i šupljine).

Po strukturi IGBT jako liči na vertikalni mosfet, samo je sa strane kolektora (C) dodat jedan jako dopiran $P+$ sloj (slika 1.45.a). Stvarne komponente se dobijaju paralelnim spajanjem velikog broja ovakvih ćelija. Grafički simbol IGBT-a je prikazan na slici 1.45.b.

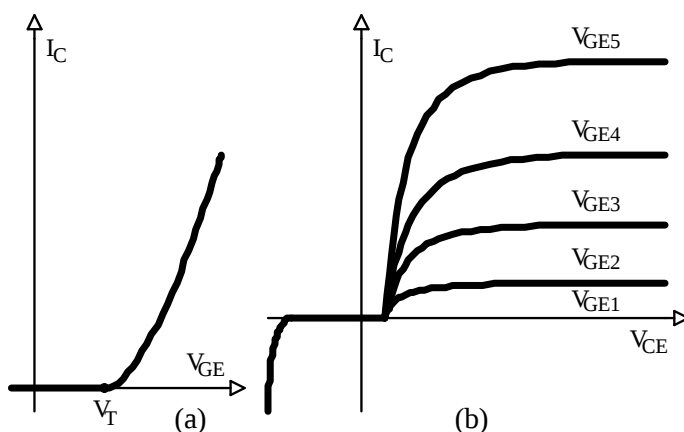
Slika 1.45. a) Struktura i b) grafički simbol za IGBT.



Otvaranje kanala i pokretanje glavne struje je omogućeno pozitivnom polarizacijom gejta (G): u P sloju ispod gejta formira se kanal N tipa. Nakon pokretanja struje elektrona iz emitora (E) preko kanala, iz $P+$ oblasti krene velika količina šupljina u susednu N oblast i smanjuje joj otpornost. Sa jedne strane prisustvo šupljina smanjuje gubitke koje se javljaju u uključenom stanju ali nažalost ujedno i usporava isključenje IGBT-a. Na taj način IGBT i po brzini predstavlja prelaz između bipolarnih tranzistora i mosfet-ova.

Slično kao kod mosfet-a, i kod IGBT-a je upravljačka elektroda (gejt) izolovana od kanala tako da u ustaljenom režimu važi $I_G=0$. U skladu sa tim, može se govoriti samo o prenosnoj i izlaznoj karakteristici. Tipični oblici tih dijagrama su dati na slici 1.46.

Slika 1.46. a) Prenosna i b) izlazna karakteristika IGBT-a.



IGBT-i se skoro isključivo primenjuju u prekidačkom režimu. Radne oblasti se mogu definisati u ravni I_C , V_{CE} . U uključenom stanju radna tačka se nalazi u blizini ose I_C , pad napona je $V_{CE}=V_{CEsat}=2V...5V$. U isključenom stanju radna tačka je praktički na osi V_{CE} . Unutar oblasti zasićenja, daleko od osa, radna tačka može da se nalazi samo kratko jer su tu veliki gubici. Ako se dovede $V_{CE}<0$, već kod nekoliko Volti dolazi do proboja. Proboj može da nastupi i pri $V_{CE}>0$ ali proi daleko većem naponu.

Prenosna karakteristika je slična prenosnoj karakteristici mosfet-a, samo što je prag (V_T) veći (redovno između 4V i 8V).

Oblast sigurnog rada kod IGBT-a je ograničena probojnim naponima (BV_{CE} , BV_{GE}), maksimalnom strujom (I_{Cmax}) i maksimalnom snagom gubitaka (P_{Dmax}). Najvažniji parametri modela su napon zasićenja V_{CEsat} i prag otvaranja V_T .

Pošto se ne proizvode komponente za male snage zato se koriste samo kućišta TO-220 i veća od toga (TO-247 i moduli). Često, radi efikasnije primene, veći broj IGBT-a i drugih komponenti se ugrađuje u isto kućište.

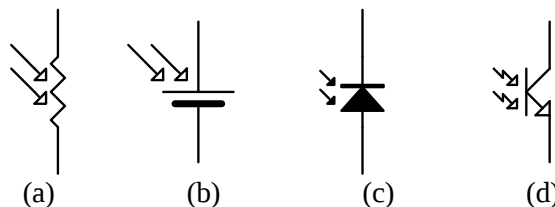
1.2.7. Optoelektronske komponente

Optoelektronika je jedna posebna grana elektronike koja se bavi razvojem i primenom komponenti koje su zasnovane na fotoelektričnom efektu. Taj efekat, kod koga se pri nestanku para elektron-šupljina dobija se foton ili pri padu fotona na poluprovodničku pločicu nastaje par elektron-šupljina, objasnio je A. Einstein.

Većina savremenih optoelektronskih komponenti je na bazi poluprovodnika ali postoje i elektronske cevi kod kojih nastaje emisija elektrona pod uticajem svetlosti ili zrače svetlost pri bombardovanju sa elektronima.

Klasifikacija optoelektronskih komponenti se vrši po tome da li primaju svetlost ili zrače svetlost. Glavni predstavnici prijemnika svetlosti su fotootpornici, fotoelementi, fotodiode i fototranzistori. Grafički simboli tih komponenti su dati na slici 1.47.

Slika 1.47. Razni prijemnici svetlosti: a) fotootpornik, b) fotoelement, c) fotodiode i d) fototranzistor.

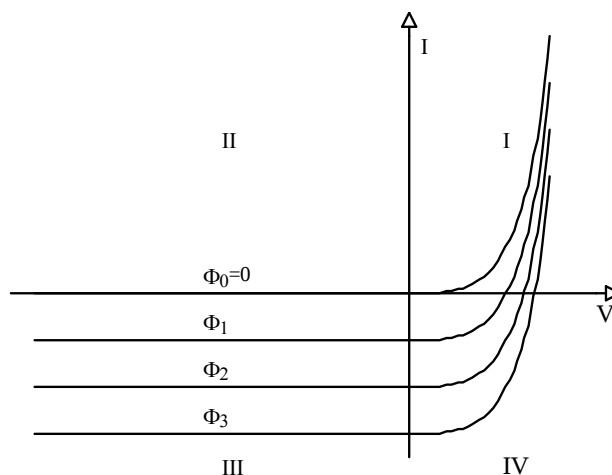


Fotootpornik se gradi redovno od homogenog i približno čistog sloja poluprovodnika čija provodnost - pod uticajem svetlosti - značajno raste. Koristi se kao senzor svetlosti

Aktivni deo fotoelementa je jedna poluprovodnička pločica sa PN spojem. Pod uticajem svetlosti u okolini PN spoja stvaraju se parovi elektron-šupljina. Zbog delovanja unutrašnjeg električnog polja nosioci naelektrisanja se razdvoje i na izvodima se pojavljuje napon, odnosno priključivanjem potrošača dobija se struja.

Na slici 1.48. prikazane su karakteristike fotoelementa za različite nivoe osvetljenja. U stvari, translirana je strujno-naponska karakteristika poluprovodničke diode. Mera translacije zavisi od intenziteta osvetljenja. Fotoelementi se koriste tako što rade u četvrtom kvadrantu ravni I - V ($I < 0$, $V > 0$), tu su u stanju da vrše pretvaranje svetlosne energije u električnu energiju.

Slika 1.48. Karakteristike fotoelementa u zavisnosti od intenziteta osvetljenja.



Zadnjih decenija učinjen je značajan napredak u razvoju fotoelemenata (fotonaponski paneli). Takođe su razvijeni složeni elektronski uređaji koji omogućavaju rad fotoelementa u okolini optimalne radne tačke i ubacivanje dobijene električne energije u gradsku mrežu. Na žalost, primenu fotoelemenata za racionalnu proizvodnju električne energije i dalje ograničava njihova visoka cena i nizak stepen iskorišćenja ($\approx 15\%$).

Struktura fotodiode je slična strukturi fotoelementa, razlika je u načinu primene. Fotodiode se povezuje u spoljašnje kolo tako da radi u trećem kvadrantu ($V < 0$, $I < 0$). Takva komponenta je pogodna za detekciju svetlosti.

Fototranzistor sadrži fotodiodu i bipolarni tranzistor. Tranzistor vrši pojačanje struje fotodiode i na taj način dobija se komponenta veće osetljivosti.

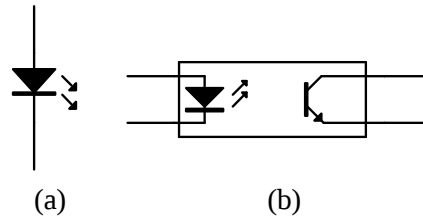
Većina savremenih komponenti koje zrače svetlost je na bazi poluprovodnika, sadrži PN spoj. Takve komponente nose naziv LED (Light Emitting Diode – svetleća dioda). Svetlost se stvara rekombinacijom parova elektron-šupljina u blizini PN spoja. Koeficijent korisnog dejstva je nizak su pouzdanost i radni vek veliki. Boju dobijene svetlosti određuje materijal poluprovodnika, od njega zavisi i napon otvaranja.

LED-ovi se prave u puno različitih oblika i boja. Ugradnjom više svetlećih dioda u jedno kućište se dobijaju sedmosegmentni i matični indikatori. Ako LED daje monohromatsko zračenje, reč je o laserskoj diodi.

Kombinacijom fototranzistora i svetleće diode se dobijaju optokapleri. Pod uticajem pobudnog signala, LED zrači svetlost i time pobuđuje fototranzistor. Na taj način je omogućen prenos različitih signala bez galvanske sprege. Primena optokaplera umesto transformatora za galvansko odvajanje može biti poželjna iz više razloga (dimenzije, radni vek, potrošnja). Grafički

simbol LED-a i optokaplera je dat na slici 1.49. Postoje optokapleri kod kojih svetleća dioda pobuđuje tiristor ili trijak male snage.

*Slika 1.49. Grafički simboli:
a) za LED i b) za optokapler.*



Tu ćemo spomenuti i indikatore sa tečnim kristalima, mada oni nisu komponente na bazi poluprovodnika. Tečni kristali su anizotropni materijali koji se okreću pod uticajem električnog polja i time im se menja sposobnost propuštanja svetlosti (zbog toga su neka polja crna a druga su providna). Njihova prednost u odnosu na LED indikatore je izuzetno mala potrošnja. Nedostatak je, međutim, da u mraku mogu da se učine vidljivim samo uz pozadinsko osvetljenje.

2. OSNOVNA ELEKTRONSKA KOLA

Najosnovniji sastavni delovi elektronskih uređaja su elektronske komponente sa kojima smo se upoznali u 1. delu. Povezivanjem nekoliko komponenti dolazimo do elementarnih elektronskih kola koja već mogu da obave neku funkciju.

U principu mogao bi se sastaviti beskonačan broj prostih elektronskih kola ali u praksi može da se nađe samo vrlo ograničen broj. U ovom delu ćemo se upoznati sa važnijim osnovnim elektronskim kolima. Prvo su na redu pasivna kola, nakon njih slede aktivna kola.

Pasivna kola (glava 2.1) se konstruišu od čisto pasivnih elemenata. Njihove mogućnosti u obradi signala su ograničene ali zbog njihove velike pouzdanosti vrlo rado ih koristimo.

Aktivna elektronska kola sadrže bar jednu aktivnu komponentu i potrebne pasivne komponente. Koristimo podelu na tri grupe. Prvo se opisuju logička kola (glava 2.2). Za sva logička kola je karakteristično da aktivni elementi u njima rade u prekidačkom režimu.

U glavi 2.3 su opisana pojačavačka kola. Kod njih aktivne komponente dobrim delom rade u linearnom režimu.

Na kraju (glava 2.4) su prikazana nelinearna kola kod kojih se upravo koristi nelinearni segment karakteristike aktivne komponente.

2.1. PASIVNA KOLA

Često se u elektronici dešava da se izvesne proste funkcije se mogu izvesti bez aktivnih komponenti. Sa čisto pasivnim komponentama se rešavaju problemi razdele, odvajanja, sprezanja filtracije signala i slično. Skrećemo pažnju da se u inženjerskoj praksi može zapaziti sledeći pristup:

a) Pasivna kola imaju prednost naspram aktivnih rešenja iz razloga što ne zahtevaju napojnu jedinicu, velika im je pouzdanost, imaju nizak nivo šuma itd.

b) Ako je neki zadatak rešiv sa otpornicima, to se rešava čisto otpornicima, bez primene drugih komponenti.

c) Ako je pored otpornika potrebna i neka reaktivna komponenta, prvo se zadatak pokušava rešiti sa dodavanjem kondenzatora, upotreba kalemova se izbegava.

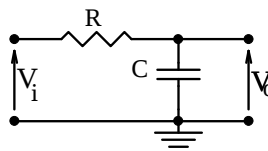
I kod aktivnih kola najjednostavnije je aktivne komponente kombinovati samo sa otpornicima. Po potrebi se stavljaju kondenzatori, a kalemovi se ugrađuju samo ako su zaista neophodni.

2.1.1. RC niskopropusnik

Prosti zadaci filtriranja se mogu obaviti uz pomoć RC niskopropusnika sa slike 2.1. Ulazni napon kola je označen sa V_i , izlazni napon sa V_o . Kod nekih primena može se pojaviti otpornički potrošač na izlazu, ali to u suštini ne menja ponašanje kola. Slično se može zaključiti u vezi unutrašnje otpornosti izvora signala. U većini slučajeva vremenska konstanta definisana kao proizvod otpornosti i kapacitivnosti je dovoljna za opis kola:

$$\tau = RC \dots\dots\dots(2.1.)$$

Slika 2.1. RC niskopropusnik.



Prilikom primene u pojačavačkim kolima, RC niskopropusnik, u domenu učestanosti, se može opisati sa prenosnom funkcijom:

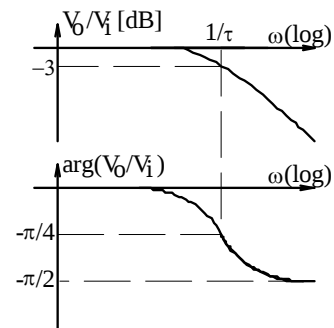
$$\frac{V_o}{V_i}(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC} = \frac{1}{1 + j\omega\tau} \dots\dots\dots(2.2.)$$

Odgovarajući Bode-ovi dijagrami pojačanja i faze su dati na slici 2.2. Suština tih dijagrama je da do gornje granične učestanosti:

$$\omega_H = \frac{1}{\tau} \dots\dots\dots(2.3.)$$

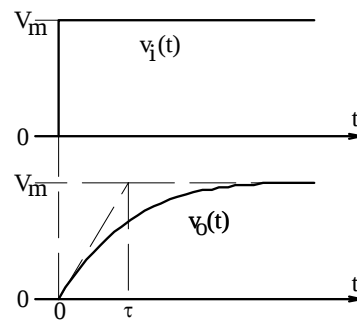
RC niskopropusnik prenosi signale, uglavnom, bez linearnih izobličenja (bez promene amplitude i faze), a preko toga amplituda izlaznog signala pada obrnuto srazmerno sa porastom učestanosti, a fazni pomeraj se približava vrednosti od -90° .

Slika 2.2. Bode-ovi dijagrami za RC niskopropusnik.



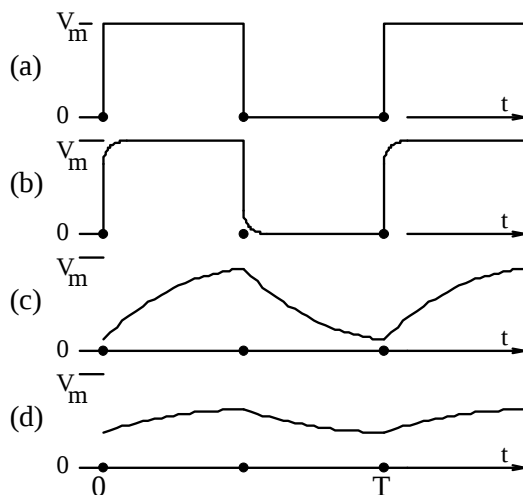
Za potrebe impulsne tehnike, navedeno kolo se može opisati sa diferencijalnim jednačinama. Odziv na jedinični skok je prikazan na slici 2.3. Amplituda izlaznog signala je jednaka amplitudi ulaznog signala, trajanje uzlazne ivice, međutim, raste srazmerno sa vremenskom konstantom.

Slika 2.3. Odziv RC niskopropusnika na jedinični skok.



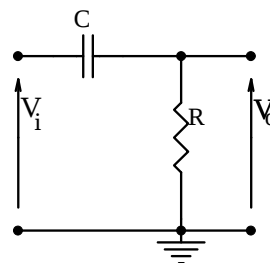
U slučaju periodične povorke pravougaonih impulsa, mogu se razmatrati tri karakteristična slučaja prikazana na slici 2.4. Oblik izlaznog signala u ovom slučaju zavisi od odnosa periode pravougaonog signala (T) i vremenske konstante kola (τ). U slučaju velike vremenske konstante talasnost izlaznog signala je zanemarljiva, srednja vrednost izlaznog signala se poklapa sa srednjom vrednošću ulazne povorke. Pri maloj vrednosti vremenske konstante izobličenje je minimalno, može se uočiti samo zanemarljivi integracioni efekat na ivicama signala.

Slika 2.4. Odziv RC niskopropusnika na periodičnu povorku pravougaonih signala različite frekvencije: a) ulazni signal, b) izlazni signal pri $\tau \ll T$, c) izlazni signal pri $\tau = T$, d) izlazni signal pri $\tau \gg T$.



2.1.2. RC visokopropusnik

Zamenom mesta otpornika i kondenzatora u niskopropusniku dobija se RC visokopropusnik (slika 2.5).

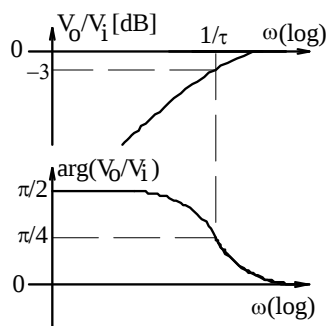


Slika 2.5. RC visokopropusnik.

Prilikom primene u pojačavačkim kolima uloga visokopropusnika je razdvajanje jednosmernih nivoa, odnosno eliminacija niskofrekvencijskih komponenti iz spektra ulaznog signala. U takvim slučajevima RC visokopropusnik se opisuje prenosnom funkcijom:

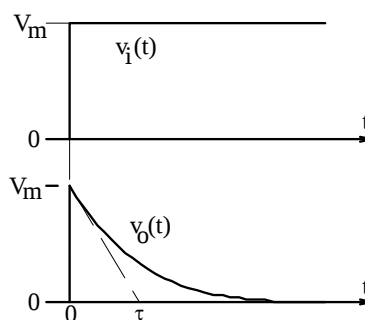
$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} \dots\dots\dots(2.4.)$$

Odgovarajući Bode-ovi dijagrami su prikazani na slici 2.6. Iznad donje granične učestanosti ($\omega_L = 1/\tau$), ovo kolo prenosi signale bez slabljenja i faznog pomeraja. Na niskim frekvencijama je sve veće slabljenje i javlja se pozitivni fazni pomeraj.



Slika 2.6. Bode-ovi dijagrami RC visokopropusnika.

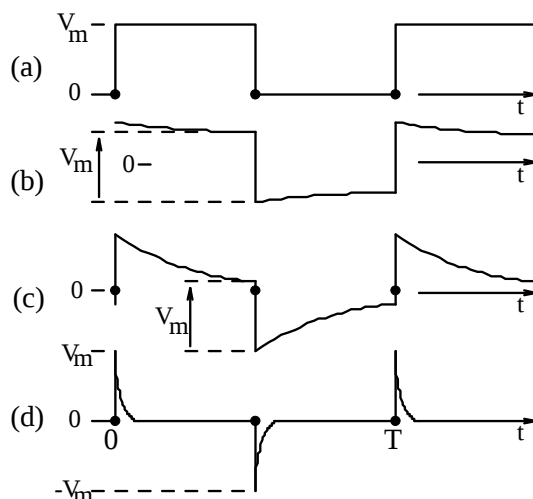
U impulsnoj tehnici RC visokopropusnik se koristi za oblikovanje signala. Ponašanje kola se može opisati diferencijalnim jednačinama. Odziv na jedinični skok je prikazan na slici 2.7. U početku se javlja skok iste amplitude kao na ulazu ali vremenom izlazni signal pada na nultu vrednost.



Slika 2.7. Odziv RC visokopropusnika na jedinični skok.

Pri dovođenju periodične povorke pravougaonih impulsa, bitan je odnos periode signala ($T=1/f$) i vremenske konstante ($\tau=RC$). Tri karakteristična slučaja su prikazana na slici 2.8. U slučaju velike vremenske konstante izlazni signal liči na ulazni, samo je eliminisana jednosmerna komponenta i može se zapaziti postepeni pad amplitude. Nasuprot ovome, pri maloj vremenskoj konstanti, na izlazu se dobija naizmenična povorka igličastih impulsa. Amplituda impulsa se poklapa sa veličinom skoka na ulazu.

Slika 2.8. Odziv RC visokopropusnika na periodične povorke pravougaonih signala različite učestanosti: a) ulazna povorka, b) izlazni signal pri $\tau \gg T$, c) izlazni signal pri $\tau = T$, d) izlazni signal pri $\tau \ll T$.

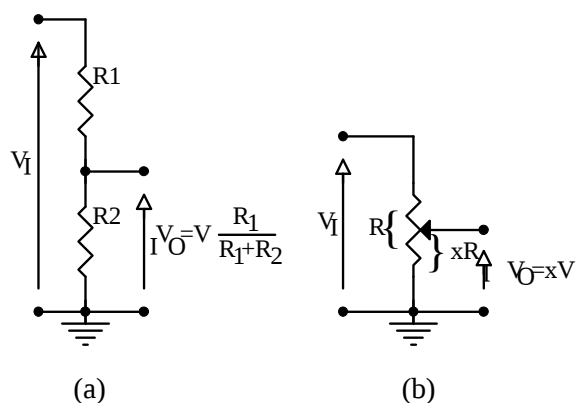


2.1.3. Razdelnici napona

Za prosto smanjenje signala redovno se koristi naponski razdelnik sastavljen od otpornika. Odnos razdele može biti fiksni ili promenljiv (slika 2.9).

Kod ovih kola, u principu, ne menja se oblik signala, bez obzira na spektar odnosno vremenski oblik signala, samo se izlaz smanjuje u odnosu na ulaz.

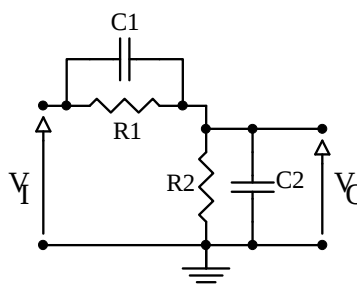
Slika 2.9. Razdelnik napona: a) sa stalnim i b) sa promenljivim odnosom razdele.



Može se desiti da se kapacitivno opterećenje izlaza ne može zanemariti. U takvim slučajevima, običan naponski razdelnik počinje da se ponaša kao propusnik niskih učestanosti, što dovodi do izobličenja signala. Oblik signala se može popraviti tako što se i gornji otpornik u razdelniku premosti sa kondenzatorom. Tako se dobija kompenzovani razdelnik (slika 2.10). Ako je zadovoljen uslov $R_1 C_1 = R_2 C_2$, razdelnik će raditi bez izobličenja. Na sličan način se mogu konstruisati i višestruki kompenzovani razdelnici napona.

Pri dimenzionisanju razdelnika konkretne vrednosti primenjenih otpornika su od drugorazrednog značaja naspram njihovom odnosu. Ponekad međutim mora se uzeti u obzir kojom otpornošću se može opteretiti izvor signala, kolika može biti izlazna otpornost razdelnika i mora se paziti da se elementi razdelnika ne preoptereće po snazi.

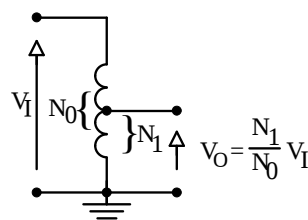
Slika 2.10. Kompenzovani razdelnik napona.



Pri razdeli naizmeničnih napona može biti pogodniji induktivni, kapacitivni ili transformatorski razdelnik.

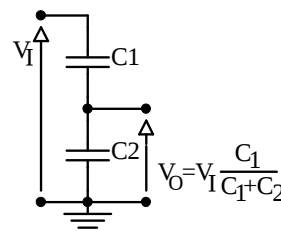
Induktivni razdelnik se redovno formira pravljenjem izvoda na jednom jedinstvenom kalemu (slika 2.11). Takva komponenta ujedno može da služi i za prilagođenje impedanse.

Slika 2.11. Induktivni razdelnik napona.



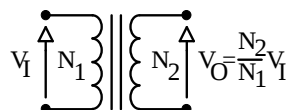
Kapacitivni razdelnik (slika 2.12) se preporučuje na visokim naponima. Prednost mu je u odnosu na druga rešenja što je praktički bez gubitaka.

Slika 2.12. Kapacitivni razdelnik napona.



Transformatorski razdelnik (slika 2.13) ujedno ukida galvansku vezu između ulaza i izlaza. Naravno, transformator može i da povećava napon ne samo da ga smanjuje.

Slika 2.13. Transformatorski razdelnik napona.



2.1.4. RC propusnik opsega

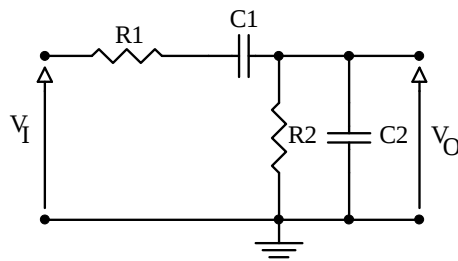
Prenosna funkcija kola prikazanog na slici 2.14 je sledećeg oblika:

$$\frac{V_o}{V_i}(j\omega) = \frac{j\omega C_1 R_2}{1 + j\omega(C_1 R_1 + C_1 R_2 + C_2 R_2) - \omega^2 C_1 C_2 R_1 R_2} \dots\dots\dots(2.5.)$$

Oдавде se dobija formula za centralnu učestanost na kojoj je amplituda izlaznog signala maksimalna:

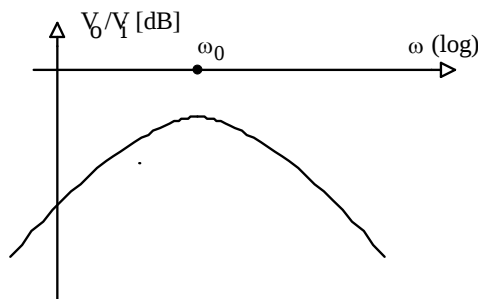
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2}} \dots \dots \dots (2.6.)$$

Slika 2.14. Prost RC propusnik opsega.



Iznad i ispod centralne učestanosti izlazni signal se prvo smanjuje postepeno, zatim srazmerno, odnosno obrnuto srazmerno sa promenom učestanosti. To se vidi i iz Bode-ovog dijagrama (slika 2.15). Na ovaj način se ne može dobiti uzani propusni opseg (velika selektivnost) ali je kolo pogodno za prostija filtriranja.

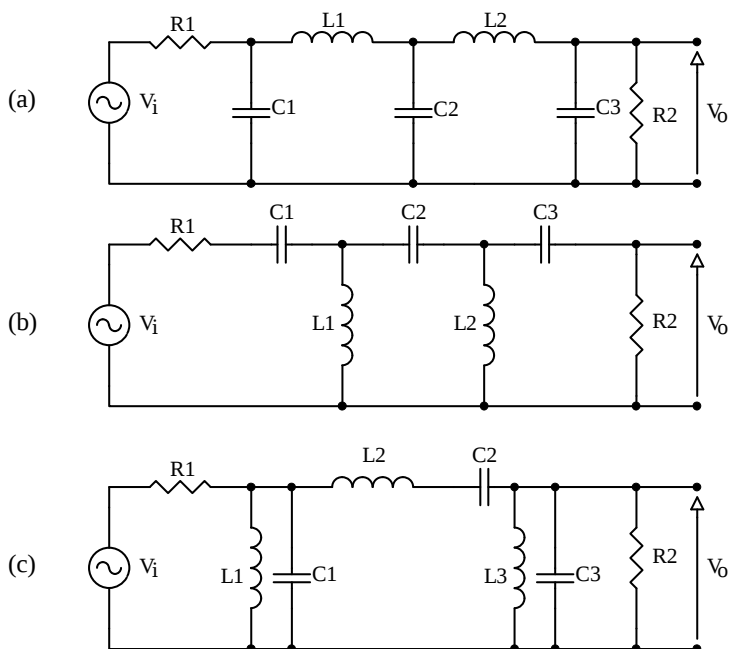
Slika 2.15. Bode-ov dijagram amplitude za RC propusnik učestanosti.



2.1.5. LC filtri

Odgovarajućom kombinacijom kalemova i kondenzatora i najsloženiji zadaci filtriranja se mogu obaviti, jedino snaga signala se ne može povećati. U principu moguće je razraditi različita LC kola, međutim u praksi se najčešće koriste lestvičaste mreže. Na slici 2.16 su prikazane uobičajene veze lestvičastih mreža za realizaciju filtera propusnika niskih, visokih i opsega učestanosti.

Slika 2.16. Različite LC lestvičaste mreže: a) niskopropusnik, b) visokopropusnik i c) propusnik opsega učestanosti.

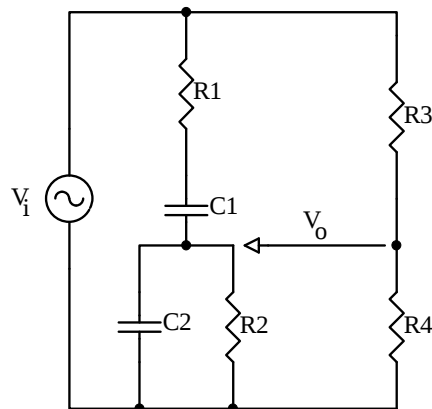


Teorija LC filtara je vrlo složena ali je takođe dobro razrađena. Na raspolaganju su gotove formule iz kojih se lako izračunava red filtra (broj LC elemenata), odnosno vrednosti konkretnih induktivnosti i kapacitivnosti u kolu. Takođe postoje pristupačni softveri za projektovanje LC filtara.

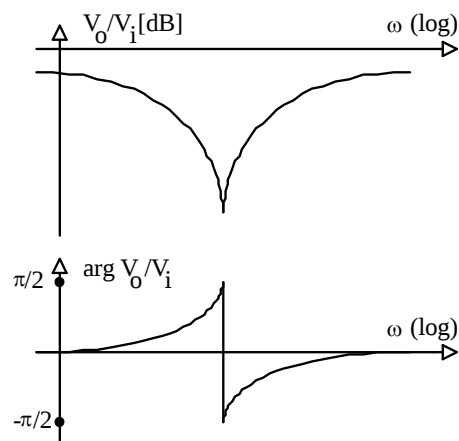
2.1.6. Wien-ov most

Šematski prikaz Wien-ovog mosta je dat na slici 2.17, a odgovarajući Bode-ovi dijagrami su prikazani na slici 2.18. Karakteristika mosta je da na frekvenciji $f_0 = (2\pi RC)^{-1}$ dolazi do ravnoteže, a amplituda izlaznog signala pada na nulu. Na istoj frekvenciji javlja se promena faze sa $-\pi/2$ na $+\pi/2$.

Slika 2.17. Šema Wien-ovog mosta.



Slika 2.18. Bode-ovi dijagrami za Wien-ov most.



2.1.7. Redno RLC rezonantno kolo

Redna veza RLC elemenata (slika 2.19) ispoljava filtersko dejstvo. Struja kroz rednu vezu (I_{RLC}) odnosno napon na izlazu (V_o) na takozvanoj rezonantnoj frekvenciji:

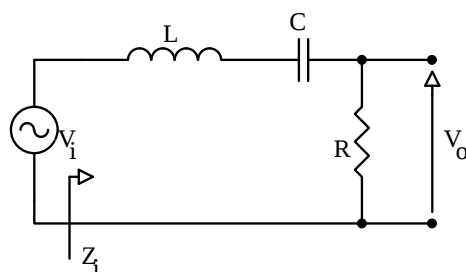
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \dots\dots\dots(2.7.)$$

postiže veliku vrednost, a udaljavanjem od rezonantne učestanosti naglo se smanjuje slika (2.20). Oblik dijagrama je kontrolisan faktorom dobrote:

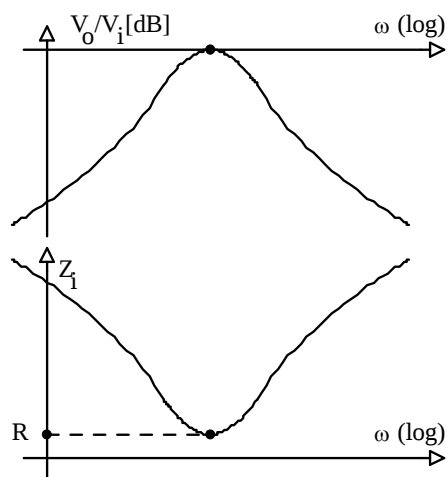
$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 RC} \dots\dots\dots(2.8.)$$

Redno RLC rezonantno kolo se podjednako koristi i u linearnoj obradi signala i u impulsnoj tehnici.

Slika 2.19. Redno RLC rezonantno kolo.



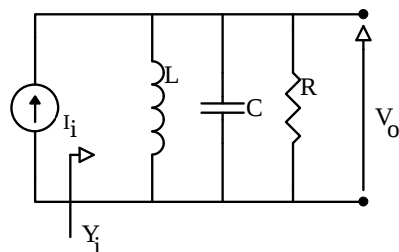
Slika 2.20. Frekvencijske karakteristike rednog RLC rezonantnog kola.



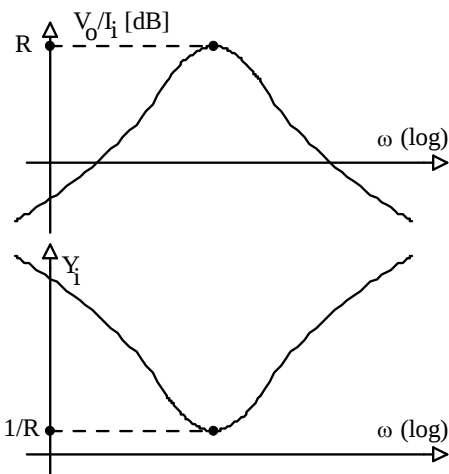
2.1.8. Paralelno RLC rezonantno kolo

Ovo kolo (slika 2.21) se redovno pobuđuje pomoću strujnog generatora. Dobijeni napon postiže maksimalnu vrednost na rezonantnoj učestanosti, a udaljavanjem od rezonantne učestanosti se smanjuje (slika 2.22). Selektivnost je i ovde određena faktorom dobrote kola.

Slika 2.21. Paralelno RLC rezonantno kolo.



Slika 2.22. Frekvencijske karakteristike paralelnog RLC rezonantnog kola.



2.2. LOGIČKA KOLA

U savremenoj elektronici u većini su takva kola kod kojih računamo samo sa dve vrednosti signala (napona). U užem smislu to su logička kola, a sva takva kola čine familiju digitalnih kola. U principu postoji i prelaz između navedene dve krajnje vrednosti signala ali to redovno traje kratko i sa aspekta primene nema ulogu.

Karakteristike elemenata i Kirchhoff-ove jednačine ostaju u važnosti ali, s obzirom na binarno ponašanje (smatra se da signal može da uzima samo dve vrednosti), nema potrebe za tačnim rešavanjem kola u uobičajenom smislu. Umesto toga, interesantno je definisati samo logičke veze između ulaznih i izlaznih signala.

2.2.1. Opšte karakteristike logičkih kola

Bez obzira na veliku raznovrsnost logičkih kola (u širem smislu digitalnih kola), postoje takve osnovne performanse koje se mogu definisati za bilo koje kolo. Takve opšte performanse su: logički nivoi, margine smetnji, opteretljivost izlaza, brzina i potrošnja.

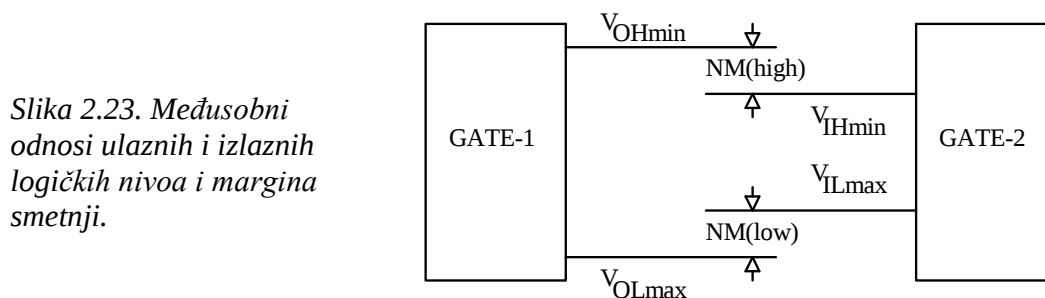
Logički nivoi se posebno definišu za ulaze i za izlaze. U oba slučaja postoji nizak i visok logički nivo. Visoki logički nivo (V_{OH}) je ona vrednost napona koja se može meriti na izlazu logičkog kola pri njegovom visokom stanju. Prilikom primene posebnu pažnju treba obratiti na minimalnu vrednost ovog napona ($V_{OH\min}$), jer preniska vrednost visokog logičkog nivoa može da prouzrokuje pogrešno reagovanje narednog logičkog kola čiji ulaz je spojen na izlaz kola o kome je reč. Nizak logički nivo (V_{OL}) je ona vrednost napona koja se može meriti na izlazu logičkog kola pri njegovom niskom stanju. Tu problemi mogu da nastanu zbog maksimalne vrednosti ($V_{OL\max}$) ovog logičkog nivoa.

I na ulazima logičkih kola se mogu definisati nizak i visok logički nivo (V_{IL} odnosno V_{IH}). Pri niskom logičkom nivou na ulazu bitna je maksimalna vrednost $V_{IL\max}$ ispod koje će razmatrano logičko kolo u svakom slučaju smatrati da je dovedena logička nula. Suprotno od ovoga, pri visokom logičkom nivou na ulazu bitno je da ulazni napon ne padne ispod $V_{IH\min}$, jer će razmatrano logičko kolo tek tada sa sigurnošću detektovati logičku jedinicu na svom ulazu. Odnos navedenih logičkih nivoa je simbolički predstavljen na slici 2.23. Na osnovu te slike definišemo i margine smetnji, posebno za nizak i posebno za visoki logički nivo:

$$NM(low) = V_{IL\max} - V_{OL\max} \dots\dots\dots(2.9.)$$

$$NM(high) = V_{OH\min} - V_{IH\min} \dots\dots\dots(2.10.)$$

Margine smetnji su najveće promene napona na izlazu prethodnog stepena, koje još ne izazivaju pogrešnu detekciju logičkog nivoa kod sledećeg stepena.



Slika 2.23. Međusobni odnosi ulaznih i izlaznih logičkih nivoa i margina smetnji.

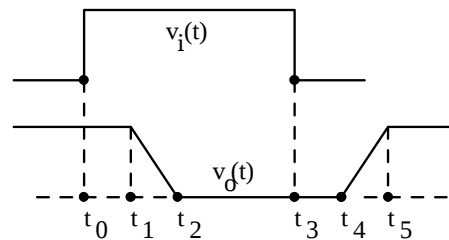
Opteretljivost izlaza logičkog kola mogla bi se definisati pomoću konkretnih otpornosti ili struja ali u praksi se radije navode relativne vrednosti. Te relativne vrednosti treba da definišu, koliko ulaza od sličnih logičkih kola može da pobuđuje izlaz razmatranog logičkog kola, tako da ne dođe do logičke greške. U nekim slučajevima, pošto se pobuđuju delimično kapacitivni potrošači, opteretljivost opada na visokim frekvencijama. Takođe treba uzeti u obzir da opteretljivost nije

jednaka pri niskom i visokom logičkom nivou. Za ispravan rad naravno treba uzimati manju vrednost.

Brzina logičkih kola, odnosno kašnjenja koja ograničavaju brzinu su predstavljena na slici 2.24. Smatra se da je na ulazu idealni pravougaoni signal a na izlazu se dobija signal sa konačnim vremenom porasta i opadanja i sa odgovarajućim kašnjenjima prednje ivice i zadnje ivice. U primeni su sledeće definicije:

- kašnjenje silazne ivice: $t_{dHL} = t_1 - t_0$
- vreme opadanja: $t_f = t_2 - t_1$
- kašnjenje uzlazne ivice: $t_{dLH} = t_4 - t_3$
- vreme porasta: $t_r = t_5 - t_4$
- vreme propagacije silazne ivice: $t_{pLH} = t_{dLH} + \frac{1}{2}t_f$
- vreme propagacije uzlazne ivice: $t_{pLH} = t_{dLH} + \frac{1}{2}t_r$.

Slika 2.24. Kašnjenja logičkih kola.



U toku rada, logička kola troše izvesnu snagu iz napojne jedinice. Ta snaga se pretvara u toplotu. Primenjena snaga se sastoji iz statičkog dela i dinamičkog dela. Statički gubici su prisutni pri zadržavanju logičkog kola na pojedinim logičkim nivoima, dok dinamički gubici potiču iz prekidačkog rada tranzistora i značajni su na višim učestanostima.

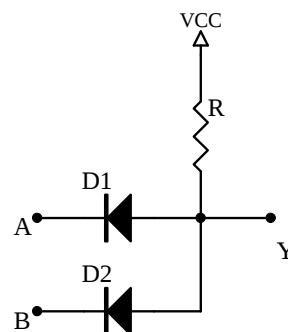
Korišćena snaga (potrošnja) je konstrukcijski povezana sa brzinom kola: brzina se redovno može povećati samo uz povećanje potrošnje. Činjenica je da kola najveće brzine i najveće složenosti moraju imati adekvatno hlađenje.

2.2.2. Logička kola sa diodama

Najprostija logička kola (logičke kapije) se mogu konstruisati povezivanjem dioda, otpornika i jedinica za napajanje.

Na slici 2.25 prikazana je šema dvoulaznog diodnog I kola. Ulazne promenljive su označene sa A i B, a izlazna promenljiva sa Y. Povezivanjem bilo kog (ili oba) ulaza na masu, izlaz će biti iznad 0V - za vrednost pada napona na diodi, što će se ovde tumačiti kao nizak logički nivo (logička nula). Povezivanjem oba ulaza na napon napajanja V_{CC} , kroz diode nema struje i na izlazu se može meriti napon V_{CC} , što će se tumačiti kao visoki logički nivo (logička jedinica).

Slika 2.25. Dvoulazno diodno I kolo.



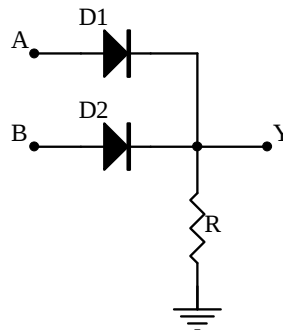
Kombinaciona tabela koja sadrži sve moguće varijacije ulaznih promenljivih je prikazana na slici 2.26. Prema konvencijama koje se koriste u Boole-ovoj algebri, za ovo kolo se može napisati jednačina: $Y=AB$.

Slika 2.26. Kombinaciona tabela za I kolo.

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

Na sličan način se može konstruisati diodno ILI kolo (slika 2.27). Tu će se visoki logički nivo na izlazu dobiti ako na bilo koji ulaz ili oba ulaza dovedemo visoki nivo (V_{CC}). Vezivanjem oba ulaza na masu, na izlazu se može meriti 0V što se tumači kao logička nula. Pripadajuća kombinaciona tabela je data na slici 2.28, a Boole-ova jednačina glasi: $Y=A+B$.

Slika 2.27. Dvoulazno diodno ILI kolo.



Slika 2.28. Kombinaciona tabela za ILI kolo.

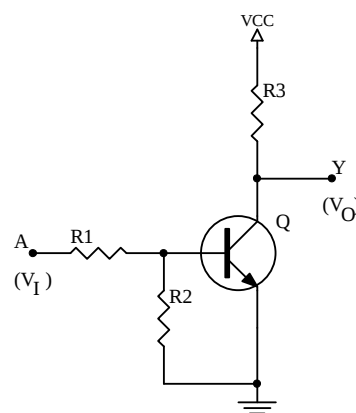
A	B	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Treba napomenuti da su navedena diodna logička kola od ograničene koristi. Pre svega, nisu ispunjeni uslovi u vezi ulaznih i izlaznih logičkih nivoa dati na slici 2.23. Dolazi do daljeg pomeranja logičkih nivoa ako, radi realizacije složenijih logičkih funkcija, međusobno povežemo ovakva logička kola.

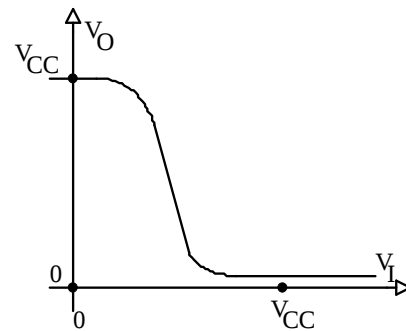
2.2.3. Logički inverter sa tranzistorom

Veza bipolarnog tranzistora prikazana na slici 2.29 ostvaruje logičku NE funkciju. Oblik prenosne karakteristike $V_O=f(V_I)$ je prikazan na slici 2.30. Promenom vrednosti otpornosti moguća su odgovarajuća podešavanja na karakteristici.

Slika 2.29. Logički inverter sa bipolarnim tranzistorom.



Slika 2.30. Prenosna karakteristika logičkog invertora.



Osobina logičkog invertora je da tranzistor ne provodi pri niskim vrednostima ulaznog napona, u takvom slučaju izlazni logički nivo se nalazi u blizini napona napajanja - (V_{CC}).

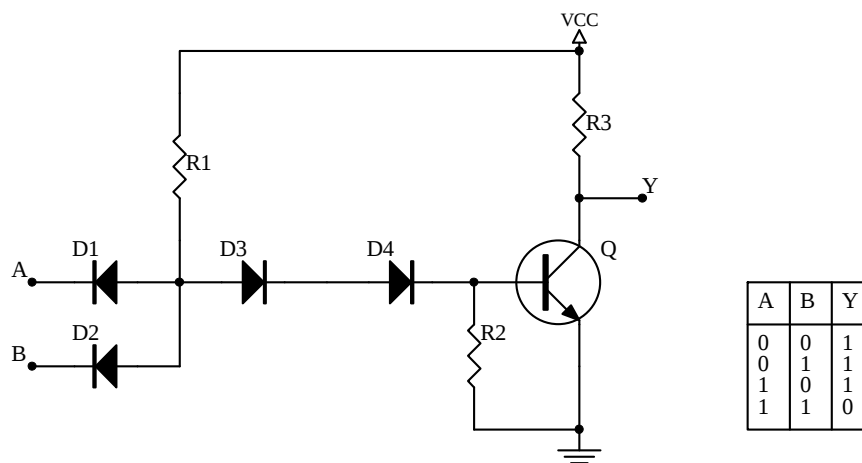
Logička nula na izlazu će se dobiti dovođenjem tranzistora u oblast zasićenja. Preduslov za to je prisustvo ulaznog napona koji odgovara logičkoj jedinici: na taj način će se preko otpornika R_1 obezbediti potrebna bazna struja za tranzistor. Pri promeni stanja - između zakočenja i zasićenja, tranzistor prolazi i kroz aktivnu (pojačavačku) oblast, ali se taj segment ne koristi kod logičkog invertora.

Prikazani logički invertor se može smatrati za pravo logičko kolo, pošto daje stabilne logičke nivoe i ima odgovarajuće margine smetnji. Mogu se pojaviti problemi oko brzine rada pošto, zavisno od nivoa zasićenja, isključenje tranzistora može da traje relativno dugo.

2.2.4. DTL i TTL kola

Složenija logička kola možemo izgraditi kombinacijom kola iz tačaka 2.2.2 i 2.2.3 (DTL – Diode Transistor Logic sklopovi) ili čisto u tranzistorskoj tehnici (TTL – Transistor Transistor Logic sklopovi).

Slika 2.31, prikazuje DTL NI kolo zajedno sa svojom kombinacionom tabelom. Komponente D_1 , D_2 , R_1 ostvaruju logičku I funkciju, na njih se nadovezuje tranzistorski invertor. Diode D_3 i D_4 su potrebne radi podešavanja ulaznih logičkih nivoa. Bez njih bilo bi nesigurno zakočenje tranzistora odnosno ne bi se mogla obezbediti odgovarajuća margina smetnji pri niskom logičkom nivou na ulazu.

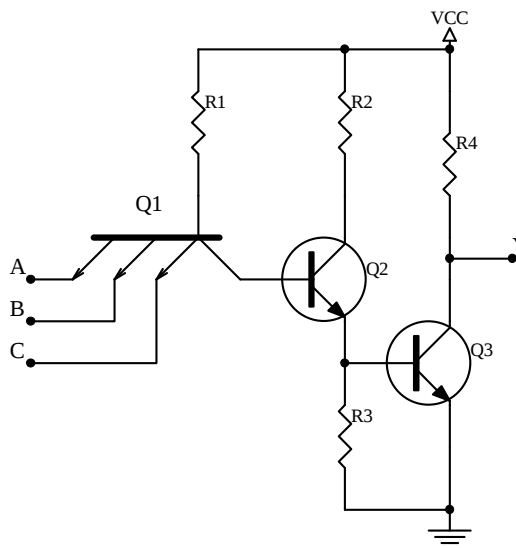


Slika 2.31. NI kolo u DTL tehnici sa svojom kombinacionom tabelom.

Na slici 2.32 je prikazano TTL NI kolo. Izlazni stepen je rešen na sličan način kao kod DTL kola, s tim da je potreban jedan dodatni tranzistor (Q_2) za pojačanje struje. U ulaznom stepenu ulogu dioda igra jedan specijalan više-emitorski tranzistor (Q_1).

Ako se na bilo kom ulazu pojavi nizak logički nivo, tranzistor Q_1 će raditi na ivici aktivnog režima, pošto dobija baznu struju iz V_{CC} -a preko otpornika R_1 , ali mu je kolektorska struja približno nulte vrednosti. U tom slučaju tranzistori Q_2 i Q_3 su zakočeni i na izlazu je visok logički nivo.

Dovođenjem visokog logičkog nivoa na sve ulaze, tranzistor Q_1 prelazi u inverzni aktivni režim (emitor na višem potencijalu od kolektora), daje baznu struju za tranzistor Q_2 koji onda pobuđuje tranzistor Q_3 i na izlazu se uspostavi nizak logički nivo.



Slika 2.32. TTL NI kolo.

Uz pomoć sličnih tranzistorskih kola mogu se rešiti i druge i složenije logičke funkcije. Familija TTL kola je bila prva familija logičkih kola koja je proizvedena u integrisanoj tehnici i to u velikim količinama i sa puno različitih logičkih funkcija. Dugo godina su činili osnovu digitalne elektronike.

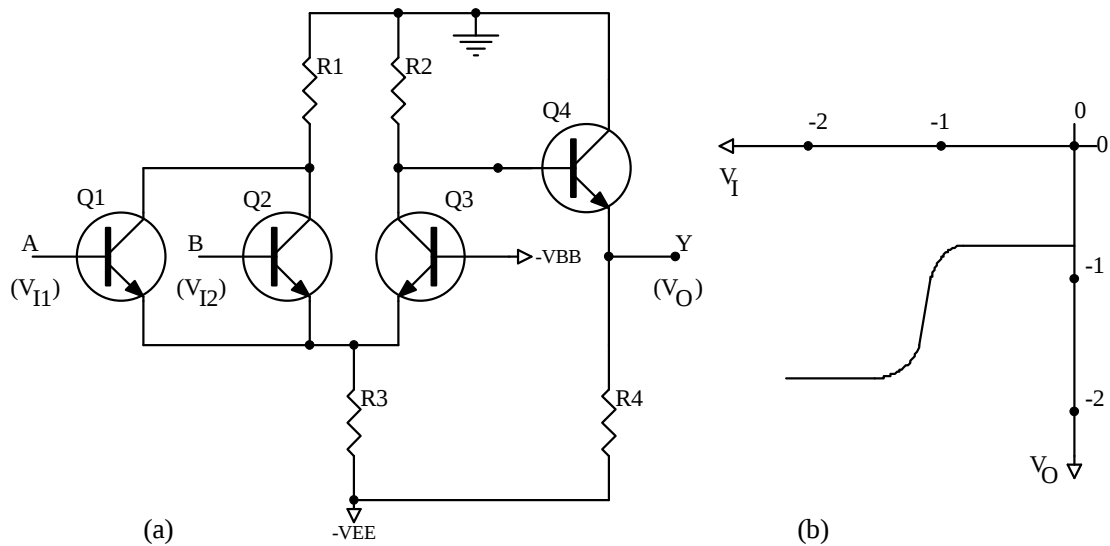
Prvobitne varijante TTL kola su do danas već zastarele, ali novije varijante su i dan danas konkurentne. Zavisno od pod-familije, potrošnja i brzina im je osrednja ili velika u odnosu na druge familije logičkih kola. Napon napajanja im je redovno 5V, ulazni logički nivoi su $V_{IHmin}=2V$, $V_{ILmax}=0,8V$, a izlazni $V_{OHmin}=3,5V$, $V_{OLmax}=0,3V$ (tipične vrednosti; kod pojedinih kola odnosno kod različitih proizvođača mogu se pojaviti odstupanja). Može se uočiti izvesna asimetrija u marginama smetnji za nizak i visok logički nivo. Manja margina smetnji pri niskom logičkom nivou je opravdana jer zasićeni tranzistor obezbeđuje izlaznu tačku male impedanse što dobro prigušuje smetnje.

2.2.5. ECL logička kola

I ECL (Emitter Coupled Logic) kola se ostvaruju bipolarnim tranzistorima. Pošto je zasićenje bipolarnog tranzistora glavna prepreka za postizanje veće brzine, kod ovih kola se aktivni režim koristi za predstavljanje jednog od logičkih nivoa. Iz aktivnog režima moguć je brz prelazak u zakočenje i kontra. Jedno prosto kolo, ILI funkcija ostvarena u ECL tehnici, prikazana je na slici 2.33 - zajedno sa svojom prenosnom karakteristikom.

Dovođenjem niskog logičkog nivoa ($V_1 < -1,5V$) na oba ulaza, zakoči se Q_1 i Q_2 , a Q_3 je u aktivnom režimu. Zahvaljujući aktivnom režimu, Q_3 odvodi jedan deo bazne struje tranzistora Q_4 što dovodi do smanjenja struje kolektora istog tranzistora i do smanjenja izlaznog logičkog nivoa na

nizak nivo. Ako se na bazu bilo kog od tranzistora Q_1 ili Q_2 dovede visok logički nivo ($V_2 > -1V$), dotični tranzistor prelazi u aktivni režim i zakoči tranzistor Q_3 . Pri tome Q_4 dobije veću baznu struju i podiže izlaz na visoki logički nivo.



Slika 2.33. ILI kolo u ECL tehnici (a) i prenosna karakteristika (b).

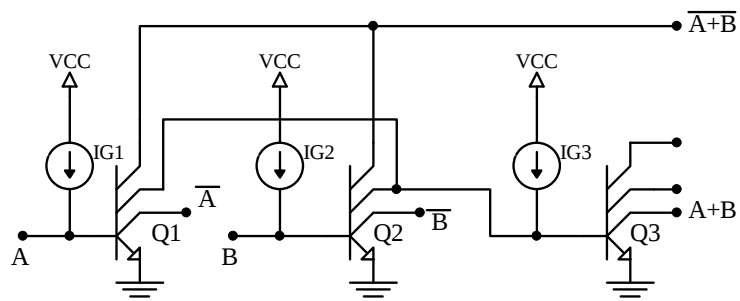
Pored ovde prikazanog ECL ILI kola realizovano je puno drugih logičkih kola na sličan način i razvoj time nije stao. Izašle su na tržište nove familije ECL10K i ECL 100K. ECL kola nisu pogodna za industrijsku primenu, redovno se koriste u realizaciji centralnih jedinica velikih digitalnih računara.

2.2.6. I^2L logička kola

Razvojem digitalne tehnike pojavila se potreba za integracijom što složenijih funkcija na silicijumsku pločicu date površine. Tako su prvo razvijena SSI kola (Small Scale Integration), zatim MSI (Medium Scale Integration), LSI kola (Large Scale Integration) i VLSI kola (Very Large Scale Integration), uz sve veću gustinu pakovanja.

Jedan pravac razvoja je bio razvoj što manjih tranzistora i drugih komponenti, sa druge strane istraživanja su kola sa što manjim brojem elemenata po elementarnoj logičkoj funkciji. Tako je formirana I^2L familija logičkih kola. Osnovne komponente su i ovde bipolarni tranzistori, ovde redovno u izvedbi sa više kolektora (slika 2.34).

Slika 2.34. ILI odnosno NILI logičko kolo ostvareno u I^2L tehnici.



Prikazano kolo istovremeno ostvaruje veći broj logičkih funkcija. Nizak logički nivo na izlazu je predstavljen zasićenjem tranzistora koji formira taj izlaz ($V_{OL} = V_{CEsat} \approx 0,1V$). Visoki logički nivo na izlazu je definisan ulaznim naponom tranzistora koji čini ulazni deo sledećeg kola

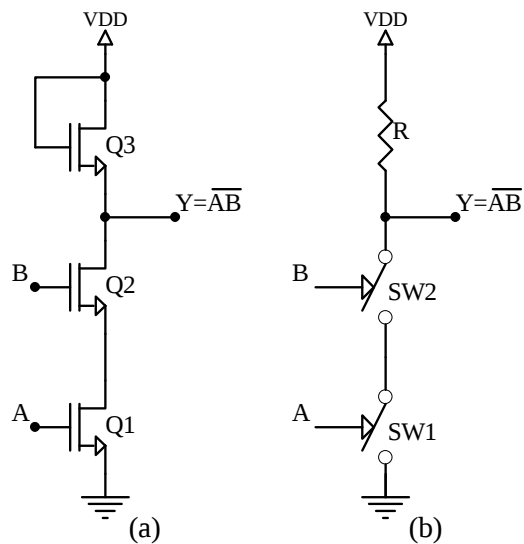
($V_{OH}=V_{BEsat}\approx 0,8V$). Može se zaključiti da je kod I^2L kola udaljenost logičkih nivoa (logička amplituda) male vrednosti, odavde sledi da će biti male margine smetnji i primena ovih kola u industrijskoj sredini nije preporučljiva.

2.2.7. MOS logička kola

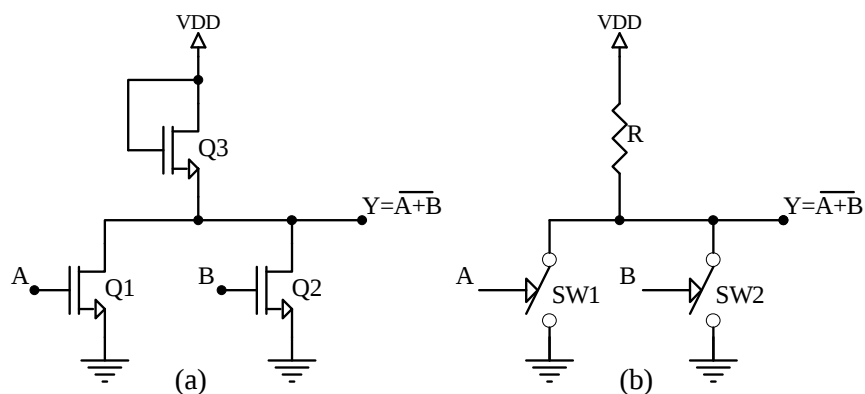
Logička (digitalna) kola se mogu izgraditi i na bazi mosfet-ova u prekidačkom režimu. NMOS logička kola koriste isključivo N kanalne mosfet-ove, a u CMOS tehnici se kombinuju N kanalne i P kanalne komponente. Realizacije čisto na bazi P kanalnih komponenti nisu uobičajene.

NI kolo (kapija) realizovana u NMOS tehnici zajedno sa uprošćenom ekvivalentnom šemom je prikazana na slici 2.35. Zbog redne veze prekidača u donjoj grani, struja prema masi može da se uspostavi samo ako na oba ulaza (na gejtove) dovedemo visoki logički nivo (veći od praga provođenja mosfet-ova). U istom kolu treći mosfet (Q3) igra ulogu aktivnog opterećenja umesto otpornika prema napajanju.

Slika 2.35. NI kolo ostvareno u NMOS tehnici (a) i ekvivalentna šema sa prekidačima (b).

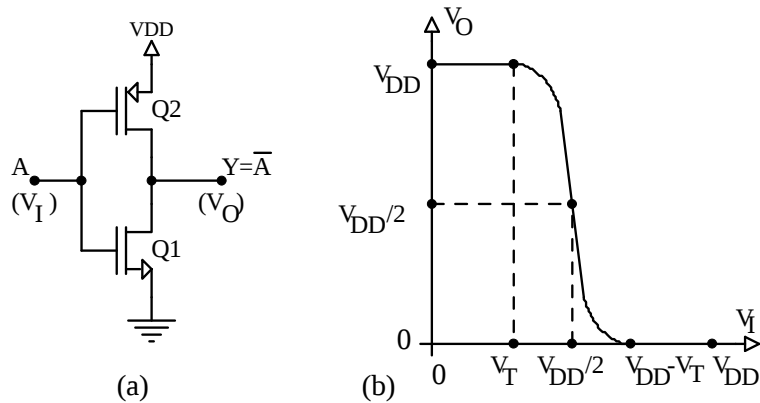


NMOS NILI kapija je prikazana na slici 2.36, zajedno sa ekvivalentnom šemom.



Slika 2.36. NILI kapija realizovana u NMOS tehnici (a) i ekvivalentna šema sa prekidačima (b).

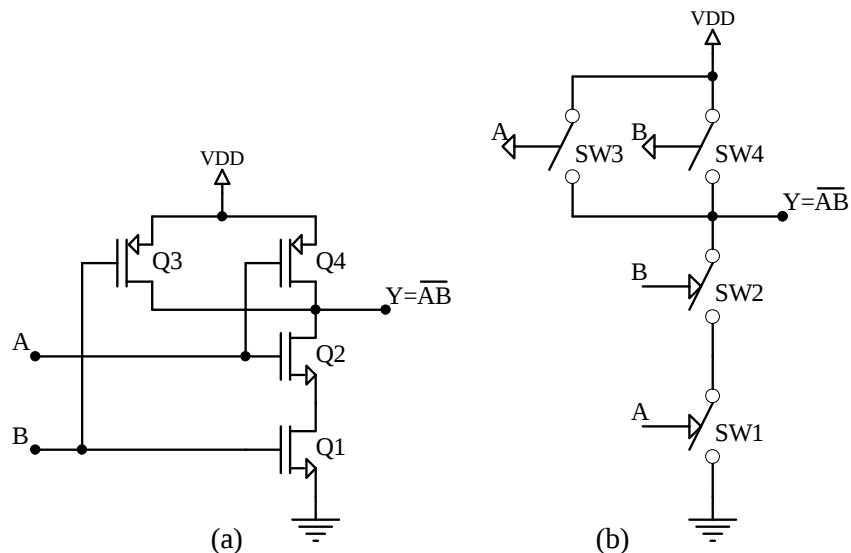
U CMOS tehnici logički invertor se može smatrati za osnovno kolo. Odgovarajuće kolo sa svojom prenosnom karakteristikom je prikazano na slici 2.37. Pri postepenom rastu signala na ulazu N kanalni mosfet $Q1$ prelazi iz zakočenog stanja u zasićenje, zatim u triodnu oblast. Isto se dešava sa P kanalnim mosfet-om $Q2$ u suprotnom slučaju kada ulazni signal pada postepeno od V_{DD} prema masi. Pragove otvaranja (V_T) podešavaju na taj način da prenosna karakteristika bude simetrična u odnosu na tačku $V_{DD}/2$.



Slika 2.37. Logički invertor u CMOS tehnici (a) i odgovarajuća prenosna karakteristika (b).

Važna osobina CMOS kola je da kroz MOS kanale prolazi struja samo za vreme prelaza između logičkih nivoa, inače je potrošnja kola zanemarljiva. Zahvaljujući ovome, CMOS kola su jako pogodna za realizaciju prenosnih uređaja sa baterijskim napajanjem (kalkulatori, ručni satovi, merni instrumenti itd.).

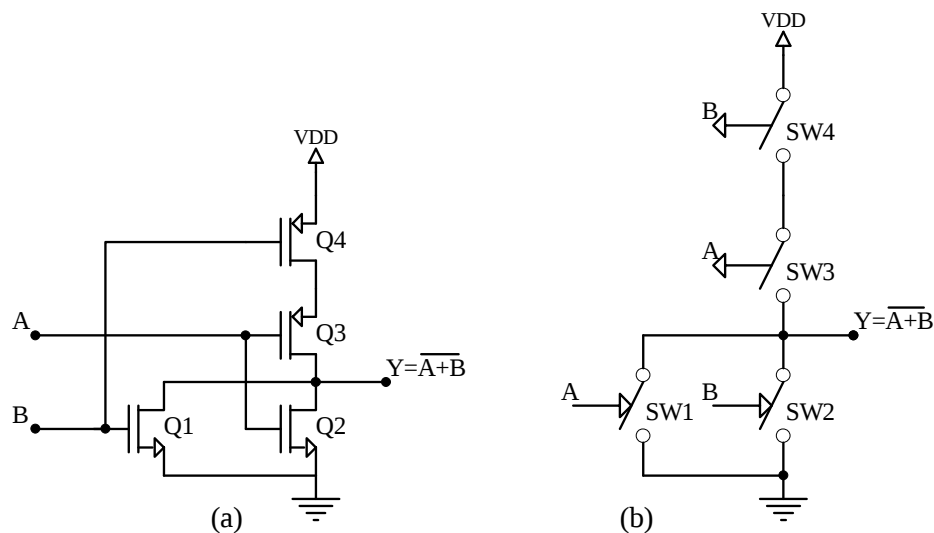
Ipak, treba znati da sa porastom radne frekvencije - potrošnja CMOS kola raste značajno. Potrošnja je prouzrokovana čestim punjenjem i pražnjenjem ulaznih parazitnih kapacitivnosti mosfet-ova (kapacitivnost গেজা).



Slika 2.38. CMOS NI kolo (a) i odgovarajuća ekvivalentna šema (b).

Druga dobra osobina CMOS kola su velike margine smetnji. Izlazni logički nivoi su u okolini napona napajanja i mase, a prelaz između logičkih nivoa je relativno nagli i dešava se u okolini polovine napona napajanja. Prema tome, teoretski gledano, margine smetnji bi imale vrednosti od blizu $V_{DD}/2$. U stvarnosti, zbog nesigurnosti pragova mosfet-ova, za realne margine smetnji se može uzeti vrednost od $0,3V_{DD}$.

Slično CMOS invertoru konstruisano je CMOS *NI* i *NILI* kolo. Ovi su prikazani na slici 2.38 i 2.39, zajedno sa odgovarajućim ekvivalentnim šemama.



Slika 2.39. CMOS *NILI* kolo (a) i odgovarajuća ekvivalentna šema (b).

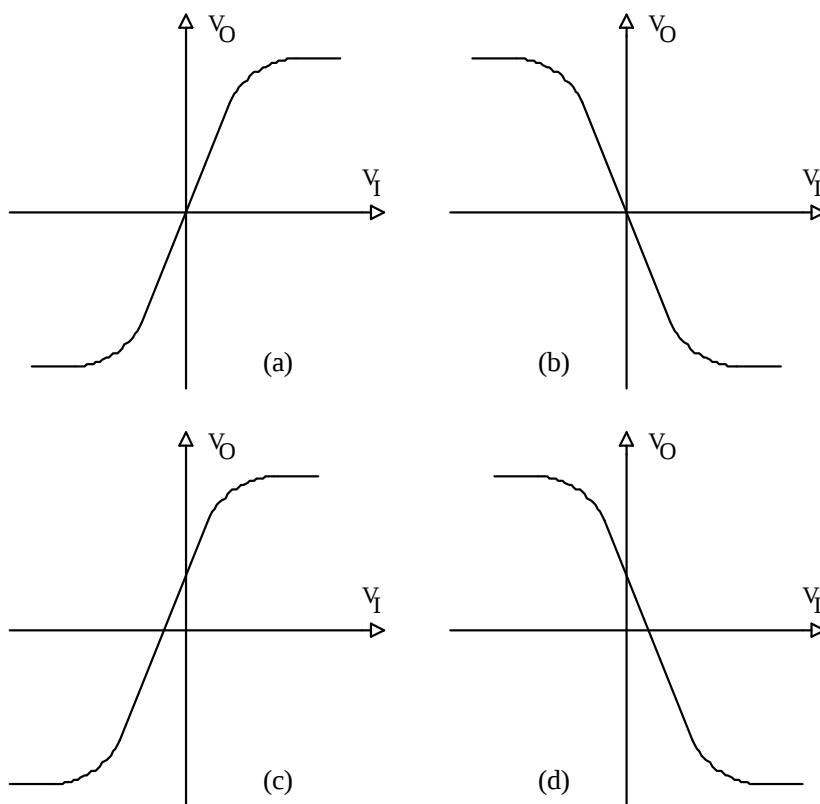
U primeni je veliki broj CMOS logičkih kola niske integracije (SSI) sa prostijim i složenijim logičkim funkcijama. Prvobitne varijante se već danas mogu smatrati zastarelim, ali ima novijih razvojnih rezultata. Vrlo je popularna recimo HCMOS serija kod koje je postignuta velika brzina uz malu potrošnju. CMOS kola su prisutna i u LSI i u VLSI tehnici.

2.3. LINEARNA POJAČAVAČKA KOLA

Kod logičkih kola postavljen je uslov da, sve vreme dok signal varira unutar margine smetnji, izlazni signal ostane konstantan ili da se menja neznatno. Nasuprot tome, kod pojačavačkih kola se traži da izlaz reaguje što intenzivnije na promene na ulazu. Takva velika osetljivost se može uočiti i kod logičkih kola pri prelazu između dva logička nivoa (slike 2.30, 2.33 i 2.37) ali u navedenim prostim objašnjenjima nije skrenuta pažnja na te detalje.

Kod pojačavačkih kola potrebno je rešiti dva suštinska zadatka. Prvo, treba obezbediti što linearniju prenosnu karakteristiku sa što većim nagibom (pojaćanjem). Kao što je rećeno, takav segment velike osetljivosti postoji već i kod logičkih kola. Drugo, radnu taćku treba držati oko sredine segmenta sa velikim nagibom, nezavisno od uticaja okoline (variranje napona napajanja, promena temperature - itd.) ali istovremeno radna taćka treba intenzivno da reaguje na promenu ulaznog signala.

Na slici 2.40 su prikazane razne idealizovane prenosne karakteristike za pojaćavaće. Zajednićka osobina svih dijagrama je da levo i desno od centralnog linearnog dela, zbog prelaska tranzistora u zakoćenje ili zasićenje, nagib opada (postepeno ili naglo) do nule. Ako je nagib pozitivan (rastući, $dV_O/dV_I > 0$), govorimo o neinvertujućem pojaćavaću, u suprotnom slućaju ($dV_O/dV_I < 0$) reć je o invertujućem pojaćavaću. Ako linearni segment prolazi kroz poćetak koordinatnog sistema (V_I, V_O), kaćemo da pojaćavać nema ofseta. U suprotnom slućaju postoji ofset koji treba da se rećava pri sprezanju pojaćavaća sa izvorom signala i sa potrošaćem.



Slika 2.40. Prenosne karakteristike pojaćavaćkih kola: a) neinvertujuća karakteristika bez ofseta, b) invertujući karakteristika bez ofseta, c) neinvertujuća karakteristika sa ofsetom, d) invertujuća karakteristika sa ofsetom.

2.3.1. Modelovanje pojačavača

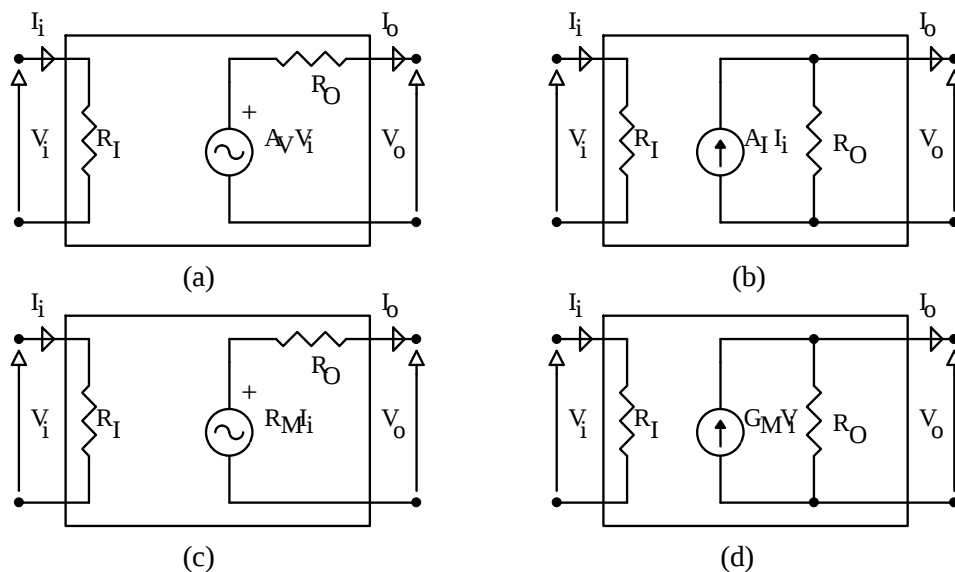
Ako se zanemare nelinearna izobličenja i eventualna kašnjenja, pojačavači se mogu uprošćeno predstaviti sa tri parametra. To su:

- pojačanje: A (može da se definiše kao naponsko pojačanje - $A_V = V_o/V_i$, strujno pojačanje - $A_I = I_o/I_i$, prenosna otpornost - $R_M = V_o/I_i$ ili prenosna provodnost - $G_M = I_o/V_i$);
- ulazna otpornost: R_I ;
- izlazna otpornost: R_O .

Pri označavanju struja i napona koriste se mala slova u indeksu da bi se naglasilo da se ne radi o kompletnom signalu već samo o maloj promeni na linearnom delu prenosne karakteristike.

Na slici 2.41 date su ekvivalentne šeme pojačavača na bazi uvedenih parametara A , R_I i R_O . U datim mrežnim modelima pojačanje je predstavljeno kontrolisanim izvorima. Sam izvor može biti strujni ili naponski, a takođe i kontrola može da se vrši strujom ili naponom. Prikazana četiri modela su nužna idealizacija, u praksi realni pojačavači se uvrštavaju u odgovarajuću kategoriju u zavisnosti od veličine njihove ulazne i izlazne otpornosti.

Ulazna otpornost pojačavača se definiše kao odnos ulaznog napona i ulazne struje: $R_I = V_i / I_i$, a izlazna otpornost (R_O) se tumači kao unutrašnja otpornost realnog naponskog ili realnog strujnog generatora (prema Thèvenin-ovoj ili Norton-ovoj teoremi).



Slika 2.41. Četiri moguća mrežna modela za pojačavače: a) naponski pojačavač upravljani naponom, b) strujni pojačavač upravljani strujom, c) naponski pojačavač upravljani strujom, d) strujni pojačavač upravljani naponom.

Pri formiranju modela za pojačavač koristi se upravljanje naponom ako je ulazna otpornost pojačavača mnogo veća od unutrašnje otpornosti izvora signala. U suprotnom slučaju bolje je uzeti model sa strujnim upravljanjem. Na izlazu modela opravdano je uzeti naponski izvor ako je unutrašnja otpornost pojačavača mala u odnosu na otpornost potrošača. Modelovanje izlaznog dela kod pojačavača sa velikom izlaznom otpornošću je opravdano raditi sa strujnim generatorom.

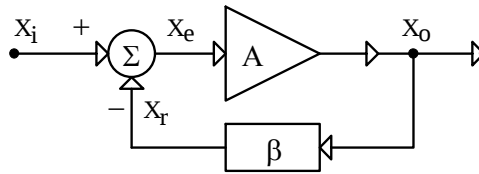
2.3.2. Pojačavači sa povratnom spregom

Pojačavači se mogu koristiti u osnovnoj formi ali radi poboljšanja parametara često se primenjuje povratna sprega. Povratna sprega je jedan vrlo rasprostranjeni postupak u tehnici.

Sušтина povratne sprege je da se jedan deo izlaznog signala kombinuje sa ulaznim signalom, što dovodi do promene parametara sistema.

Tumačenje povratne sprege je dato pomoću slike 2.42. Blok A je u ovom slučaju pojačavač a blok β je kolo povratne sprege (redovno se konstruiše od pasivnih komponenti).

Slika 2.42. Blok šema pojačavača sa povratnom spregom.



Ulazni signal (X_i) se na ulazu kombinuje sa signalom povratne sprege (X_r) pomoću kola za sabiranje (oduzimanje). Tako nastaje signal greške (X_e). Osnovni pojačavač, u stvari, pojačava signal greške A puta, i formira izlazni signal (X_o). Kolo povratne sprege formira signal povratne sprege od izlaznog signala. Polazne jednačine kojima se može opisati rad kola sa povratnom spregom su sledeće:

$$X_o = AX_e \dots\dots\dots(2.11.)$$

$$X_e = X_i - X_r \dots\dots\dots(2.12.)$$

$$X_r = \beta X_o \dots\dots\dots(2.13.)$$

Rešavanjem gornjeg sistema jednačina - po promenljivoj X_o dobija se veza između ulaznog signala i izlaznog signala:

$$X_o = \frac{A}{1 + \beta A} X_i \dots\dots\dots(2.14.)$$

Oдавде sledi formula za pojačanje pojačavača sa povratnom spregom:

$$A_r = \frac{A}{1 + \beta A} \dots\dots\dots(2.15.)$$

U kolima gde se signal povratne sprege oduzima od ulaznog signala (smanjuje ga), govorimo o negativnoj povratnoj sprezi, inače je reč o pozitivnoj povratnoj sprezi. Kod pojačavačkih kola redovno se primenjuje negativna povratna sprega. U ovom slučaju važi nejednačina $A_r < A$, pošto je $1 + \beta A > 1$.

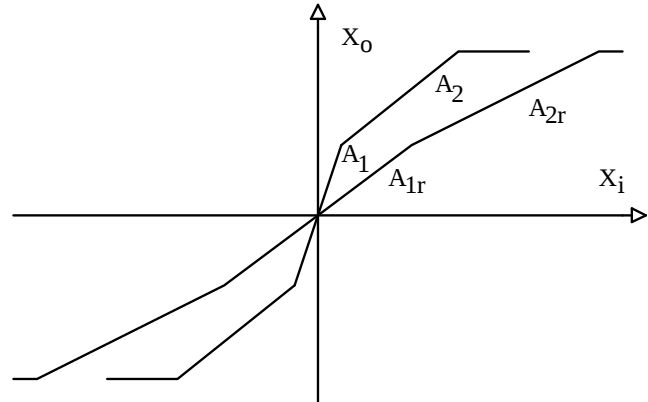
Pad pojačanja predstavlja izvestan gubitak ali se lako nadoknađuje (na pr., ugradnjom novog pojačavačkog stepena). Dobitak je, međutim, višestruk. Prvo se može navesti da je pojačanje sa povratnom spregom (A_r) manje osetljivo na promene parametara aktivnih elemenata nego samo osnovno pojačanje (A). Izračunavanjem izvoda od funkcije A_r prema jednačini 2.15 i deljenjem sa A_r dobija se sledeća zavisnost:

$$\frac{dA_r}{A_r} = \frac{1}{1 + \beta A} \frac{dA}{A} \dots\dots\dots(2.16.)$$

koja kaže da su relativne promene pojačanja sa povratnom spregom $(1 + \beta A)$ puta manje od relativnih promena pojačanja polaznog pojačavača bez povratne sprege. To je značajan dobitak, pošto se parametri običnih pojačavača menjaju značajno pod uticajem promene temperature, pri promeni radne tačke ili pri zameni komponenta.

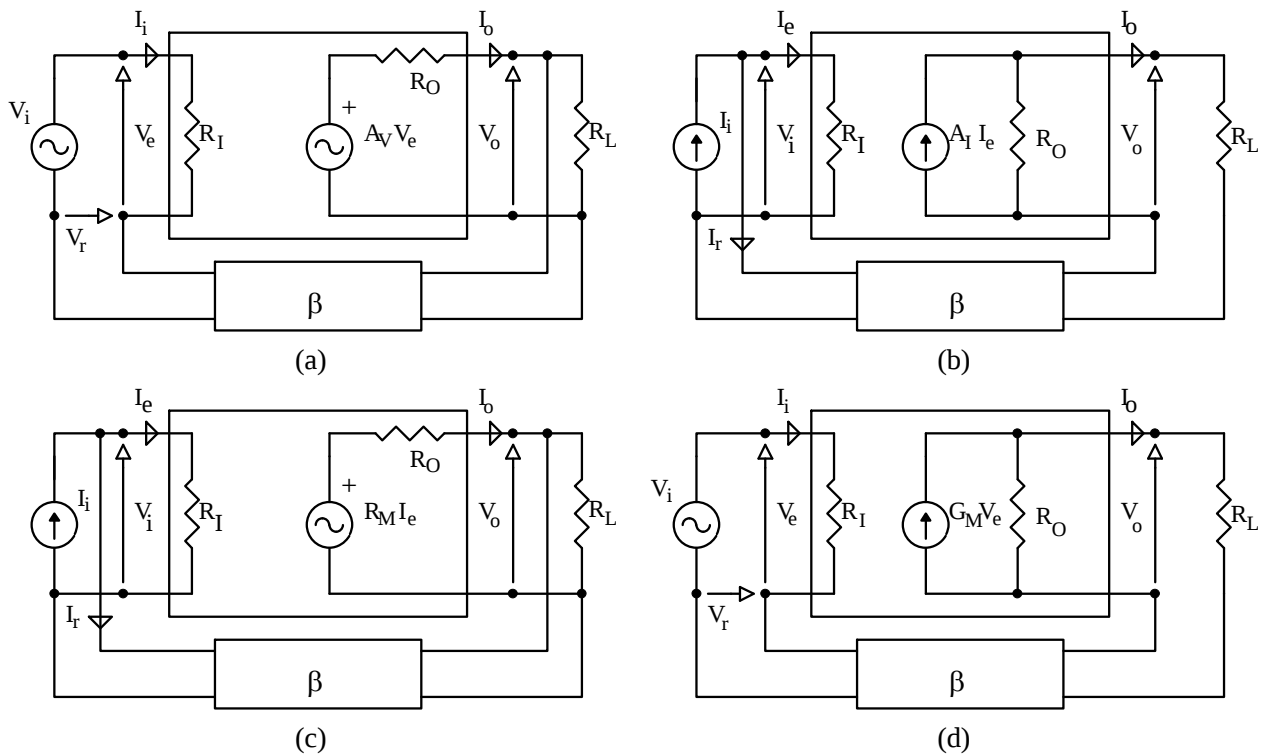
Na sličan način se može pokazati da će se nelinearna karakteristika osnovnog pojačavača značajno linearizovati pod uticajem negativne povratne sprege. Mogući rezultat je prikazan na slici 2.43.

Slika 2.43. Negativna povratna sprega smanjuje nelinearnost pojačavača.



Takođe je značajan dobitak, što se primenom povratne sprega, smanjuju kašnjenja u pojačavaču. Time se proširuje propusni opseg pojačavača.

Pri opisivanju pojačavača signali X_i , X_e , X_r , X_o mogu biti naponi i struje. Kolo povratne sprega se uvek prilagođava tipu pojačavača odnosno mrežnom modelu iz tačke 2.3.1. Pri naponskom izlazu kolo povratne sprega posmatra izlazni napon i formira signal povratne sprega srazmeran sa tim naponom, dok se kod strujnog izlaza izlazna struja propušta kroz ulaz kola povratne sprega. Slična logika važi na ulazu: pri strujnoj kontroli i izlaz kola povratne sprega treba da je struja, a kod naponske kontrole i izlaz kola povratne sprega daje napon. Iz dosad navedenog jasno je da za četiri mrežna modela pojačavača odgovaraju četiri vrste kola povratne sprega (slika 2.44).



Slika 2.44. Struktura pojačavača sa povratnom spregom u zavisnosti od mrežnog modela pojačavača: a) naponsko-naponska povratna sprega primenjena na naponom upravljani naponski pojačavač, b) strujno-strujna povratna sprega primenjena na strujom upravljani strujni pojačavač, c) naponsko-strujna povratna sprega primenjena na strujom upravljani naponski pojačavač, d) strujno-naponska povratna sprega primenjena na naponom upravljani strujni pojačavač.

Prilikom primene negativne povratne sprege kod pojačavača sa naponskim ulazom raste ulazna otpornost a kod strujnog ulaza opada. Slično, kod naponskog izlaza izlazna otpornost opada a kod strujnog izlaza raste. Sve te tendencije se mogu smatrati za pozitivne sa aspekta primene pojačavača.

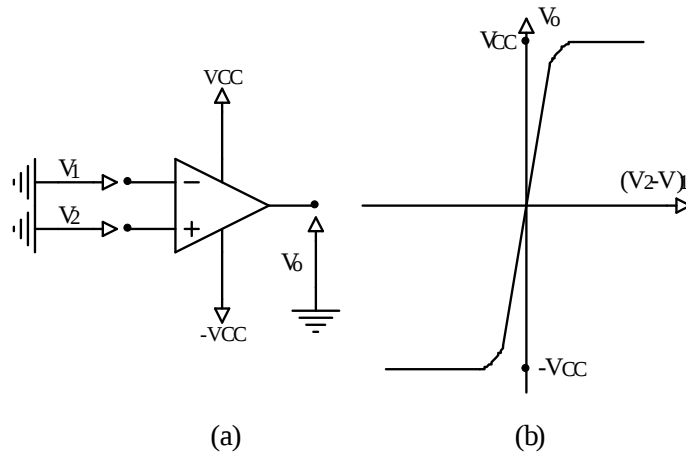
Na kraju ćemo spomenuti jednu neželjenu posledicu negativne povratne sprege. Istovremeno delovanje kašnjenja u pojačavaču i negativne povratne sprege često dovodi do zaoscilovanja. Oscilacije se manifestuju u tome da pojačavač generiše periodičan signal bez prisustva ulaznog signala. Podrazumeva se da se takav pojačavač ne može koristiti.

2.3.2. Operacioni pojačavači

Analizu i primenu pojačavača umnogome olakšava ako je kod naponskog ulaza velika ulazna otpornost (mnogo veća od unutrašnje otpornosti izvora signala) a kod strujnog ulaza mala ulazna otpornost. Kod naponskog izlaza poželjna je mala izlazna otpornost (mnogo manja od otpornosti potrošača), suprotno tome pri strujnom izlazu poželjna je velika izlazna otpornost.

Takve idealizovane pojačavače je nemoguće realizovati sa prostim tranzistorskim konfiguracijama. Međutim postoje višestepeni integrisani pojačavači koji se ponašaju kao približno idealni naponski pojačavači sa velikim naponskim pojačanjem. Takvi pojačavači nose naziv operacioni pojačavači. Na tržištu postoji veliki izbor operacionih pojačavača i zbog idealnog ponašanja vrlo široko se primenjuju.

Nasuprot složenoj unutrašnjoj strukturi, operacioni pojačavač se smatra za osnovnu elektronsku komponentu. Njegov grafički simbol i prenosna karakteristika su dati na slici 2.45. Karakteristika pokazuje ono što je već unapred rečeno, da je operacioni pojačavač naponski pojačavač sa velikim pojačanjem. I po drugim aspektima se približava idealnom naponskom pojačavaču: ulazna otpornost mu je vrlo velika a izlazna otpornost vrlo mala.



Slika 2.45. Grafički simbol (a) i prenosna karakteristika operacionog pojačavača (b).

Za normalan rad operacionog pojačavača redovno treba obezbediti dvostruko, simetrično napajanje ($+V_{CC}$, $-V_{CC}$). Masa se redovno ne priključuje na operacioni pojačavač (eventualno pri jednostrukom napajanju). Novina u odnosu na običan naponski pojačavač je da poseduje dva ulaza (sa $-$ je označen invertujući ulaz a sa $+$ neinvertujući ulaz), ulazni naponi dovedeni na njih su označeni sa V_1 , V_2 . Operacioni pojačavač pojačava signal po formuli:

$$V_o = A(V_2 - V_1) \dots\dots\dots(2.17.)$$

znači vrši pojačanje razlike napona. Ako se razlika napona ne menja, sami ulazni naponi mogu da se menjaju u širokim granicama (unutar napona napajanja) bez značajnijeg uticaja na izlazni napon.

S obzirom da je naponsko pojačanje reda veličine 10^5 , a izlazni napon ograničen na opseg od otprilike $\pm 10V$, ulazna razlika napona redovno ne prelazi vrednost od $0,1 \text{ mV}$.

Iz dosada rečenog sledi da je opravdana idealizacija operacionog pojačavača u sledećem smislu: $A \rightarrow \infty$, $R_i \rightarrow \infty$, $R_o \rightarrow 0$, $V_2 - V_1 \rightarrow 0$.

2.3.4. Kola sa operacionim pojačavačima

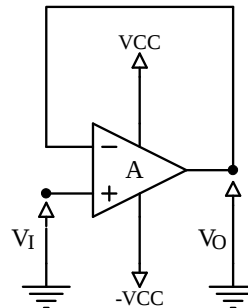
Lako se zaključuje da se operacioni pojačavači, sami za sebe, teško ili nikako, ne mogu koristiti. Veliko pojačanje, sa jedne strane nije neophodno, sa druge strane zbog velikog pojačanja pojačavač se ne može kontrolisati. Ulazni opseg je tako uzan da će i najmanja smetnja ili ofset dovesti do neželjenih reakcija (zasićenje, izobličenje, oscilovanje).

Primenom negativne povratne sprege svi ovi problemi se eliminišu, operacioni pojačavač postaje komponenta koja je široko primenjiva. Polazeći od velikog pojačanja osnovnog pojačavača povratna sprega će biti vrlo jaka, dobija se kolo sa vrlo stabilnim ponašanjem. U daljem tekstu će se prikazati najpoznatije primene operacionih pojačavača.

a) Sleditelj napona

Kod ovog kola (slika 2.46) kompletan izlazni napon je vraćen na invertujući ulaz. S obzirom na veliko pojačanje operacionog pojačanja važiće uslov $V_1 = V_2$, iz čega sledi da izlazni napon prati ulazni napon: $V_O = V_I$.

Slika 2.46. Precizni sleditelj napona realizovan sa operacionim pojačavačem.

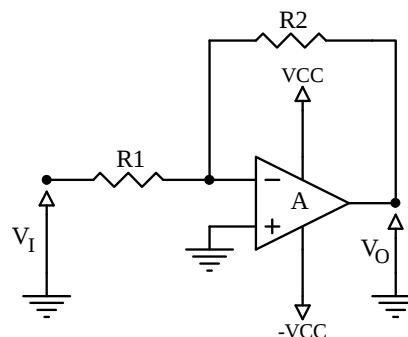


Sleditelj napona se koristi kao odvojni stepen, pošto mu je naponsko pojačanje tačno jedinično, ulazna otpornost je izuzetno velika (mnogo veća i od ulazne otpornosti samog operacionog pojačavača), a izlazna otpornost je zanemarljiva (mnogo manja od izlazne otpornosti operacionog pojačavača).

b) Invertujući pojačavač

Invertujući pojačavač sa precizno definisanim pojačanjem može se ostvariti prema šemi sa slike 2.47. Tu se zapravo radi o strujom upravljanim naponskom pojačavaču sa negativnom povratnom spregom. U takvim slučajevima, pri analizi, bilo bi potrebno pretvoriti realni naponski generator koga čine elementi V_I i R_I u realni strujni generator, i tako sprovesti analizu.

Slika 2.47. Precizni invertujući pojačavač sa operacionim pojačavačem.



Postoji, međutim, prostija metoda. S obzirom na uslov $V_1=V_2$, i pošto je neinvertujući ulaz vezan na masu, zaključimo da je invertujući ulaz na takozvanoj virtuelnoj masi. Virtuelna masa ne znači stvarnu vezu sa masom, već samo ukazuje na činjenicu da, zahvaljujući povratnoj sprezi, potencijal invertujućeg ulaza je $0V$, isto kao potencijal mase. Odavde sledi da će se kroz otpornik R_1 uspostaviti struja:

$$I_{R1} = \frac{V_I}{R_1} \dots\dots\dots(2.18.)$$

Pošto je ulazna struja operacionog pojačavača zanemarljiva zbog velike ulazne otpornosti, može se staviti $I_{R2}=I_{R1}$. Zapravo, negativna povratna sprega u ovom kolu radi na taj način da se izlazni napon menja dok se ne izjednače struje otpornika. Čim se pojavi razlika, invertujući ulaz se pomeri sa virtuelne mase. Pri tome, izlazni napon se pomeri u tom smeru da se ponovo izjednače struje otpornika. Izlazni napon se može izračunati iz formule:

$$V_O = V_1 - R_2 I_{R2} \dots\dots\dots(2.19.)$$

Pošto je $V_1=0$, sledi:

$$A_r = \frac{V_O}{V_I} = -\frac{R_2}{R_1} \dots\dots\dots(2.20.)$$

Sušтина dobijenog rezultata je da se pojačanje može precizno podesiti izborom dva otpornika, promene parametara operacionog pojačavača nemaju uticaja. Jedini preduslov je da operacioni pojačavač ima veliko pojačanje. Naravno, pri izboru otpornika R_1 treba paziti da se ne preoptereti izvor signala, a pri izboru R_2 bitno je da se ne preoptereti izlaz operacionog pojačavača (obično su izlazi operacionih pojačavača konstruisani na potrošnje do nekoliko mA).

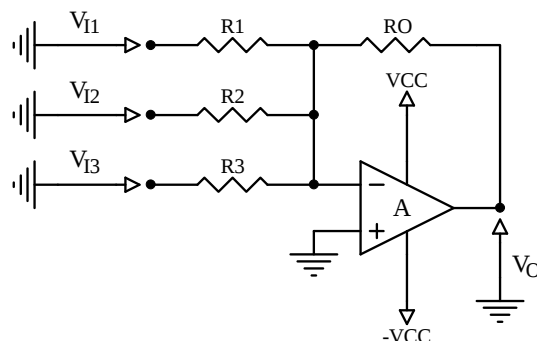
c) Pojačavač za sabiranje signala

I u ovom slučaju (slika 2.48) polazimo od uslova $V_1=0$. Pojedine ulazne struje se mogu računati kao odnosi ulaznih napona (V_{I1} , V_{I2} , V_{I3}) i otpornika vezanih prema ulazu operacionog pojačavača (R_1 , R_2 , R_3). Struju otpornika R_O čini zbir navedene tri struje. Po tome, za izlazni napon važiće formula:

$$V_O = -\frac{R_O}{R_1} V_{I1} - \frac{R_O}{R_2} V_{I2} - \frac{R_O}{R_3} V_{I3} \dots\dots\dots(2.21.)$$

Proizvoljno su uzeta tri ulaza, na ovaj način se može sumirati i veći broj ulaza po potrebi i faktori množenja u zbiru se mogu birati slobodno. Pri dimenzionisanju jedino treba paziti da se izlaz operacionog pojačavača ne preoptereti po struji i po naponu. Pošto više ulaza deluje istovremeno, treba naći kritični trenutak i za to vršiti izbor otpornika.

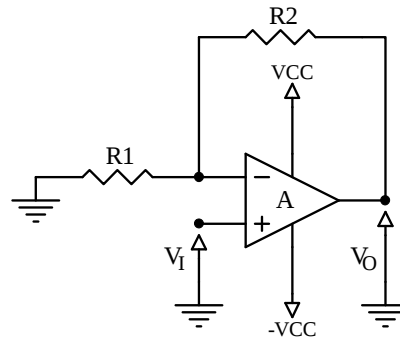
Slika 2.48. Pojačavač za sumiranje signala na bazi operacionog pojačavača.



d) Neinvertujući pojačavač

I sleditelj napona je neinvertujućeg karaktera, ali mu se ne može podešavati pojačanje. Nasuprot tome, pojačanje sklopa na slici 2.49 se može podešavati u izvesnim granicama. Ovde se radi o naponskom pojačavaču sa naponskom povratnom spregom.

Slika 2.49. Neinvertujući pojačavač realizovan na bazi operacionog pojačavača.



Kolo se može analizirati relativno prosto na sledeći način:
Iz uslova $V_I = V_1 = V_2$ odredi se struja otpornika R_1 :

$$I_{R1} = \frac{V_I}{R_1} \dots\dots\dots(2.22.)$$

S obzirom na veliku ulaznu otpornost operacionog pojačavača ista struja protiče i kroz otpornik R_2 . Na osnovu toga, izlazni napon se može računati po formuli:

$$V_O = V_I + R_2 I_{R1} = V_I + \frac{V_I}{R_1} R_2 = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_I, \dots\dots\dots(2.23.)$$

prema tome, pojačanje je:

$$A_r = \frac{V_O}{V_I} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \dots\dots\dots(2.24.)$$

Nasuprot invertujućem pojačavaču (slika 2.47), ovde se ne može podesiti pojačanje manje od jedinice. Ako se pojavi takva potreba, ulazni napon se može smanjiti otporničkim razdelnikom na koji se može povezati sleditelj napona (slika 2.46) radi rasterećenja razdelnika od strane potrošača.

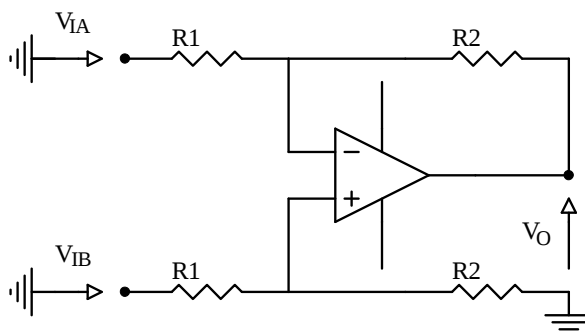
e) Pojačavač razlike dva napona (diferencijalni pojačavač)

Postoje takvi slučajevi u elektronici da nijedan kraj od izvora signala nije uzemljen. Tada se moraju posmatrati oba kraja i potrebno je pojačati razliku napona između njih. Operacioni pojačavač već samo po sebi se ponaša kao pojačavač razlike napona, nažalost, zbog prevelikog pojačanja, ne može se koristiti direktno. Primenom povratne sprege međutim može se konstruisati odgovarajući diferencijalni pojačavač (slika 2.50). Pretpostavljamo rad u linearnom režimu, prema tome važi teorema superpozicije. Po toj teoremi mogu se izračunati odzivi pojačavača posebno na jedan i drugi ulazni signal, zatim se ukupan odziv (rezultantni izlazni napon) dobija kao zbir navedena dva odziva.

U odnosu na ulaz A kolo se ponaša kao invertujući pojačavač:

$$V_{OA} = -\frac{R_2}{R_1} V_{IA} \dots\dots\dots(2.25.)$$

Slika 2.50. Diferencijalni pojačavač sa operacionim pojačavačem.



Napon V_{IB} se prvo razdeli u odnosu $R_2/(R_1+R_2)$, tako se dovodi na neinvertujući ulaz operacionog pojačavača, zatim se pojačava sa pojačanjem neinvertujućeg stepena:

$$V_{OB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) V_{IB} = \frac{R_2}{R_1} V_{IB} \dots\dots\dots (2.26.)$$

Ukupan izlazni napon će biti:

$$V_O = (V_{IB} - V_{IA}) \frac{R_2}{R_1} \dots\dots\dots (2.27.)$$

dakle, srazmeran je razlici ulaznih napona.

Nedostatak prikazanog diferencijalnog pojačavača je što su mu ulazne otpornosti relativno male vrednosti i nisu jednake na oba ulaza. Složenijim kolom, primenom dva ili tri operaciona pojačavača ovaj nedostatak se može otkloniti.

f) Kolo za integraljenje

Pri analognoj obradi signala često se javlja potreba za određivanje vremenskog integrala ulaznog signala. Kolo koje može da obavi integraljenje u vremenskom domenu je prikazano na slici 2.51. I kod ovog kola se može primeniti pretpostavka da je invertujući ulaz operacionog pojačavača na virtuelnoj (prividnoj) masi. Pošto je ulazna otpornost operacionog pojačavača velika, struja otpornika će biti jednaka sa strujom kondenzatora:

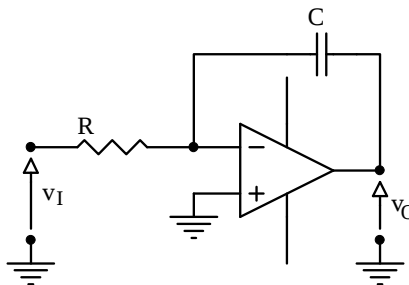
$$\frac{v_I(t)}{R} = C \frac{dv_C(t)}{dt} \dots\dots\dots (2.28.)$$

Za razliku od dosadašnje prakse, tu su promenljive označene sa malim slovima i velika su slova u indeksima da bi se naglasilo da se radi o vremenskim funkcijama. Pošto je sa druge strane $v_O = -v_C$, sledi:

$$v_O(t) = -\frac{1}{RC} \int v_I(t) dt \dots\dots\dots (2.29.)$$

Tu je računat neodređeni integral ulazne promenljive, kod konkretnih proračuna treba uzeti u obzir i početnu vrednost napona na kondenzatoru. Treba znati da na ulaz integratora ima smisla dovesti samo signal sa nultom srednjom vrednošću. Već i mala jednosmerna komponenta će u dovoljno dugom periodu dovesti izlaz integratora u zasićenje.

Slika 2.51. Integrator sa operacionim pojačavačem.



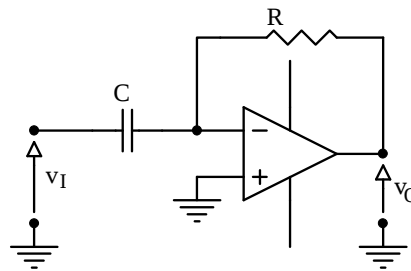
g) Kolo za diferenciranje

Zamenom RC elemenata se dobija kolo za diferenciranje prikazano na slici 2.52. Pošto je struja kondenzatora srazmerna sa izvodom ulaznog napona, za izlazni napon se dobija formula:

$$v_o(t) = -RC \frac{dv_I(t)}{dt} \dots\dots\dots(2.30.)$$

Prikazano kolo se dosta retko koristi. Razlog tome je velika osetljivost na smetnje i sklonost oscilovanju.

Slika 2.52. Kolo za diferenciranje sa operacionim pojačavačem.



2.3.5. Pojačavač sa zajedničkim emitorom

Prenosna karakteristika logičkog invertora sa bipolarnim tranzistorom prikazana pod tačkom 2.2.2 ima veliku strminu na srednjem delu: pri postepenoj promeni ulaznog napona izlazni napon se menja brzo. Svako kolo koje pokazuje velike promene na izlazu pri malim promenama na ulazu, može da se koristi kao pojačavač.

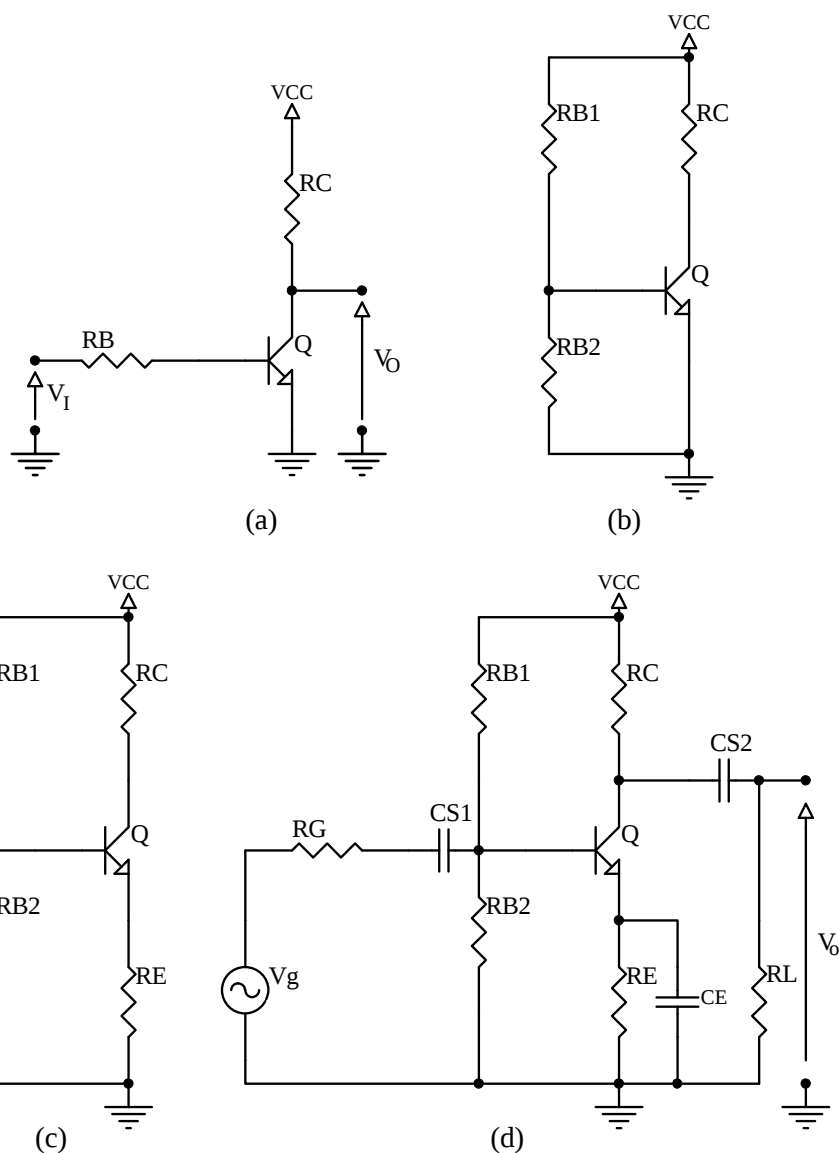
Kod pojačavačkih kola treba rešiti sledeće zadatke:

- Treba realizovati kolo sa dovoljno velikim nagibom prenosne karakteristike.
- Aktivnu komponentu (komponente) u kolu treba tako polarizovati da kolo radi na delu karakteristike sa velikim nagibom.
- Ulazni i izlazni signal treba tako spregnuti sa pojačavačem da prisustvo izvora signala i potrošača ne menja polarizaciju (nameštenu radnu tačku).

Već i sa jednom aktivnom komponentom se može postići značajno pojačanje, pod pretpostavkom da su gornji zadaci adekvatno rešeni. U slučaju poluprovodničkih rešenja aktivna komponenta može biti bipolarni tranzistor, jfet ili mosfet. Tiristor zbog bistabilnog ponašanja nije pogodan za realizaciju pojačavačke karakteristike. Primena IGBT-a nije nemoguća ali nije uobičajena. Pojedine pojačavačke konfiguracije su svoj naziv dobili po tome, koja od tri izvoda je zajednička za ulazno i izlazno kolo.

Pojačavač sa zajedničkim emitorom se može izvesti iz logičkog invertora sa bipolarnim tranzistorom prema slici 2.53. Na slici 2.53.b polarizacija je rešena otporničkim razdelnikom vezanim prema naponu napajanja (V_{CC}). Kod pojačavačkih kola obično izvor signala ne poseduje takvu jednosmernu komponentu koja bi mogla obezbediti potrebnu baznu struju za tranzistor. Na slici 2.53.c kolo je dopunjeno sa emitorskim otpornikom male otpornosti. Bez tog otpornika radna tačka tranzistora bi bila jako osetljiva na promene parametara tranzistora (pri zameni tranzistora, promeni temperature itd.).

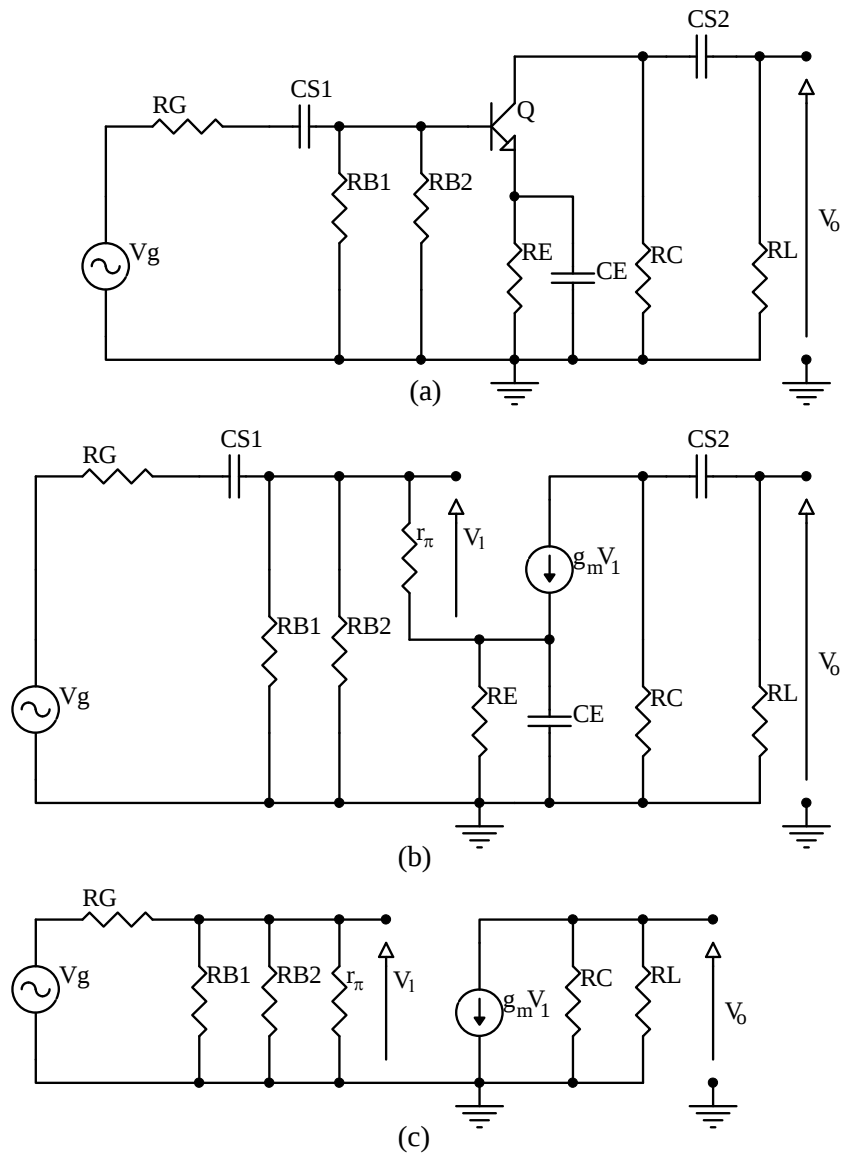
Na slici 2.53.d izvor signala (V_g) i potrošač (R_L) su priključeni na osnovno kolo preko kondenzatora. Sprežni kondenzatori (C_{S1} , C_{S2}) sa okolnim otpornicima čine propusnike visokih učestanosti što omogućava prenos naizmeničnih signala do neke donje granične učestanosti, ali ujedno sprečavaju poremećivanje radne tačke tranzistora. Umesto kapacitivne sprege mogli bi primeniti i induktivnu (transformatorsku spregu). U tom slučaju, kod proračuna treba modelovati transformator. Kondenzator C_E na radnim frekvencijama premošćava otpornik R_E i time povećava pojačanje tranzistorskog stepena.



Slika 2.53. Izvođenje pojačavača sa zajedničkim emitorom iz logičkog invertora: a) logički inverter sa bipolarnim tranzistorom, b) polarizacija pomoću otporničkog razdelnika, c) stabilizacija radne tačke sa emitorskim otpornikom, d) sprezanje izvora signala i potrošača pomoću kondenzatora.

Pod analizom pojačavača podrazumeva se određivanje parametara A_v , A_i , R_i , R_o . Kod tranzistorskih pojačavača analizi prethodi postupak modelovanja. Modelovanje se sastoji od sledećih koraka (slika 2.54):

a) Isključe se naponi napajanja (i eventualni drugi izvori jednosmernog napona i struje). Pri isključivanju naponskog generatora, na mesto generatora stavlja se kratak spoj, a kod strujnog generatora mesto generatora ostaje u prekidu. Naponi napajanja se isključuju jer nemaju direktan uticaj na naizmenične signale u kolu, oni samo određuju radnu tačku tranzistora i time vrše posredan uticaj na odziv. U ovom smislu može se primeniti teorema superpozicije prema kojoj vršimo posebnu analizu za jednosmerni i naizmenični režim.



Slika 2.54. Postupak modelovanja pojačavača sa zajedničkim emitorom: a) kolo dobijeno isključivanjem naponom napajanja, b) kolo u kome je tranzistor zamenjen sa svojom ekvivalentnom šemom, c) konačni model sa kratko spojenim kondenzatorima.

b) Tranzistor se zameni sa odgovarajućom ekvivalentnom šemom. Najpraktičnije je koristiti ekvivalentnu šemu za režim malih signala prikazan na slici 1.24.b (takozvana hibridna π ekvivalentna šema) jer je ta šema, uz male izmene (ubacivanjem parazitnih kapacitivnosti) pogodna i za analize na visokim frekvencijama. Parametri tog modela (ekvivalentne šeme) se računaju na sledeći način:

$$r_{\pi} = \beta \frac{V_T}{I_C}, \dots \dots \dots (2.31.)$$

$$g_m = \frac{I_C}{V_T}, \dots \dots \dots (2.32.)$$

gde je:

β – faktor strujnog pojačanja tranzistora,
 V_T – termički napon,
 I_C – mirna struja kolektora.

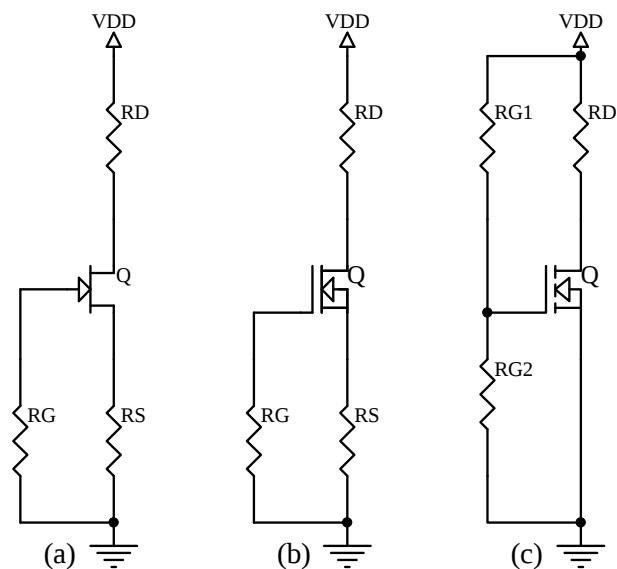
c) U trećem koraku kondenzatori se zamene sa kratkim spojem. Sklop se ponaša kao propusnik visokih učestanosti jer je na radnoj učestanosti impedansa kondenzatora zanemarljiva u odnosu na okolne otpornike.

Na slici 2.54.c može se primetiti da je emitor tranzistora vezan na masu koja je zajednička tačka za ulazno i izlazno kolo. Zbog ovoga se kaže da je reč o kolu sa zajedničkim emitorom.

Dobijeno kolo je linearno, zato se mogu primeniti metode analize uobičajene kod linearnih kola. Vrednosti parametara pojačavača sa zajedničkim emitorom donekle zavise od izbora komponenti ali se uglavnom kreću u sledećim opsezima: $A_v=10...100$, $A_i=10...100$, $R_i=1k\Omega...10k\Omega$, $R_o=1k\Omega...10k\Omega$. Drugim rečima, naponsko i strujno pojačanje su značajni, a ulazna i izlazna otpornost su umerene vrednosti. Pošto ovaj sklop pojačava i napon i struju, dobija se veliko pojačanje snage.

Na sličan način se mogu konstruisati pojačavači sa jfet-ovima i mosfet-ovima, s tim da kod njih stepen sa zajedničkim sorsom daje slične performanse. Glavne razlike u odnosu na bipolarne tranzistore uočavaju se u podešavanju radne tačke. Načini nameštanja radne tačke su prikazani na slici 2.55. Razlikuje se i model jfet-ova i mosfet-ova za režim malih signala (videti tačku 1.2.3 i 1.2.4). S obzirom na beskonačne ulazne otpornosti ovih pojačavačkih komponenti, sa jfetovima i mosfet-ovima se mogu realizovati pojačavači sa vrlo velikim ulaznim otpornostima. Iz istog razloga i strujno pojačanje je jako veliko. Naponsko pojačanje i izlazna otpornost će biti slične vrednosti kao kod stepena sa zajedničkim emitorom.

Slika 2.55. Polarizacija tranzistora sa efektom polja:
a) polarizacija jfet-a, b) polarizacija N kanalnog mosfet-a sa ugrađenim kanalom, c) polarizacija mosfet-a sa indukovanim N kanalom.

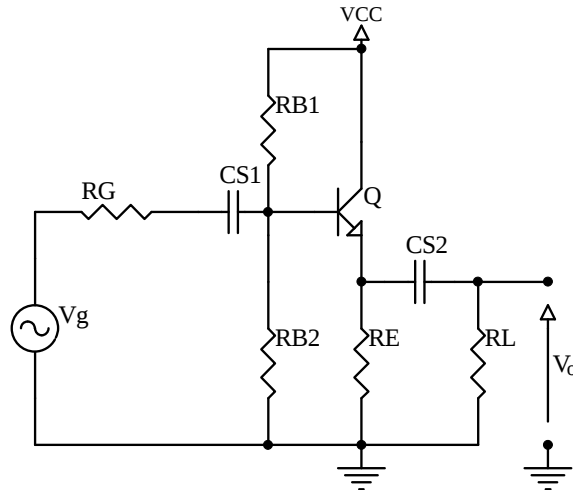


2.3.6. Stepen sa zajedničkim kolektorom

Ime ovog stepena potiče od toga što će se pri modelovanju kolektor vezivati na masu koja je zajednička tačka za ulazno i izlazno kolo. Ponekad se koristi i naziv emitorski sleditelj, pošto emitorski napon (uz odgovarajući ofset) prati bazni napon.

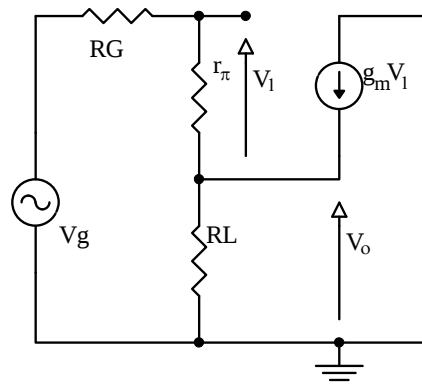
Pridržavajući se istih principa kao kod stepena sa zajedničkim emitorom može se konstruisati stepen sa zajedničkim kolektorom prema slici 2.56. Ako se ne naruši mirna radna tačka (to zavisi od opsega ulaznog napona), kod ovog spoja može se i izostaviti ulazni sprežni kondenzator (C_{S1}). I izlazni kondenzator (C_{S2}) se može izostaviti ako potrošaču ne smeta jednosmerna komponenta napona prisutna na emitoru. U ovom slučaju je emitorski otpornik istovetan sa potrošačem.

Slika 2.56. Kolo pojačavača sa zajedničkim kolektorom.



I ovde je potreban sličan postupak modelovanja kao kod stepena sa zajedničkim emitorom ako želimo da odredimo parametre pojačavača. Dobijeni linearni model je prikazan na slici 2.57. Kod stepena sa zajedničkim kolektorom vrednosti parametara se redovno kreću u sledećim opsezima: $A_v \approx 1$, $A_i = 10 \dots 100$, $R_i = 10k\Omega \dots 100k\Omega$, $R_o = 10\Omega \dots 100\Omega$. Zahvaljujući jediničnom naponskom pojačanju, velikoj ulaznoj otpornosti i maloj izlaznoj otpornosti ovaj stepen je idealan za realizaciju odvojnog stepena. Ovakve vrednosti ulazne i izlazne otpornosti obezbeđuju da ulaz pojačavača ne opterećuje izvor signala, a izlaz može da podnosi značajna opterećenja bez prigušenja signala (to su glavni zahtevi u vezi odvojnog stepena).

Slika 2.57. Linearni model pojačavača sa zajedničkim kolektorom (izostavljene su otpornosti R_{B1} , R_{B2} i R_E).



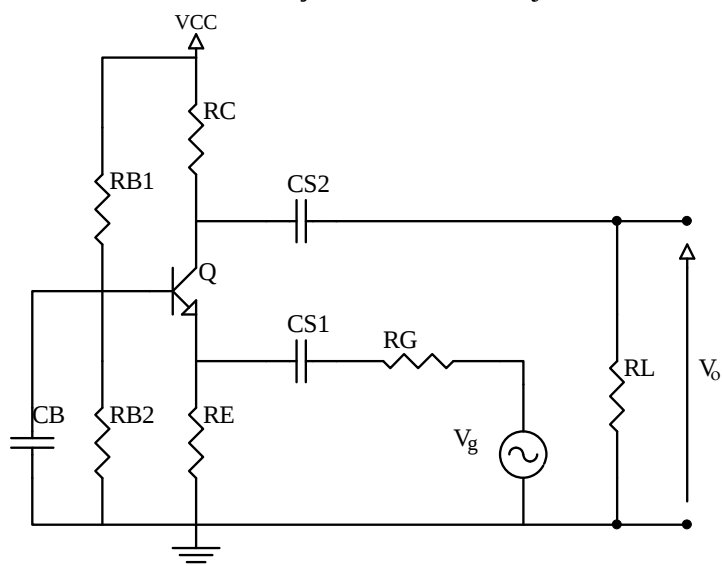
Slični odvojni stepeni se mogu konstruisati i sa jfet-ovima i mosfet-ovima, s tim da će tamo drejn biti zajednička elektroda za ulaz i izlaz. (stepen sa zajedničkim drejnom ili sleditelj sorsa). Parametri ovih kola su još bliži idealnom odvojnog stepenu (skoro beskonačna ulazna otpornost i nulta ulazna struja).

2.3.7. Stepen sa zajedničkom bazom

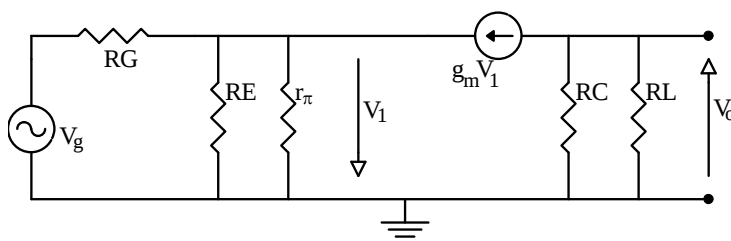
Stepeni sa zajedničkom bazom se redovno ostvaruju prema šemi na slici 2.58. Postupkom modelovanja dobija se ekvivalentna šema na slici 2.59. Parametri pojačavača zavise od izbora komponenti ali se uglavnom nalaze u sledećim opsezima: $A_v=10\ldots100$, $A_i\approx 1$, $R_i=10\Omega\ldots100\Omega$, $R_o=1k\Omega\ldots10\Omega$. Izgradnjom jfet ili mosfet pojačavačkih stepeni sa zajedničkim gejtom dobijaju se slični rezultati.

Može se zaključiti da se pojačavač sa zajedničkom bazom može koristiti kao naponski pojačavač, ali zbog male ulazne otpornosti ovog stepena radije se koristi stepen sa zajedničkim emitorom. Primena stepena sa zajedničkom bazom je opravdana samo na visokim frekvencijama jer u ovoj konfiguraciji parazitne kapacitivnosti tranzistora manje dolaze do izražaja.

Slika 2.58. Kolo pojačavača sa zajedničkom bazom.



Slika 2.59. Linearni model stepena sa zajedničkom bazom.



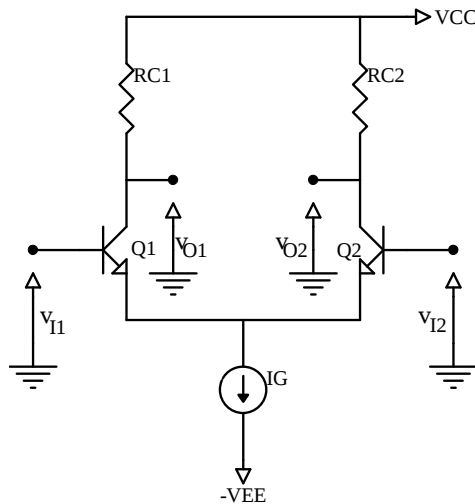
2.3.8. Diferencijalni pojačavač sa bipolarnim tranzistorima

Značajan nedostatak jednotranzistorskih pojačavačkih stepeni je što se ulazni i izlazni signal ne mogu sprežati direktno. Kod mnogih signala (audio, video) to i nije problem jer nema potrebe za prenošenjem jednosmerne komponente ili sporopromenljivog signala. Međutim, postoje oblasti primene (na primer, merna tehnika) gde je informacija upravo sadržana u jednosmernoj ili sporopromenljivoj komponenti. U takvim slučajevima samo direktno spregnuti pojačavači dolaze u obzir. Glavni predstavnici direktno spregnutih pojačavačkih stepeni su razni diferencijalni pojačavači.

Slika 2.60 prikazuje diferencijalni pojačavač realizovan sa dva NPN tranzistora. Za razliku od jednotranzistorskih stepeni ovde su na raspolaganju dva ulaza, na njih smo priključili napone v_{I1} i v_{I2} . Ne moraju se koristiti oba ulaza (jedan od ulaza se može uzemljiti), ali postojanje dva ulaza se uglavnom smatra za prednost.

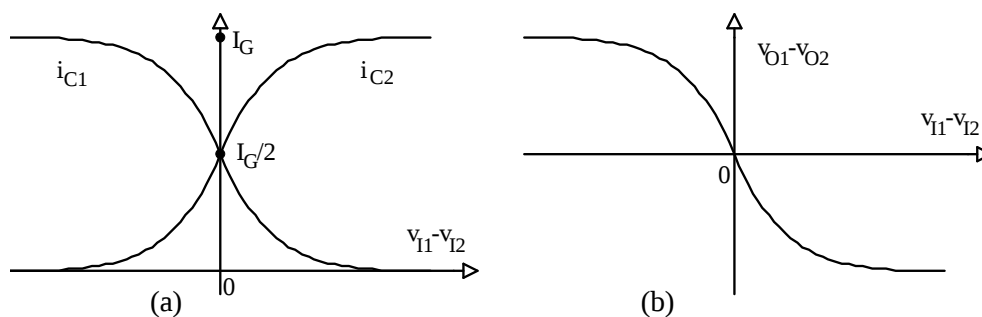
Može se zaključiti da je kolo simetrično u odnosu na ulaze. Pri izboru komponenti se vodi briga da ne bude razlike između leve i desne strane. Za dato kolo mogu se izvesti karakteristike prikazane na slici 2.61. Kao ulazni signal ovde je uzeta razlika ulaznih napona ($v_{I1}-v_{I2}$), na slici 2.61.a pojedine kolektorske struje su uzete kao izlazne promenljive, a na slici 2.61.b za izlaz je uzeta razlika kolektorskih napona.

Slika 2.60. Prost diferencijalni pojačavač konstruisan sa dva bipolarna tranzistora.



Ako je razlika ulaznih napona jednaka nuli, kolo je u ravnoteži. Kolektorske struje pojedinih tranzistora su identične, jednake su polovini struje strujnog generatora vezanog na emitore. Pri tome je i izlazna razlika napona jednaka nuli. Važno je napomenuti da se ulazni naponi mogu menjati u širokim granicama bez uticaja na kolektorske struje i na razliku napona na izlazu, sve dok nema razlike između ulaznih napona.

Ako se pojavi razlika napona na ulazima, kolo izlazi iz ravnoteže. Zbir kolektorskih struja i dalje ostaje konstantan, ali veći deo te struje će provoditi tranzistor čiji je bazni napon (poklapa se sa ulaznim naponom) višji. Pri malim razlikama ulaznih napona promena struje je linearna funkcija razlike napona, ali ako ulazni napon bude veći nekoliko puta od termičkog napona ($V_T \approx 25 \text{ mV}$), nagib prenosne karakteristike opada i dolazi u zasićenje. U graničnom slučaju, jedan od tranzistora preuzima svu struju strujnog izvora dok drugi tranzistor ostaje bez struje (zakoči se).



Slika 2.61. Karakteristike diferencijalnog pojačavača: a) zavisnost kolektorskih struja od razlike ulaznih napona, b) razlika napona na izlazu u funkciji ulazne razlike napona.

Za realizaciju pojačavača pogodni su centralni delovi karakteristika - tu je veliki nagib i zadovoljavajuća linearnost. U linearnom režimu pojedini tranzistori se mogu zameniti sa hibridnim π ekvivalentnim šemama. Iz tako dobijenog linearnog kola mogu se odrediti parametri pojačavača A_v , A_i , R_i , R_o . Vrednosti koje se dobijaju su slične onima kod stepena sa zajedničkim emitorom.

Kod diferencijalnih pojačavača mogu se definisati dve vrste pojačanja. Važnije je diferencijalno pojačanje:

$$A_{vd} = \frac{v_{O2} - v_{O1}}{v_{I2} - v_{I1}}, \dots\dots\dots(2.33.)$$

a pojačanje srednje vrednosti je definisano sa formulom:

$$A_{vc} = \frac{v_{O1} + v_{O2}}{v_{I1} + v_{I2}} \dots\dots\dots(2.34.)$$

i redovno ima vrednost mnogo manju od jedinice. Kao mera kvaliteta diferencijalnog pojačavača redovno se ne definišu pojedina pojačanja već odnos tih pojačanja:

$$CMRR = \frac{A_{vd}}{A_{vc}} \dots\dots\dots(2.35.)$$

Skraćenica *CMRR* potiče od engleskih reči *common mode rejection ratio*, što se može prevesti u faktor potiskivanja srednje vrednosti. Pošto kod savremenih diferencijalnih pojačavača faktor potiskivanja ima vrlo veliku vrednost, pogodnije ga je izraziti u decibelima:

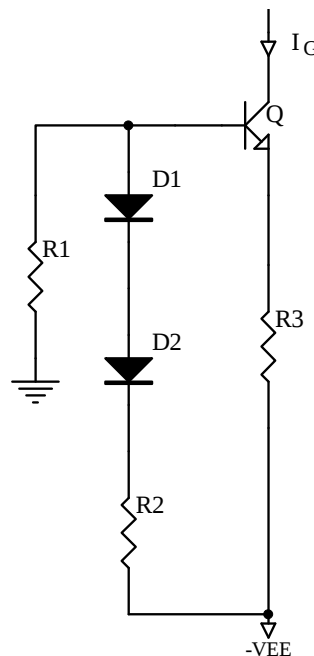
$$CMRR[dB] = 20 \log_{10} \frac{A_{vd}}{A_{vc}} \dots\dots\dots(2.36.)$$

Mogu se konstruisati diferencijalni pojačavački stepeni i sa jfet-ovima i mosfet-ovima na sličan način kao sa bipolarnim tranzistorima. Princip rada je sličan, bitna razlika je jako velika (skoro beskonačna) ulazna otpornost.

2.3.9. Strujni izvori, aktivna opterećenja, strujna ogledala

U prostijim slučajevima polarizacija tranzistora se vrši izvorima napajanja i otpornicima. Za istu svrhu u integrisanoj tehnici radije se koriste aktivna rešenja nabrojana u naslovu.

Slika 2.62 prikazuje tranzistorski strujni izvor. Polarizaciju tranzistora vrši negativan izvor napajanja označen sa $-V_{EE}$. Izlaznu struju strujnog izvora (I_G) čini kolektorska struja tranzistora. Napon na kolektoru mora biti veći od baznog napona (uslov za rad u aktivnom režimu) da bi struja izvora bila približno konstantna.



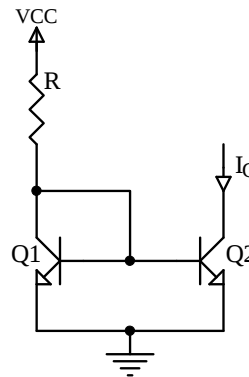
Slika 2.62. Prost strujni izvor sa bipolarnim tranzistorom.

Napon napajanja $-V_{EE}$, preko razdelnika sačinjenog od elemenata R_1 , D_1 , D_2 i R_2 se dovodi na bazu. Pošto je bazni napon na ovaj način stabilizovan, pretpostavljajući aktivni režim, i napon emitora će imati fiksnu vrednost. Na taj način i napon na otporniku R_3 je konstantan, takođe i struja tog otpornika. Pošto kod savremenih tranzistora faktor strujnog pojačanja (β) ima veliku vrednost, struja kolektora se minimalno razlikuje od struje emitora, znači i ona je stabilizovana.

Diode u baznom kolu smanjuju temperaturnu osetljivost ovog sklopa. Prikazana verzija strujnog izvora može da vrši polarizaciju jednog diferencijalnog pojačavača. U slučaju da je potrebna struja suprotnog smer, kolo se može okrenuti: umesto negativnog napajanja ($-V_{EE}$) priključi se pozitivno napajanje a NPN tranzistor se zameni sa PNP tranzistorom.

Integrisanoj tehnici je više prilagođeno kolo prikazano na slici 2.63, poznato kao strujno ogledalo. Struja otpornika je približno konstantna (ako je $V_{CC} = \text{const.}$), a ujedno je približno jednaka i struji kolektora tranzistora Q_1 (zanemaruju se bazne struje oba tranzistora). Pošto su naponi baza-emitor za oba tranzistora jednake vrednosti i pretpostavlja se rad u aktivnom režimu, i kolektorske struje će biti približno jednake. Kolektorska struja tranzistora Q_2 predstavlja izlaznu struju strujnog izvora (strujnog ogledala).

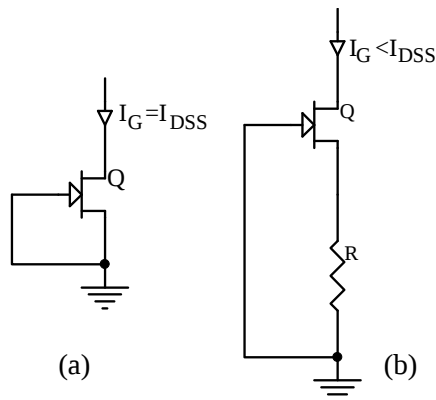
Slika 2.63. Strujno ogledalo sa bipolarnim tranzistorima.



Paralelnim sprezanjem spojeva baza-emitor za više tranzistora mogu se realizovati strujni izvori sa više izlaza. Ako se mogu menjati površine tih PN spojeva, struje pojedinih izvora se mogu podešavati. Važan uslov je da svi tranzistori moraju raditi na istoj temperaturi. Kod diskretnih tranzistora teško je zadovoljiti taj uslov međutim u integrisanoj tehnici nema tih problema zbog bliskosti elemenata. I tu se može okrenuti smer struje strujnog izvora samo treba okrenuti napajanje i NPN tranzistore zameniti sa PNP tranzistorima.

Konstrukcija strujnog izvora sa jfet-om je vrlo prosta. Prema slici 2.64.a, uz dovoljan napon V_{DS} (oblast zasićenja, $V_{DS} > V_{GS} - V_P$) jfet provodi struju I_{DSS} . Ako je potrebno podesiti manju struju, veže se otpornik redno sa sorsom (slika 2.64.b).

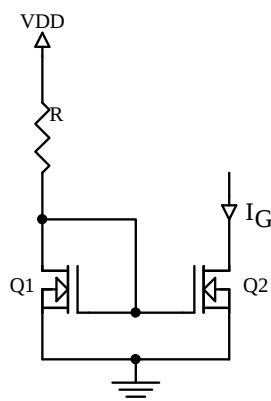
Slika 2.64. Izvor konstantne struje sa jfet-om: a) osnovna varijanta, b) podešavanje struje sa otpornikom u sorsu.



Slika 2.65, prikazuje strujni izvor sa mosfet-ovima. Ovde će jednakost napona V_{GS} obezbediti jednakost upravljačke struje i struje strujnog izvora. Svakako je preduslov da mosfet-ovi budu iste konstrukcije (iste su vrednosti parametara).

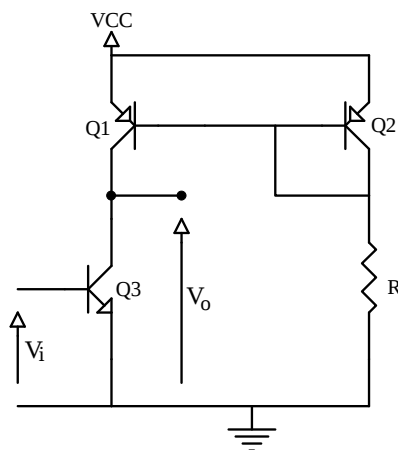
Pri izgradnji pojačavača, umesto otporničkog potrošača vrlo rado se koriste strujni izvori i strujna ogledala. Strujni izvori, pored obezbeđenja potrebne struje za polarizaciju tranzistora, zahvaljujući velikoj unutrašnjoj otpornosti izvora, omogućavaju i postizanje velikog pojačanja. Kod otporničkog opterećenja veliko pojačanje se može dobiti velikom vrednošću otpornosti, ali bi ujedno morali povećati i napon napajanja radi održavanja potrebne struje tranzistora u radnoj tački. Povećanje napona napajanja je krajnje nepoželjno, jer dovodi do velikih gubitaka i moraju se primeniti specijalni visokonaponski tranzistori.

Slika 2.65. Strujno ogledalo sa mosfet-om.



Slika 2.66 prikazuje pojačavač sa zajedničkim emitorom sa aktivnim opterećenjem u vidu strujnog ogledala (PNP izvedba). Na ovaj način se može postići otpornost potrošača reda više stotina $k\Omega$, zato će pojačanje ovakvog stepena biti za jedan do dva reda veličine veće od pojačanja običnog stepena sa zajedničkim emitorom.

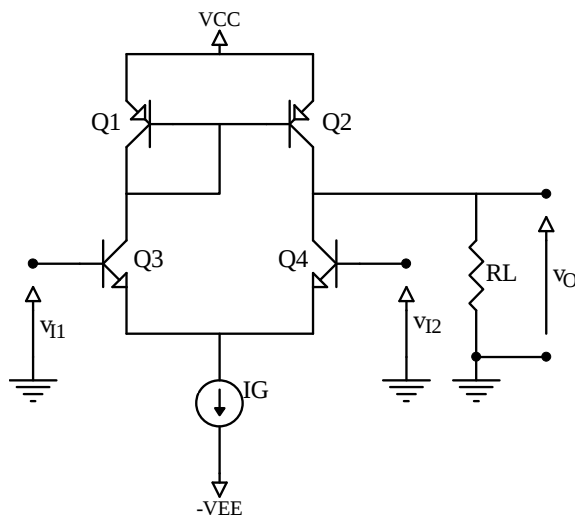
Slika 2.66. Pojačavač sa zajedničkim emitorom opterećen strujnim ogledalom.



Strujna ogledala se mogu uspešno primeniti i kod tranzistorskih diferencijalnih pojačavača. Na slici 2.67, nisu korišćeni posebni strujni izvori na pojedinim kolektorima nego je upravljački priključak strujnog izvora priključen na kolektor tranzistora Q1, a kolektor od Q2 je priključen na izlaz strujnog ogledala.

U ovoj konfiguraciji, promena struje kolektora I_{C1} , se preko strujnog ogledala, preslikava na izlaz i sabira se sa promenom I_{C2} . Na ovaj način na izlazu se pojavljuje dvostruka vrednost promene struje kolektora, i pored toga, izlaz se ne pojavljuje u diferencijalnoj formi već na potrošaču (R_L) vezanim na masu. To je vrlo važan detalj pri kaskadnom povezivanju pojačavača.

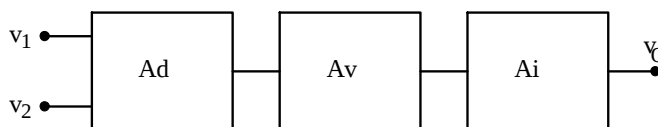
Slika 2.67. Diferencijalni pojačavač sa aktivnim opterećenjem u vidu strujnog izvora.



2.3.10. Unutrašnja struktura i realni parametri operacionih pojačavača

Pod tačkom 2.3.3 operacioni pojačavač je prikazan kao idealni naponski pojačavač. U stvarnosti operacioni pojačavači su integrisani višestepeni pojačavači. Njihova struktura se redovno može raščlaniti na tri dela prema slici 2.68. Prvi deo je diferencijalni pojačavač, drugi deo je naponski pojačavač, dok je treći deo odvojni stepen (strujni pojačavač).

Slika 2.68. Blok šema operacionog pojačavača.

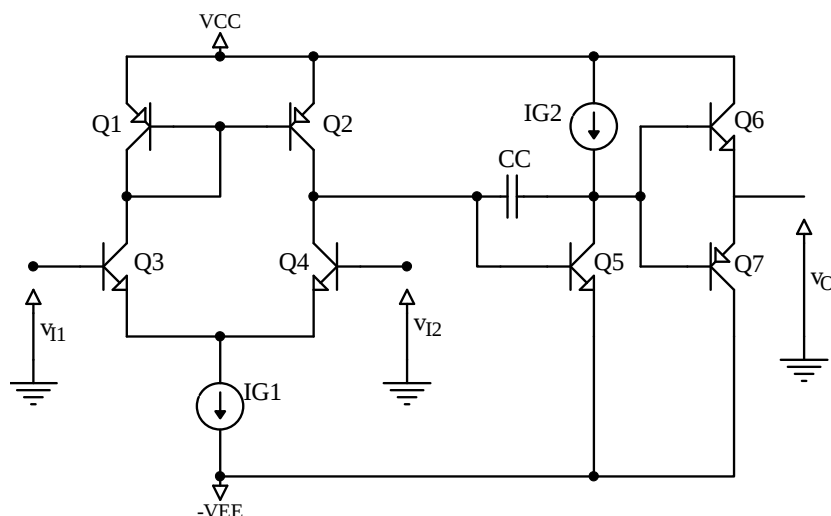


Slika 2.69 prikazuje detalje tih pojačavačkih stepeni za slučaj realizacije sa bipolarnim tranzistorima. Pojedini stepeni (na primer ulazni diferencijalni pojačavač) se često realizuju sa jfet-ovima ili mosfet-ovima. Postoje i takve izvedbe operacionih pojačavača koji koriste samo jfet-ove ili samo mosfet-ove.

Kod realnih operacionih pojačavača naponsko pojačanje nije beskonačno, ali je vrlo veliko, reda $10^5 \dots 10^6$. Manji deo tog pojačanja potiče od ulaznog diferencijalnog pojačavača, a veći deo od naponskog pojačavača (drugi blok). Naponsko pojačanje trećeg dela je jedinično.

Ulazna otpornost operacionog pojačavača je u stvari ulazna otpornost diferencijalnog stepena na ulazu. Raznim tehnikama (smanjenje struje polarizacije, primena tranzistora sa velikim strujnim pojačanjem, kompenzacija bazne struje) ulazna struja se može svesti na malu vrednost. Zahvaljujući tome, ulazna otpornost operacionih pojačavača je redovno od puno $M\Omega$ ili $G\Omega$, kod mosfet ulaznih stepeni bude i reda $T\Omega$. Izlazna otpornost, zahvaljujući odvojnog stepenu (stepen sa zajedničkim kolektorom) je relativno mala, reda 10Ω .

Većina operacionih pojačavača je predviđena na dvostruko napajanje (jedno pozitivno i jedno negativno napajanje sa zajedničkom referentnom tačkom, masom), na primer $\pm 15 V$. Opseg promene ulaznih i izlaznih napona je redovno za 1 V do 2 V uži od opsega napona napajanja. Korišćenje kompletnog opsega napona napajanja je ostvarivo samo kod CMOS izlaznih stepena.

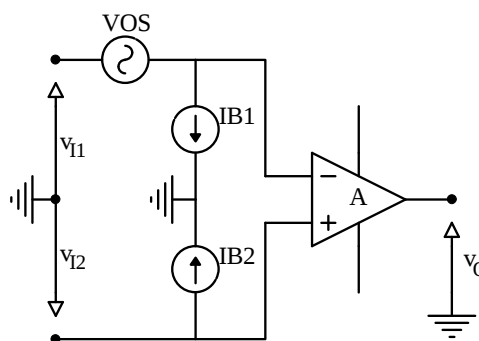


Slika 2.69. Uprošćena unutrašnja šema operacionog pojačavača realizovanog sa bipolarnim tranzistorima.

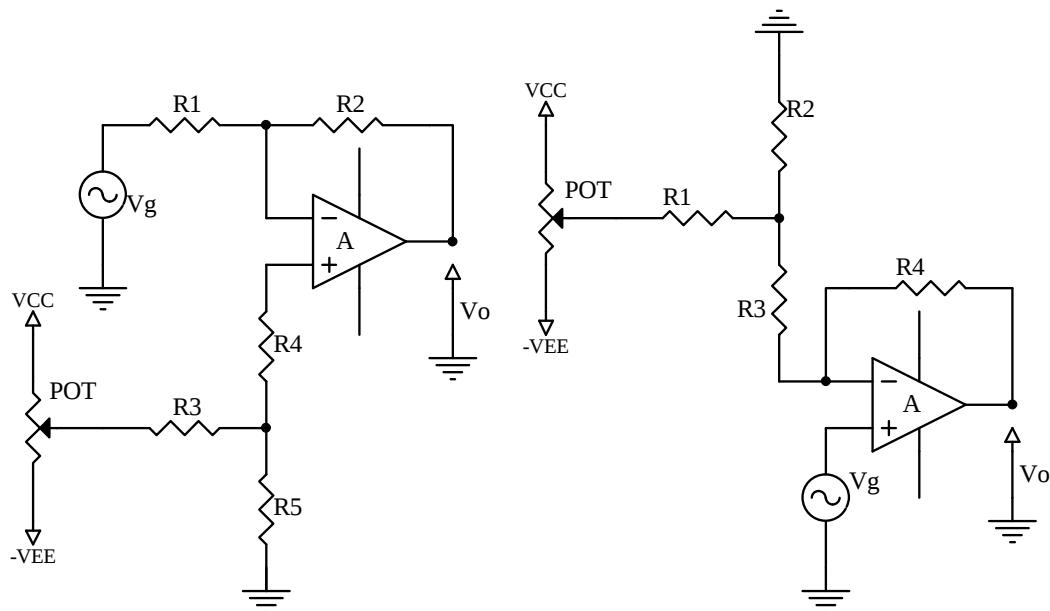
Kod operacionih pojačavača koji su projektovani za jednostruko napajanje, redovno je rešeno da ulazni signal može da se kreće, bar u jednom smeru, sve do napona napajanja ili i malo preko toga. Ova osobina omogućava lakše projektovanje raznih pojačavača greški.

Bez obzira na sav trud konstruktora, ulazni stepeni operacionih pojačavača se ne mogu simetrizovati u potpunosti. Prema tome, prenosna karakteristika operacionog pojačavača ne prolazi kroz koordinatni početak. Ekvivalentna šema operacionog pojačavača koja uzima u obzir ulazni ofset i konačne ulazne struje, prikazana je na slici 2.70. Ulazni ofset napon (V_{OS}) se definiše kao ona mala vrednost napona koju treba priključiti na ulaz da bi anulirali izlazni napon. Kod većine operacionih pojačavača ulazni ofset napon je reda veličine mV . Kod nekih primena ta vrednost nije zadovoljavajuća, zato se proizvode i precizioni operacioni pojačavači kod kojih je ulazni ofset napon reda veličine $10 \mu V$.

Prilikom primene operacionih pojačavača sa povratnom spregom, izlazni ofset je veći ili eventualno jednak ulaznom naponskom ofsetu. Ako želimo da kompenzujemo ulazni ofset, potrebno je ulaznom signalu dodati napon iste amplitude ali suprotnog smera od ulaznog ofseta. Kod nekih operacionih pojačavača postoje posebni izvodi na koje treba priključiti kompenzaciono kolo prema preporukama proizvođača. Ako nema posebnih priključaka za kompenzaciju ofseta, može se koristiti jedno od kompenzacionih kola sa slike 2.71. Na sreću, dobar deo kola sa operacionim pojačavačima može da se koristi bez kompenzacije ofseta.



Slika 2.70. Ekvivalentna šema operacionog pojačavača koja uzima u obzir ulazni ofset i ulazne struje.

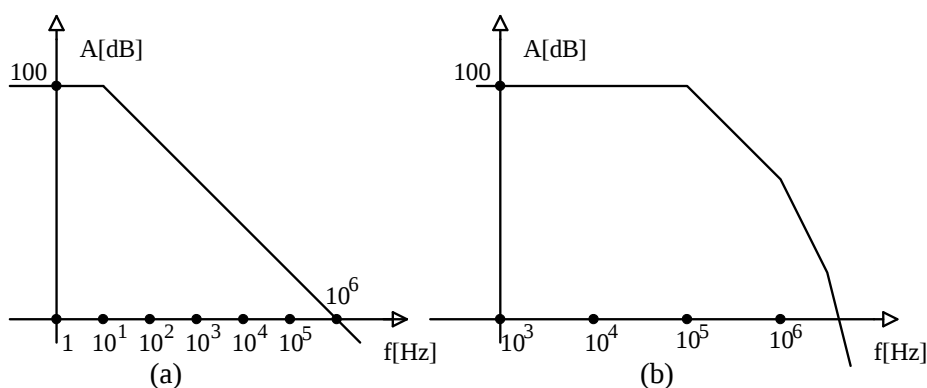


Slika 2.71. Razna kola za kompenzaciju ulaznog ofset napona operacionih pojačavača.

Operacioni pojačavači ne pojačavaju podjednako prostoperiodične signale svih frekvencija. Naponsko pojačanje reda 10^5 važi smo na niskim učestanostima, a na višim frekvencijama dolazi do pada pojačanja. Slika 2.72 prikazuje dve uobičajene frekvencijske karakteristike (Bode-ovi amplitudski dijagrami): sa fabričkom frekvencijskom kompenzacijom i bez kompenzacije.

Kod frekvencijski kompenzovanog pojačavača pojačanje opada već počev od 10Hz , uz nagib od 20dB/dec . Kod nekompenzovanih pojačavača prva prelomna tačka na Bode-ovom dijagramu se može očekivati oko 10^5Hz i pojavljuju se dodatne prelomne tačke na višim frekvencijama. Sve to dovodi do naglog opadanja pojačanja ali na znatno višim frekvencijama nego kod kompenzovanih pojačavača.

Pored očigledne mane, ipak, uglavnom koristimo operacione pojačavače sa fabričkom frekvencijskom kompenzacijom pošto je kod njih obezbeđena stabilnost (ne dolazi do zaoscilovanja). Fabrička kompenzacija se vrši unutrašnjim kapacitivnim premošćavanjem naponskog pojačavačkog stepena (C_C na slici 2.69). Kompenzacija se može obaviti sa integrisanim kondenzatorom relativno male kapacitivnosti (reda 10pF).



Slika 2.72. Tipične frekvencijske karakteristike operacionih pojačavača: a) za fabrički kompenzovani pojačavač, b) za pojačavač bez frekvencijske kompenzacije.

Postoji i jedan drugi nedostatak koji potiče od frekvencijske kompenzacije: izlaz pojačavača ne može da prati nagle promene ulaznog signala ($dv/dt \rightarrow \infty$) (slika 2.73). To se objašnjava time što se naponski pojačavač sa kapacitivnom povratnom spregom ponaša kao integrator. Postoji veza:

$$\frac{dv_o}{dt} = \frac{I_I}{C_C}, \dots\dots\dots(2.37.)$$

gde je:

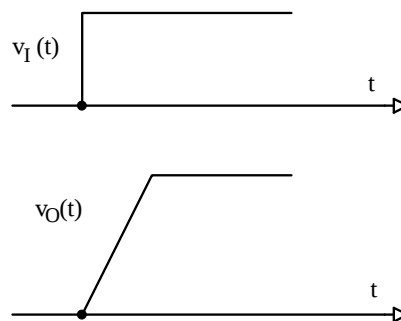
I_I – ulazna struja integratora,

C_C – kapacitivnost kompenzacionog kondenzatora (u povratnoj grani).

Pošto I_I ne može da bude veći od struje strujnog generatora za polarizaciju ulaznog stepena ($I_I \leq I_G$), maksimalna brzina promene izlaznog napona je data formulom:

$$\left(\frac{dv_o}{dt} \right)_{\max} = \frac{I_G}{C_C} \dots\dots\dots(2.38.)$$

Ova veličina se u engleskoj stručnoj literaturi naziva *slew rate* i označava se sa *SR*. Kod običnih operacionih pojačavača *slew rate* je obično reda veličine $1V/\mu s$. Sa jfet i mosfet ulaznim stepenima (zahvaljujući većoj struji polarizacije) postižu se vrednosti od $10V/\mu s$. Vrednosti od $100V/\mu s$ i više se sreću vrlo retko.



Slika 2.73. Uticaj *slew rate*-a kod operacionog pojačavača.

2.4. NELINEARNA ELEKTRONSKA KOLA

Postoji jedan segment karakteristike pojačavačkih elemenata koji nije korišćen ni kod logičkih kola, ni kod linearnih (pojačavačkih kola). Radi se o segmentu gde se strmina naglo menja, odnosno izrazita je nelinearnost. Mnogi postupci obrade signala u telekomunikacijama se upravo mogu ostvariti zahvaljujući nelinearnim karakteristikama. Takvi postupci su modulacija, demodulacija, umnožavanje frekvencije, pomeranje jednosmernog nivoa, odsecanje nekih delova signala itd. U drugim slučajevima, potrebno je ograničenje ili usmeravanje signala, što isto zahteva elemente sa nelinearnom karakteristikom. U ovom poglavlju ćemo se upoznati sa nekoliko nelinearnih kola.

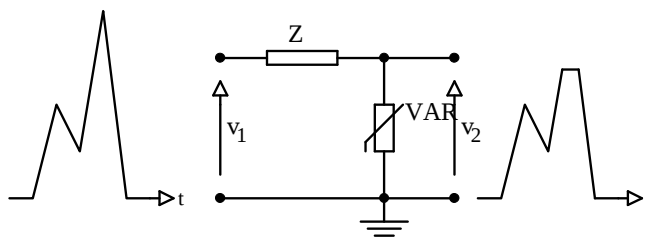
2.4.1. Kola za zaštitu i ograničenje

Zaštita od eventualnih prekostruja se redovno postiže postavljanjem rednog otpornika u kolo. Pored običnih otpornika za ovu svrhu primenjuju se i NTC i PTC otpornici. Za precizno ograničenje struje potrebno je realizovati elektronska regulaciona kola.

Zaštita od prenapona se redovno postiže primenom komponenti sa nelinearnom strujno-naponskom karakteristikom. Takve komponente su varistori, diode, Zener-ove diode, TVS diode (posebno razvijene za odvođenje prenapona) i odvodnici prenapona na bazi cevi sa plemenitim gasovima.

Nabrojane komponente se redovno povezuju između onih čvorova gde se očekuje pojava prenapona. Delovanje zaštite se može pratiti na slici 2.74. Prilikom prenapona kroz komponentu za ograničenje, pokrene se struja što će na rednoj impedansi Z prouzrokovati pad napona. Na izlaz se ne sprovodi ulazni napon, najviše što se može pojaviti je radni napon komponente koja vrši ograničenje.

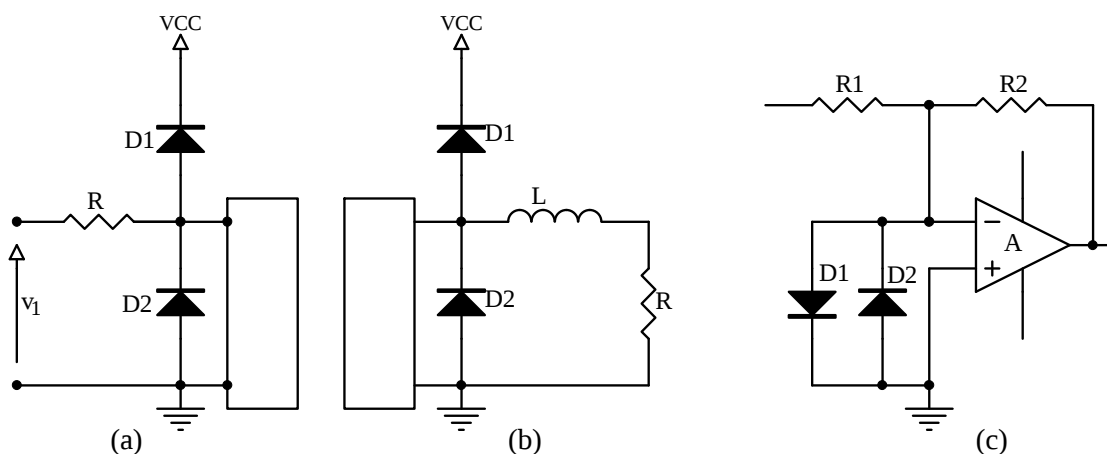
Slika 2.74. Ograničenje prenapona na potrošaču primenom redne impedanse i paralelnog elementa za ograničenje napona.



Za ograničenje prenapona u naizmeničnim kolima redovno se koriste varistori ili odvodnici na bazi cevi sa plemenitim gasovima, pošto su njihove karakteristike simetrične za pozitivne i negativne napone.

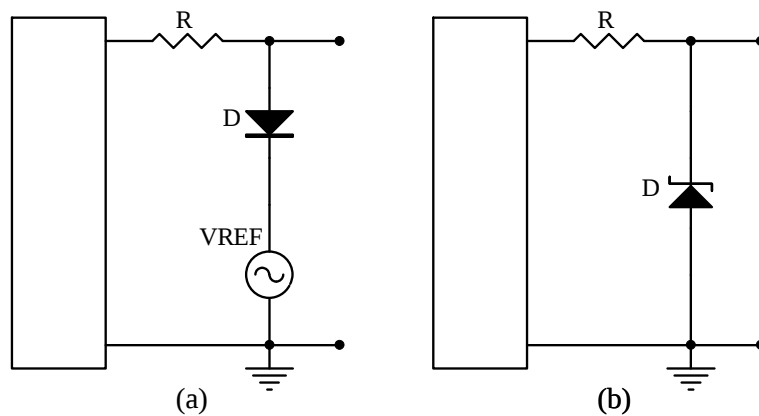
Za ograničenje jednosmernih napona pogodne su razne diode. Slika 2.75 prikazuje rešenje koje ograničava i minimalnu i maksimalnu vrednost signala: sprečava da se pojavi negativan signal (ispod mase) i pozitivan signal veći od napona napajanja. Ograničenje nije idealno, pošto se i naponi otvaranja dioda dodaju na nivoe za ograničenje. Schottky-jeve diode daju efikasnije ograničenje jer im je niži prag provođenja. Na sličan način, pored osetljivih ulaza, mogu se zaštititi i izlazi sa induktivnim opterećenjem (slika 2.75.b).

Zaštitu ulaznih kola operacionih pojačavača možemo vršiti prema šemi na slici 2.75.c. Pošto je invertujući ulaz na virtuelnoj masi, u normalnom režimu diode ne provode, nemaju uticaja na rad kola. U slučaju prenapona ulazni napon operacionog pojačavača se limitira na opseg $\pm V_D$. To je mnogo više od linearnog opsega, ali pri funkcionisanju zaštite kolo ne radi u linearnom režimu.



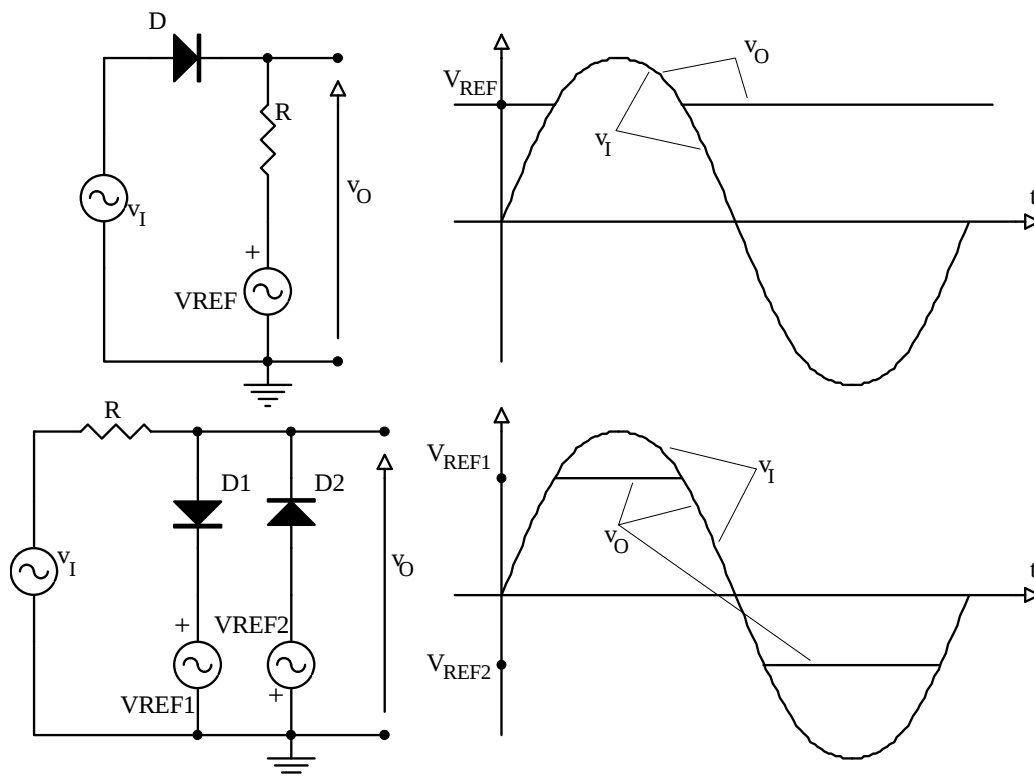
Slika 2.75. Ograničenje jednosmernog napona sa diodama: a) ograničenje ulaznog napona na opseg $V_{CC}...0V$, b) zaštita izlaza kola u slučaju induktivnog potrošača, c) zaštita ulaznog stepena operacionog pojačavača.

Ograničenje izlaznog napona nekog kola na željeni nivo (odsecanje, limitacija) se može vršiti prema slici 2.76.a. Izvor referentnog napona i dioda se mogu zameniti sa Zener-ovom diodom. (slika 2.76.b). U ovom slučaju napon se ograničava i sa donje strane pošto Zener-ova dioda može da provodi i u direktnom smeru, ne samo u probnoj oblasti. Ako nema potrebe za ograničenjem sa donje strane, veže se obična dioda na red sa Zener-ovom da bi se sprečilo provođenje u direktnom smeru.



Slika 2.76. Ograničenje izlaznog napona kola: a) sa diodom i izvorom referentnog napona, b) sa Zener-ovom diodom.

Slika 2.77 pokazuje još dva limiterska (uobličavačka) kola zajedno sa karakterističnim dijagramima napona.



Slika 2.77. Još neka uobličavačka kola sa karakterističnim dijagramima.

2.4.2. Modulatori i demodulatori

U telekomunikacijama prenos signala se redovno vrši ne u osnovnom frekvenzijskom opsegu nego na neki modifikovani način (u modulisanom obliku). Posle prijema signal se mora vratiti u osnovni frekvenzijski opseg, to se postiže demulacijom. U osnovi raznih postupaka modulacije i demodulacije stoji množenje (mešanje) signala različite frekvencije. Množenje signala u vremenu daje u domenu frekvencija zbir i razliku ulaznih frekvencija. U sledećem tekstu prikazana su tri rešenja za množenje (mešanje) signala.

a) Množač sa nelinearnom prenosnom karakteristikom

Kod jfet-ova i mosfet-ova prenosna karakteristika je tipično kvadratnog oblika. Kod bipolarnog tranzistora prenosna karakteristika je eksponencijalna ali razvojem u red i tu se može dobiti kvadratni član. Dovođenjem dva signala na ulaz takvog kola (slika 2.78) na izlazu se dobijaju sledeće komponente:

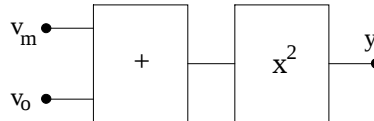
$$y(t) = v_m^2(t) + 2v_m(t)v_o(t) + v_o^2(t).....(2.39.)$$

U jednačini, sa v_m je označen takozvani modulišući signal koji nosi informaciju a signal v_o je nosilac. Svrha modulacije je redovno pomeranje spektra modulišućeg signala u okolinu frekvencije nosioca (f_o). Pri demodulaciji umesto signala v_m na odgovarajući ulaz množača se dovodi radio-

frekvencijski signal v_{RF} . Mešanjem nastaje takozvani među-frekvencijski signal ili signal u osnovnom opsegu.

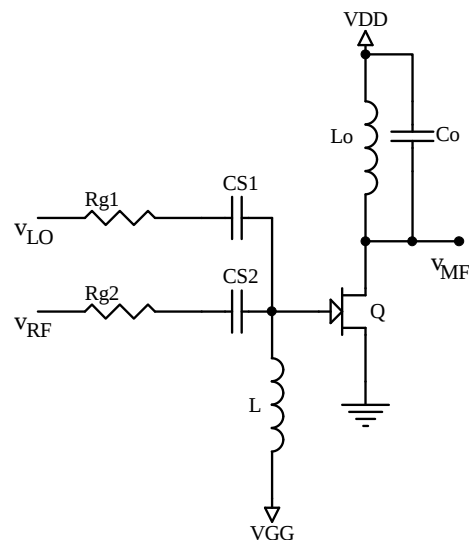
U oba slučaja prvi i treći član u jednačini 2.39. se ne može koristiti, srećna okolnost je što se filtracijom lako mogu odstraniti. Proizvod ulaznih signala (drugi član) upravo daje traženi rezultat: spektar modulišućeg signala se pojavi levo i desno od frekvencije nosioca. Pri demodulaciji množi se ulazni radio-frekvencijski signal sa signalom lokalnog nosioca i dobija među-frekvencijski signal ili signal u osnovnom opsegu.

Slika 2.78. Principska šema množača sa kvadratnom prenosnom karakteristikom.



Na slici 2.79, je prikazano kolo mešača sa jfet-om. Izvor V_{GG} vrši polarizaciju jfet-a na najnelinearniji deo prenosne karakteristike. Kalem L_1 sprečava uzemljenje signala preko V_{GG} . Dva ulazna signala (na pr. antenski signal v_{RF} i signal lokalnog oscilatora v_{LO}) sumiraju se u određenom odnosu u zavisnosti od otpornosti otpornika R_{g1} i R_{g2} i dovode se na gejt. Uloga C_{S1} i C_{S2} je odvajanje jednosmernih nivoa. Među-frekvencijski izlazni signal (v_{MF}) se formira na rezonantnom kolu L_0C_0 . Ostale komponente se poništavaju zbog filterarskog delovanja rezonantnog kola. Na sličan način se mogu konstruisati i mešači sa bipolarnim tranzistorima.

Slika 2.79. Množačko kolo sa jfet-om.

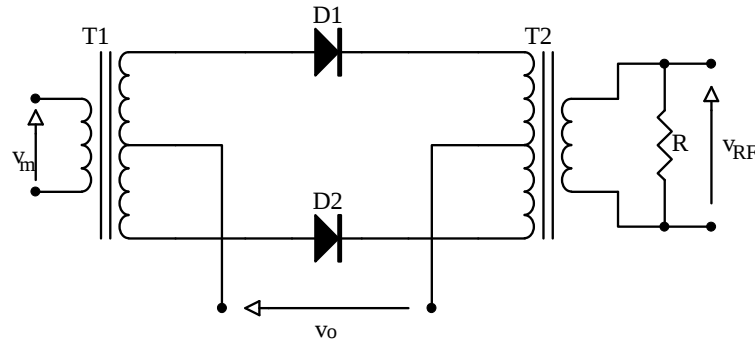


b) Prekidački množači

Efekat množenja se može postići i prekidanjem ulaznog signala na visokoj frekvenciji. Teoretski osnovi ovog postupka su relativno složeni. Princip rada se može shvatiti razvojem prekidačkog signala u Fourier-ov red. Na ovaj način se prekidanje signala svodi na množenje sa sinusoidama. Pojedini umnošci se mogu izdvojiti filtriranjem i tako se dolazi do modulisanog odnosno demodulisanog signala.

Kolo na slici 2.80 prikazuje modulator sa diodnim prekidačima. Pod uticajem pravougaonog signala v_o diode D_1 i D_2 se otvaraju i zatvaraju svake poluperiode. Sam pravougaoni signal se ne prenosi ni prema ulazu ni prema izlazu zahvaljujući odgovarajućem rasporedu namotaja transformatora T_1 i T_2 . Za vreme pozitivne poluperiode pravougaonog signala ulazni signal (v_m) prolazi bez prigušenja preko transformatora i dioda i stiže na izlaz (v_{RF}). Za vreme negativne poluperiode pravougaonog signala diode se zakoče, sprečavaju prolaz ulaznog signala. Jedini uslov

rada je da amplituda signala v_o bude veća od amplitude signala v_m . Signal v_o ne mora biti pravougaoni, slični rezultati se dobijaju i sa sinusnim signalom odgovarajuće amplitude. Umesto diodnog prekidača može se koristiti i tranzistorski prekidač.

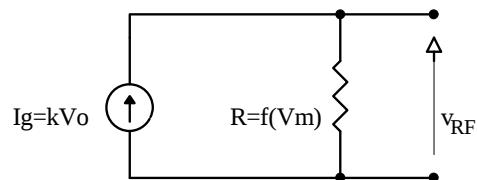


Slika 2.80. Modulator sa diodnim prekidačima.

c) Množači na bazi promene parametara

Princip rada je prikazan na slici 2.81. Jedan od signala (na primer, nosilac) menja struju strujnog generatora, dok drugi signal (na primer, modulišući signal) menja otpornost potrošača. Pošto je izlazni signal proizvod struje i otpornosti, ovo kolo može da posluži kao množač. Ranije su ovakvi mešači realizovani uz pomoć elektronskih cevi. Jedan od signala je kontrolisao radnu tačku cevi i na taj način joj menjao strminu prenosne karakteristike, a drugi signal je prolazio kroz cev kao pojačavač. Pojačanje kola se menjalo u funkciji strmine, prema tome na izlazu je nastao proizvod signala.

Slika 2.81. Principsko kolo za množenje signala na bazi promene parametra.

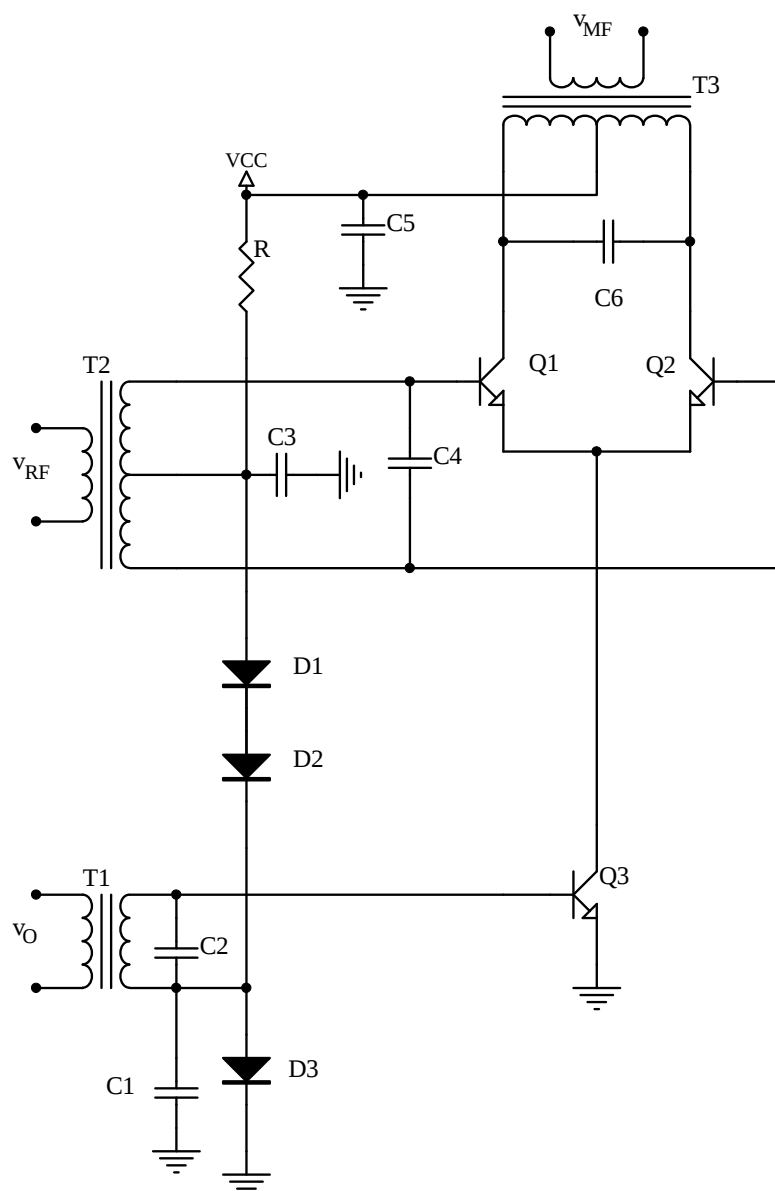


Današnja množačka kola koja rade na ovom principu uglavnom se realizuju u integrisanoj tehnici (slika 2.82). Signal v_o menja struju strujnog generatora izgrađenog sa tranzistorom Q_3 . Pojačanje diferencijalnog pojačavača konstruisanog tranzistorima Q_1 i Q_2 je linearna funkcija struje strujnog izvora. Signal v_{RF} doveden na diferencijalni ulaz će se pojačati manje ili više u zavisnosti od signala v_o . Na taj način na izlazu se dobija signal v_{MF} kao proizvod dva ulazna signala. Nepotrebne komponente na izlazu se mogu odstraniti filtracijom i odgovarajućom vezom transformatora. U slučaju velikih ulaznih signala ovo kolo se ponaša slično kao prekidački množač prikazan pod tačkom b).

2.4.3. Usmerači

Usmerači (ispravljači) pretvaraju naizmenične napone i struje u jednosmerne. Pri ispravljanju struje i naponi promenljivog smera mogu se usmeriti svi u jedan smer (punotalasni ispravljači), druga mogućnost je da se odseku signali neodgovarajućeg smera (polutalasni ispravljači).

Usmeračko dejstvo se redovno postiže poluprovodničkim diodama. Zahvaljujući nelinearnosti svoje strujno naponske karakteristike, diode samostalno (bez spoljnog upravljačkog signala) razdvajaju pozitivne signale od negativnih. U direktnom smeru diode skoro bez prepreke provode struju a u inverznom smeru sve do probojnog napona struja je zanemarljiva.



Slika 2.82. Balansni modulator koji radi na principu promene parametra.

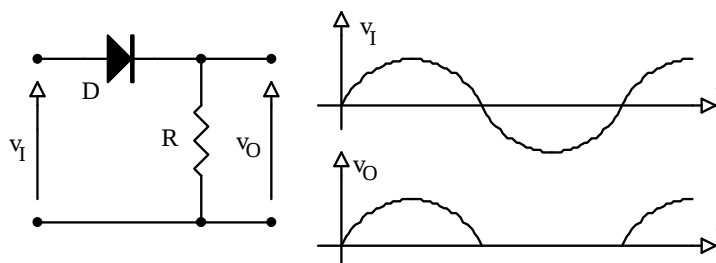
Umesto dioda mogu se primeniti upravljivi poluprovodnički elementi (na primer, tiristori), na taj način dobija se mogućnost upravljanja sa izlaznim signalom (struja, napon).

Dobar deo usmerača radi sa značajnim nivoima snage, ali se i kod obrade malih analognih signala sreću usmerači. U daljem tekstu prikazana su razna usmeračka kola.

a) Polutalasni usmerač

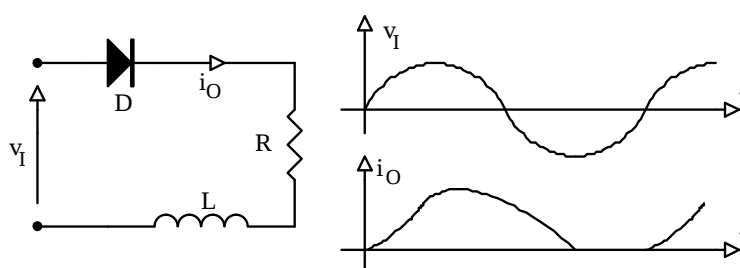
Sa jednom diodom se mogu realizovati polutalasni usmerači prikazani na slikama 2.83, 2.84 i 2.85. Najprostija je analiza pri čisto otpornom potrošaču (slika 2.83). Ovde struja teče tačno za vreme pozitivne poluperiode ulaznog napona, oblik te struje se poklapa sa oblikom napona na potrošaču.

Slika 2.83. Polutalasni usmerać sa otpornim potrošačem.



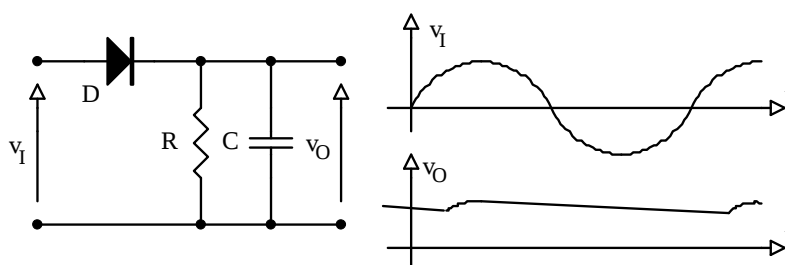
U sledećem kolu (slika 2.84) priključen je redni RL potrošač. Tu će porast struje na početku pozitivne poluperiode ulaznog napona biti postepen a na kraju poluperiode ne prestaje pri prolasku kroz nulu. U slučaju velike induktivnosti kabela struja može biti i neprekidna (nikad ne pada na nulu).

Slika 2.84. Polutalasni usmerać sa rednim RL potrošačem.



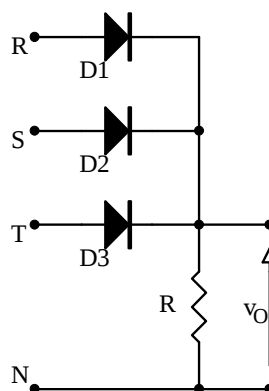
Treći tipičan slučaj je usmerać sa paralelnim RC potrošačem (slika 2.85). Koristi se toliki kondenzator da talasnost izlaznog napona ne bude veća od neke vrednosti.

Slika 2.85. Polutalasni usmerać sa paralelnim RC potrošačem.



U slučaju trofaznog napona na ulazu, polutalasni usmerać se može ostvariti prema slici 2.86. Tu ni pri čisto otpornom potrošaču neće nikad pasti izlazni napon na nulu. Paralelnim vezivanjem kondenzatora sa otpornim potrošačem, talasnost izlaznog napona se može dalje smanjiti. Pri rednom RL potrošaču talasnost struje se smanjuje usled trofaznog napajanja.

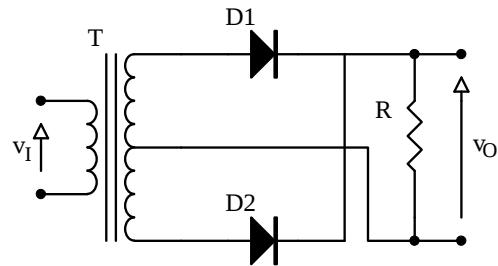
Slika 2.86. Trofazni polutalasni usmerać.



b) Punotalasni usmerač

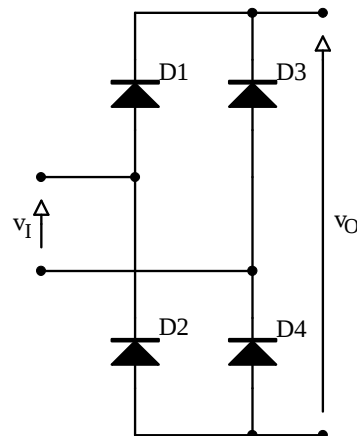
Okretanjem naponskih i strujnih signala oba smera u jedan smer, dobijaju se punotalasni usmerači. Po jednoj metodi (slika 2.87) koristi se transformator sa srednjim izvodom i dve diode, a po drugoj metodi (slika 2.88) primenjuju se četiri diode u mostnom spoju. Kod prvog rešenja potrebna su dva namotaja transformatora da bi u svakoj poluperiodi postojao pozitivan signal kojeg će odgovarajuća dioda sprovesti na izlaz. Kod mostnog spoja naizmenično provode po dve, dijagonalno postavljene, diode. U ovom slučaju ulaz i izlaz nemaju zajedničku referentnu tačku.

Slika 2.87. Punotalasni usmerač sa transformatorom sa srednjim izvodom.

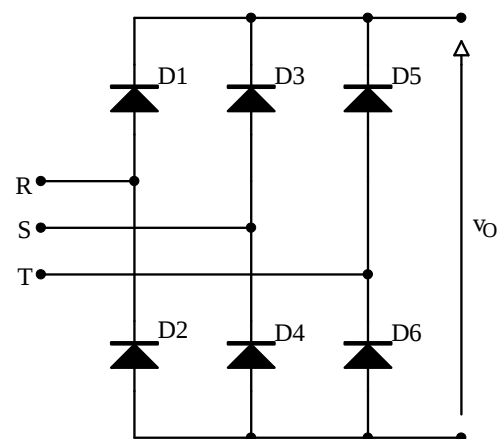


Značajna prednost punotalasnog usmerača je što se izvor ne opterećuje sa jednosmernom strujom (obično je to nepoželjno). Pored ovoga i talasnost izlaznog napona je znatno smanjena. Dobija se dalje smanjenje talasnosti ako se primeni trofazni mostni usmerač prema slici 2.89.

Slika 2.88. Punotalasni usmerač u mostnom spoju.



Slika 2.89. Trofazni mostni usmerač.

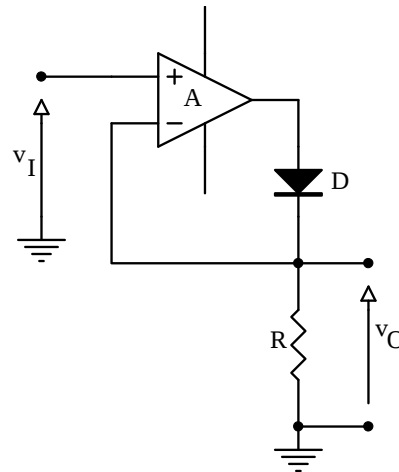


c) Precizni usmerači

Može se zameriti što u dosad razmatranim diodnim usmeračkim kolima (tačke a i b), pri provođenju dioda, izlazni napon nije tačno jednak ulaznom naponu, već je umanjen za jedan ili dva napona otvaranja dioda. Kod velikih napona taj gubitak nije značajan ali kod manjih napona ili u mernoj tehnici potrebna su preciznija rešenja.

Slika 2.90 prikazuje precizni polutalasni usmerač. Ovaj sklop može da radi sa opterećenjem od svega par mA , ali vrlo precizno prosleđuje napon u pozitivnoj poluperiodi. Već pri pozitivnom ulaznom signalu reda mV diže se izlaz operacionog pojačavača sve dok se ne otvori dioda i pojavi na izlazu napon istovetan sa ulaznim naponom. Zahvaljujući negativnoj povratnoj sprezi koja deluje u ovom režimu izlaz verno prati promene na ulazu. Međutim, čim se na ulazu pojavi i mali negativan napon, izlaz operacionog pojačavača prelazi u negativno zasićenje i zakoči diodu. Pri tome na izlazu se dobija nulti napon.

Slika 2.90. Precizni polutalasni usmerač sa operacionim pojačavačem.



Uz veće ulaganje može se konstruisati i punotalasni precizni usmerač (slika 2.91) koji nosi naziv detektor apsolutne vrednosti. Pri pozitivnom ulaznom naponu izlaz operacionog pojačavača $A1$ se pomera u negativnom smeru, otvara diodu $D1$ i zakoči diodu $D2$. Kroz otpornik $R2$ ne teče struja, prema tome neinvertujući ulaz pojačavača $A2$ je na virtuelnoj masi. Pod tim uslovima oba stepena rade kao invertujućii pojačavači:

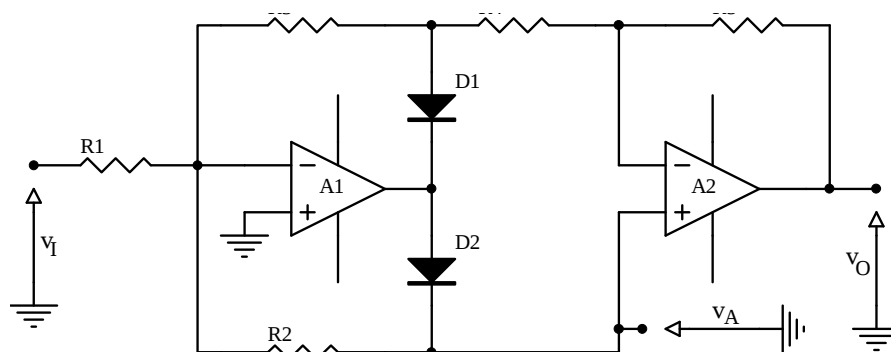
$$v_O = v_I \left(-\frac{R_3}{R_1} \right) \left(-\frac{R_5}{R_4} \right) \dots \dots \dots (2.40.)$$

Ako su svi otpornici iste otpornosti, izlazni napon se poklapa sa ulaznim. Pri negativnom ulaznom naponu diže se izlaz operacionog pojačavača $A1$, zakoči se dioda $D1$ i otvara se dioda $D2$. Važe sledeće jednačine:

$$-\frac{v_I}{R_1} = \frac{v_A}{R_2} + \frac{v_A}{R_3 + R_4}, \dots \dots \dots (2.41.)$$

$$v_O = v_A \left(1 + \frac{R_5}{R_3 + R_4} \right) \dots \dots \dots (2.42.)$$

Ako su svi otpornici iste vrednosti, na izlazu će se pojaviti ulazni napon sa suprotnim predznakom. Prema tome, ovo kolo daje za bilo koji ulazni signal iste apsolutne vrednosti ali uvek pozitivnog smera na izlazu. Eventualne manje greške se mogu minimizirati uparivanjem otpornika i primenom operacionih pojačavača sa malim ulaznim ofsetom.



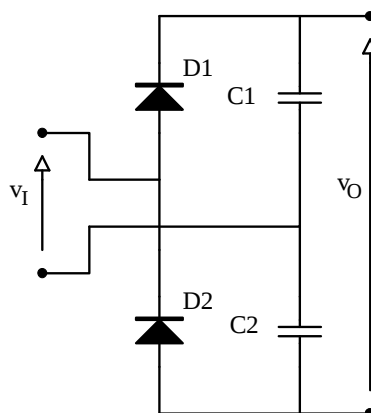
Slika 2.91. Punotalasni precizni usmerač sa operacionim pojačavačima (detektor apsolutne vrednosti).

2.4.4. Umnožavači napona

Ponekad se javlja potreba za takvim usmeračem koji može da daje veći izlazni napon od amplitude ulaznog naizmeničnog napona. Pri manjim snagama nije opravdano dizanje napona sa transformatorom već se koristi jedno od ovde prikazanih kola.

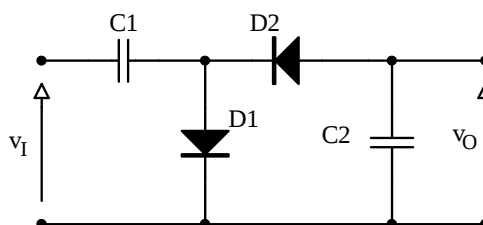
Od amplitude ulaznog naizmeničnog napona otprilike dva puta veći jednosmerni napon će se pojaviti na izlazima sklopova sa slika 2.92 i 2.93.

Slika 2.92. Udvostručivač napona za veće struje.



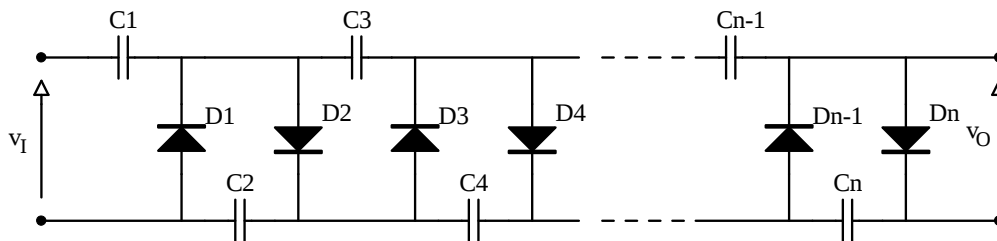
U kolu na slici 2.92 za vreme pozitivne poluperiode ulaznog naizmeničnog napona puni se kondenzator C_1 na vršnu vrednost ulaznog napona a za vreme negativne poluperiode puni se kondenzator C_2 na istu vrednost. Ako je mala talasnost izlaznog napona (kondenzatori su dovoljno velike kapacitivnosti) izlazni jednosmerni napon će biti dvostruka vrednost amplitude ulaznog naizmeničnog napona.

Slika 2.93. Udvostručivač napona sa negativnim izlaznim naponom.



Na slici 2.93 prvo se kondenzator C_1 napuni na vršnu vrednost ulaznog naizmeničnog napona, zatim se zbir ulaznog napona i napona na kondenzatoru C_1 iskoristi za punjenje kondenzatora C_2 na dvostruku vrednost amplitude naizmeničnog napona. U odnosu na zajedničku masu ulaza i izlaza ovde je izlazni napon negativan. Okretanjem dioda može se dobiti i pozitivan izlazni napon.

Za postizanje vrlo velikih napona i vrlo malih struja koristi se umnožavač napona prikazan na slici 2.94. Broj dioda i kondenzatora se može birati proizvoljno, nažalost povećanjem broja stepeni opteretljivost izlaza naglo pada. Kondenzator C_1 se puni na vršnu vrednost ulaznog napona, a ostali kondenzatori na dvostruku vršnu vrednost. U principu polazeći od ulaza prema izlazu trebalo bi ugraditi sve manje kondenzatore ali radi uniformnosti redovno se koriste isti kondenzatori.



Slika 2.94. Umnožavač napona za dobijanje vrlo velikih izlaznih napona.

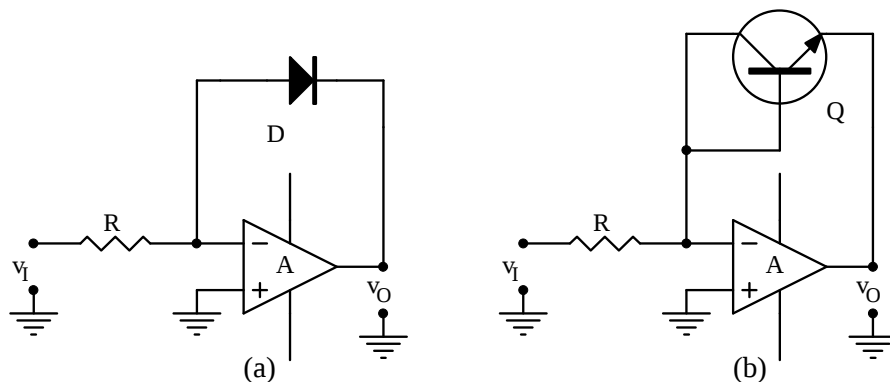
2.4.5. Nelinearni pojačavači

Kod većine pojačavača poželjna je linearna veza između ulaznog i izlaznog napona. Međutim, postoje i takvi zadaci pri analognoj obradi signala gde je potrebno ostvariti tačno određenu nelinearnu karakteristiku.

Osnovna kola u ovoj oblasti ostvaruju logaritamsku funkciju i eksponencijalnu funkciju. Polazeći od njih, množenje signala se može svesti na sabiranje logaritama, deljenje se može obaviti oduzimanjem, pri stepenovanju, u zavisnosti od eksponenta, logaritam signala se pojačava ili razdeljuje. Na kraju se rezultat obrade redovno računa preko eksponencijalne funkcije.

Logaritamska prenosna karakteristika se može ostvariti jednim od kola na slici 2.95. Može se smatrati da je strujno-naponska karakteristika tranzistora idealnija od strujno naponske karakteristike diode. Zavisnost između ulaza i izlaza je sledeća:

$$v_O = V_T \ln \frac{v_I}{R I_S} \dots \dots \dots (2.43.)$$

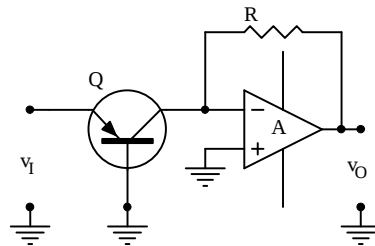


Slika 2.95. Logaritamski pojačavači: a) sa diodom, b) sa bipolarnim tranzistorom.

Eksponecijalna prenosna karakteristika se može ostvariti prema slici 2.96. Emitorska struja tranzistora zavisi od ulaznog napona po eksponecijalnom zakonu. Skoro istovetnu struju kolektora će otpornik R u povratnoj grani pretvoriti u napon.

$$v_o = -RI_S e^{\frac{v_i}{V_T}} \dots\dots\dots(2.44.)$$

Slika 2.96. Pojačavač sa eksponecijalnom prenosnom karakteristikom.



Može se pretpostaviti da su prikazana kola jako zavisna od temperature, pošto su sami parametri I_S i V_T izrazito zavisni od temperature. Upravo zato ovakvi sklopovi se mogu ostvariti samo integracijom tranzistora na jednu poluprovodničku pločicu. Jedino ako se parametri svih tranzistora menjaju istovetno, mogu ostvariti upotrebljiva kola.

Nelinearni pojačavači, u principu, mogu se iskoristiti u raznim kolima za obradu signala. Međutim, činjenica je da se retko primenjuju, radije se koriste softverska rešenja. Razlozi se mogu tražiti u nedovoljnoj tačnosti i u visokoj ceni. U pogledu brzine analogna kola obično premašuju softverska rešenja.

Literatura:

1. Vojin Cvekić: Elektronika I, poluprovodnički elementi. Naučna knjiga, Beograd, 1978.
2. Vojin Cvekić: Elektronika II, linearna elektronika, Naučna knjiga, Beograd, 1984.
3. Branko Raković: Elektronika, linearna integrisana kola, Građevinska Knjiga, Beograd, 1983.
4. Radojle Radetić: Operacioni pojačavači, Infoelektronika, Bor, 2014.
5. Millman - Halkias: Integrated Electronics, McGraw - Hill, 1972.
6. Horowitz - Hill: The Art of Electronics, Cambridge University Press, 1989.
7. Water G.: Op Amp Applications Handbook, Newnes, 2005.
8. Ian Hickman: Analog Circuits Cookbook, Newnes, 1999.
9. Ron Mancini: Op Amps for Everyone, Texas Instruments, 2002.