

Robert Lorencon

ELEKTRONSKI ELEMENTI IN VEZJA



KAZALO

1. UVOD	1
1.1. ELEMENTI	1
1.2. VEZJA	2
1.2.1. Generatorji	2
1.2.2. Osnovna pravila vezij	3
1.2.3. Četveropoli	11
1.2.4. Linearizacija	12
VPRAŠANJA	13
NALOGE	13
2. POLPREVODNIKI	15
2.1. PREVODNOST MATERIALOV	16
2.2. POLPREVODNIKI	17
2.2.1. Elektroni in vrzeli	18
2.2.2. Polprevodnik s primesmi	19
2.2.3. N-tip polprevodnika	19
2.2.4. P-tip polprevodnika	20
2.2.5. Večinski in manjšinski nosilci elektrine	21
2.3. PN SPOJ	21
VPRAŠANJA	24

3.1. DELOVANJE DIODE	26
3.1.1. Zaporna smer diode	26
3.1.2. Tok nasičenja diode.....	26
3.1.3. Prevodna smer diode.....	27
3.1.4. Napetost kolena.....	28
3.2. LASTNOSTI DIOD.....	29
3.2.1. Električni preboj diode	29
3.2.2. Diferencialna upornost diode.....	30
3.2.3. Kapacitivnost diode	33
3.2.4. Preklopne lastnosti diod.....	34
3.2.5. Trošenje moči diode in odvajanje toplote	35
3.3. USMERNIKI.....	36
3.3.1. Polvalni usmernik	37
3.3.2. Polnovalni usmernik s sredinskim odcepom	39
3.3.3. Mostični polnovalni usmernik	42
3.3.4. Usmerniki za trofazni napetostni sistem	44
3.3.5. Množilniki napetosti.....	44
3.3.6. Zaporedna in vzporedna vezava diod	46
3.3.7. Valovitost in glajenje napetosti	47
3.3.8. Diodi pri omejevanju napetosti	52
3.3.9. Dioda kot analogno stikalo.....	53
3.4. POSEBNE VRSTE DIOD	55
3.4.1. Prebojna dioda.....	55
3.4.2. Kapacitivna (varicap) dioda.....	58
3.4.3. PIN dioda	59
3.4.4. Tunelska dioda.....	60
3.4.5. Schottkyjeva dioda.....	61
3.4.6. Svetleča dioda (LED).....	62
3.4.7. Fotodioda in sončna celica.....	63
3.4.8. Laserska dioda	64
VPRAŠANJA	66
NALOGE	67

4.1. SIMBOL IN ZGRADBA	69
4.2. DELOVANJE BIPOLARNEGA TRANZISTORJA.....	71
4.2.1. Analiza tokov v tranzistorju.....	72
4.2.2. Različne orientacije tranzistorja.....	76
4.2.3. Nadomestno vezje bipolarnega tranzistorja	77
4.2.4. Vhodna in izhodna karakteristika bipolarnega tranzistorja.....	81
4.2.5. Tokovno in napetostno ojačenje	83
4.2.6. Brema, delovna premica in delovna točka.....	84
4.3. NASTAVITEV DELOVNE TOČKE	87
4.3.1. Nastavitev delovne točke z uporom na bazi	89
4.3.2. Nastavitev delovne točke z delilnikom napetosti.....	90
4.4. STABILIZACIJA DELOVNE TOČKE.....	92
4.4.1. Stabilizacija delovne točke z emitorskim uporom	92
4.4.2. Stabilizacija delovne točke z diodo	96
4.4.3. Stabilizacija delovne točke z napetostno povratno zanko	97
4.5. OJAČEVALNIKI PRI NIZKIH FREKVENCAH	98
4.5.1. Tranzistor v orientaciji s skupnim emitorjem.....	98
4.5.2. Tranzistor v orientaciji s skupnim kolektorjem.....	100
4.5.3. Tranzistor v orientaciji s skupno bazo	103
4.5.4. Napetostni sledilnik.....	105
4.5.5. Diferencialni ojačevalnik	106
4.6. VEČSTOPENJSKI OJAČEVALNIKI	111
4.6.1. Skupno ojačenje.....	111
4.6.2. Prilagoditev ojačevalnih stopenj.....	112
4.6.3. Frekvenčna propustnost.....	115
4.6.4. Enosmerna povezava ojačevalnikov.....	115
4.6.5. RC povezava ojačevalnikov	120
4.6.6. LC povezava ojačevalnikov.....	124
4.6.7. Transformatorska povezava ojačevalnikov.....	125
4.6.8. Povezava ojačevalnikov s selektivnim transformatorjem	126
4.6.9. Decibeli.....	127
4.6.10. Šum ojačevalnika	128

4.7.1. Kapacitivnost baza-emitor	130
4.7.2. Kapacitivnost kolektor-baza	131
4.7.3. Vpliv kapacitivnosti na ojačenje	131
4.7.4. Kaskadni ojačevalnik	137
4.8. MOČNOSTNI OJAČEVALNIKI	138
4.8.1. Izkoristek ojačenja moči	138
4.8.2. Popačenje	139
4.8.3. A razred ojačevalnika	140
4.8.4. B razred ojačevalnika	142
4.8.5. AB razred ojačevalnika	144
4.8.6. C razred ojačevalnika	146
4.9. PREKLOPNE LASTNOSTI TRANZISTORJA	147
4.9.1. Preklopni časi	149
4.9.2. Induktivno breme	150
4.9.3. Kapacitivno breme	151
VPRAŠANJA	155
NALOGE	156

5. UNIPOLARNI TRANZISTORJI

159

5.1. JFET	160
5.1.1. Delovanje JFET	161
5.1.2. Karakteristika JFET	163
5.1.3. Nadomestno vezje JFET	165
5.1.4. Nastavitev in stabilizacija delovne točke JFET	166
5.1.5. Orientacije JFET	169
5.1.6. Vezja z JFET in bipolarnim tranzistorjem	170
5.1.7. JFET kot upor	171
5.1.8. JFET kot dioda	173
5.1.9. MESFET	173
5.1.10. HFET	174

5.2.1. MOSFET z induciranim kanalom	175
5.2.2. MOSFET z vgrajenim kanalom.....	177
5.2.3. Nastavitev delovne točke MOSFET	178
5.2.4. MOSFET z dvoje vrati	178
5.2.5. Močnostni MOSFET.....	179
5.2.6. CMOS tranzistorja	181
5.2.7. FAMOS tranzistor.....	182
5.2.8. Tranzistor z izoliranimi vrati ali IGBT	183
VPRAŠANJA	184
NALOGE	185

6. KRMILNI POLPREVODNIŠKI ELEMENTI 187

6.1. ENOSPOJNI TRANZISTOR ALI UJT.....	187
6.2. ENOSPOJNI TRANZISTOR Z MOŽNOSTJO PROGRAMIRANJA ALI PUT	190
6.3. DVOSMERNNA DIODA	191
6.4. DIODNI TIRISTOR	192
6.5. DVOSMERNI DIODNI TIRISTOR ALI DIAC.....	193
6.6. TIRISTOR	195
6.6.1. Zaporno neprevodni tiristor ali SCR.....	195
6.6.2. Tiristor z možnostjo ugašanja ali GTO.....	197
6.6.3. Tetrodni tiristor ali SCS	197
6.6.4. Zaporno prevodni tiristor ali RCT.....	198
6.7. TRIAC	198
6.8. NAČIN UPORABE TIRISTORJA IN TRIACA.....	199
VPRAŠANJA	203

7.1. OPERACIJSKI OJAČEVALNIK.....	207
7.1.1. Lastnosti operacijskega ojačevalnika	207
7.1.2. Invertirajoči ojačevalnik.....	208
7.1.3. Neinvertirajoči ojačevalnik	209
7.1.4. Seštevalnik in odštevalnik	211
7.1.5. Sprememba koeficienta ojačenja.....	211
7.1.6. Mostični ojačevalnik.....	212
7.1.7. Primerjalnik.....	212
7.1.8. Primerjalnik s histerezo.....	214
7.1.9. Napetostno-tokovni pretvornik	216
7.1.10. Napetostni in tokovni izvor.....	216
7.1.11. Izvor simetrične napetosti.....	217
7.1.12. Okenski diskriminator.....	218
7.1.13. Integrator	218
7.1.14. Diferenciator.....	219
7.1.15. Značilni podatki operacijskega ojačevalnika.....	219
7.1.16. Operacijski ojačevalnik z enojnim napajanjem	221
7.1.17. Kompenzacija operacijskega ojačevalnika	222
7.2. MOČNOSTNI INTEGRIRANI OJAČEVALNIKI.....	225
7.3. NAPETOSTNI REGULATORJI	229
7.4. TEHNOLOGIJA MONOLITNIH INTEGRIRANIH VEZIJ	231
7.4.1. Difuzija primesi.....	233
7.4.2. Oksidacija	234
7.4.3. Fotolitografija	234
7.4.4. Epitaksija.....	235
7.4.5. Metalizacija	235
VPRAŠANJA	235
NALOGE	236

8.1. VAKUUMSKI ELEMENTI	240
8.1.1. Termična emisija elektronov	240
8.1.2. Vakuumska dioda	241
8.1.3. Vakuumska trioda	242
8.1.4. Vakuumska tetroda	244
8.1.5. Vakuumska pentoda.....	245
8.1.6. Ojačevalniki z vakuumskimi elementi.....	246
8.1.7. Katodna ali žarkovna cev	250
8.2. PLINSKI ELEMENTI.....	253
8.2.1. Tlivka	253
8.2.2. Tiratron	254
8.2.3. Ignitron.....	255
VPRAŠANJA	256
NALOGE	256

9. DODATEK 257

9.1. TERMOELEKTRIČNI PRETVORNIKI.....	257
9.1.1. Termistorji.....	258
9.1.2. Polprevodniška dioda in tranzistor	259
9.1.3. Termočlen	259
9.1.4. Monolitni termoelektrični pretvorniki.....	259
9.2. OPTOELEKTRIČNI PRETVORNIKI.....	260
9.2.1. Fotoupor.....	260
9.2.2. Fotodioda	260
9.2.3. Fototranzistor	260
9.2.4. Fototiristor ali LASCR	261
9.2.5. Optični spojniki.....	261
9.3. PIEZOELEKTRIČNI PRETVORNIK.....	262
9.4. HALLOVA SONDA	263

9.5.1. LED prikazovalniki	264
9.5.2. Prikazovalniki s tekočimi kristali ali LCD	264
9.5.3. Vakuumski fluorescenčni prikazovalniki	266
9.5.4. Plazma prikazovalniki	266
9.6. CCD	267
VPRAŠANJA	268
10. TABELE	269
10.1. USMERNIKI	270
10.2. ORIENTACIJE BIPOLARNEGA TRANZISTORJA	271
10.3. ORIENTACIJE UNIPOLARNEGA TRANZISTORJA	272
10.4. ORIENTACIJE VAKUUMSKE TRIODE	273
10.5. POGOSTO UPORABLJENE ENAČBE	274
10.5.1. Diode	274
10.5.2. Usmerniki	274
10.5.3. Bipolarni tranzistor	275
10.5.4. Unipolarni tranzistorji	275
10.5.5. Operacijski ojačevalnik	276
10.5.6. Vakuumske elektronke	276
10.6. ENAČBE ZNAČILNIH VEZIJ	277
10.6.1. Polnovalni usmernik s sredinskim odcepom	277
10.6.2. Polnovalni mostični usmernik	277
10.6.3. Ojačevalnik z bipolarnim npn tranzistorjem	278
10.6.4. Ojačevalnik z JFET	279
10.6.5. Operacijski ojačevalnik	279
10.6.6. Vakuumska trioda	281
10.7. SIMBOLI	282
10.8. PREDPONE	284
INDEKSNO KAZALO	285

UVOD

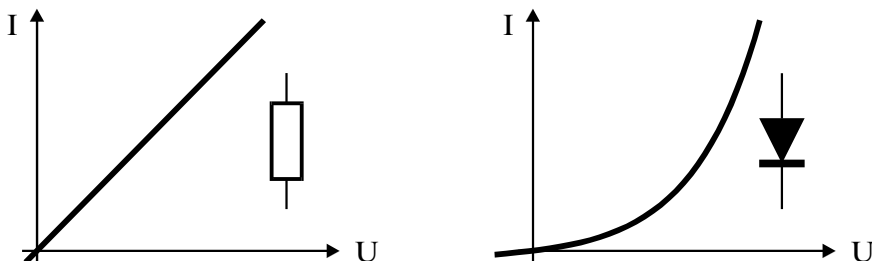
Preden začnemo spoznavati elektronske elemente in vezja, je prav, da se za trenutek ustavimo pri nekaterih osnovnih pravilih vezij – z njimi se bomo pogosto srečevali skozi vso knjigo.

1.1. ELEMENTI

Elektronski elementi so osnovni gradniki vsakega vezja. Imajo bodisi dva, tri ali več priključkov. Zaprti so v kovinska, plastična ali keramična ohišja, na katerih so osnovne označbe elementa, podane z znaki ali barvami.

Elementi, ki sestavljajo vezje, so lahko **pasivni** ali **aktivni**. Pasivni elementi električno energijo le porabijo (upor, dioda) ali jo akumulirajo (kondenzator, tuljava). Vezje, sestavljeno iz pasivnih elementov, lahko signale le preoblikuje, ne more pa jih ojačati ali generirati – to nalogo opravljajo aktivni elementi (tranzistorji).

Elementi so lahko **linearni** ali **nelinearni**, časovno **spremenljivi** ali **nespremenljivi**. Nelinearni elementi so tisti, ki imajo nelinearno povezavo med tokom in napetostjo (slika 1.1), kot npr. dioda in tranzistor.



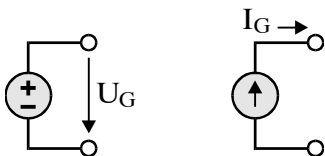
Slika 1.1. Linearna karakteristika upora ter nelinearna karakteristika diode.

1.2. VEZJA

Električna vezja so sestavne enote električnih naprav. Te imajo lahko različne funkcije (ojačevalniki, preoblikovalniki, generatorji, ...). Vezje mora biti načrtovano in izdelano tako, da bo v danem okolju opravljalo predpisano funkcijo. Pri tem moramo upoštevati tudi vse zunanje vplive, ki jim je vezje izpostavljeno (temperatura, vlaga, sevanje, tresljaji, plini, ...).

1.2.1. Generatorji

Pogosto si izračun zapletenega vezja poenostavimo tako, da ga za določeno delovno območje nadomestimo s preprostejšim, nadomestnim vezjem. V nadomestnih vezjih srečamo naslednje elemente: upore, kondenzatorje, tuljave in generatorje.



Slika 1.2. Napetostni in tokovni generator.

Najpogosteje uporabimo idealne napetostne in tokovne generatorje. Idealen pomeni, da se napetost pri napetostnem generatorju ali tok pri tokovnem generatorju ne spreminja, ne glede na velikost bremena. Poznamo tudi krmljeni generator. Izhodno veličino krmljenega generatorja lahko spreminjamo s pomočjo izbrane napetosti ali toka.

1.2.2. Osnovna pravila vezij

Če želimo izračunati elemente v vezju, moramo poznati osnovna pravila in teoreme vezij. Oglejmo si nekaj najvažnejših:

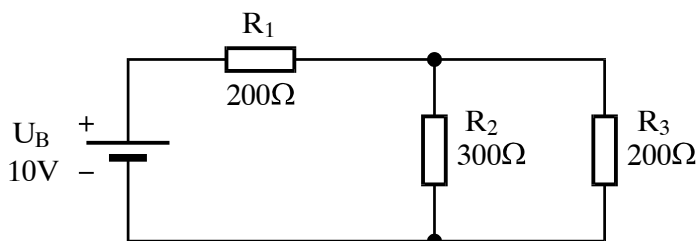
Ohmov zakon pravi, da je električni tok, ki teče skozi nek element, sorazmeren padcu napetosti na tem elementu in obratno sorazmeren upornosti elementa. Ali z enačbo:

$$I = \frac{U}{R} \quad \text{Ohmov zakon}$$

Prvi Kirchhoffov* zakon: V vsakem **vozlišču** vezja je vsota pritekajočih tokov enaka vsoti odtekajočih tokov. To je tudi logično, saj se električni tok ne more nabirati v vozlišču ali pa v njem nastajati. Pri izračunu moramo paziti na izbrane smeri tokov.

Drugi Kirchhoffov zakon: V vsakem **zaključnem tokokrogu** (zanki) je vsota pritisnjenih napetosti po velikosti enaka vsoti vseh padcev napetosti v tem tokokrogu. Ali drugače: ob upoštevanju smeri padcev napetosti je vsota vseh padcev napetosti v **zaključeni** zanki enaka nič.

Prvi primer



Izračunajmo tokove vezja s pomočjo prvega in drugega Kirchhoffovega zakona!

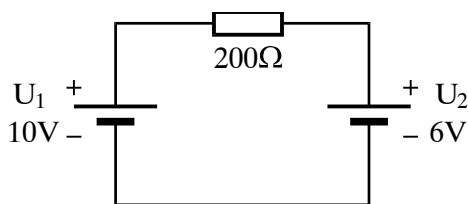
* izg. kirhof

VPRAŠANJA

1. Ali je upor pasiven ali aktiven element? Zakaj?
2. Kakšna je razlika med linearnimi in nelinearnimi elementi?
3. Kaj je »idealni« generator? Ali ga lahko naredimo?
4. Kaj nam povesta prvi in drugi Kirchhoffov zakon o vezjih?
5. Kakšna je smer padca napetosti na virih in kakšna na upornostih glede na izbrano smer toka?
6. Ali si lahko poljubno linearno vezje predstavimo kot generator in upornost? Kateri teorem govori o tokovnem generatorju? Kako je pri tem vezana upornost: zaporedno ali vzporedno?
7. Kaj je četveropol? Kako določimo parameter h_{12} ?
8. Koliko neodvisnih enačb in koliko parametrov potrebujemo za opis četveropola?
9. Kaj je linearizacija? Kakšen je pogoj, da lahko karakteristiko elementa lineariziramo?
10. Kaj je diferencialna upornost? V katerem primeru se razlikuje od statične upornosti?

NALOGE

1. Ugotovite smer toka skozi upor v vezju in izračunajte velikost toka! (Odg.: 20mA)



2. Izračunajte vrednost napetostnega vira in upornost upora za Theveninovo ter vrednost tokovnega vira in upornost upora za Nortonovo vezje! (Odg.: 4,8V, 120Ω, 40mA, 120Ω)

POLPREVODNIKI

Leta 1911 je britanski fizik Ernest Rutherford ugotovil, da je atom sestavljen iz pozitivno nabitega jedra, ki vsebuje praktično vso maso atoma, ter negativno nabitih delcev, elektronov, ki krožijo okrog njega. Jedro sestavljajo protoni (pozitivno nabiti delci), in nevtroni, ki nimajo naboja. Število pozitivnih protonov v jedru je enako številu negativnih elektronov, ki krožijo okrog jedra. Tako je atom navzven električno nevtralen. Elektroni krožijo okoli jedra na različnih, natanko določenih orbitah. Natančneje je kroženje okrog jedra opisal danski fizik Niels Bohr leta 1913. Ugotovil je, da imajo elektroni lahko le točno določene diskretne energije; elektron, ki bi imel neko vmesno energijo, ne obstaja.

Energijo merimo v eV (elektron voltih); 1eV je potreben, da premaknemo en elektron za napetostni potencial enega volta. Govorimo lahko le o razlikah energij med elektroni v atomu, ne pa o njihovih absolutnih vrednostih. Nično energijo pripišemo mirujočemu elektronu, ki ni vezan na jedro. Tako imajo

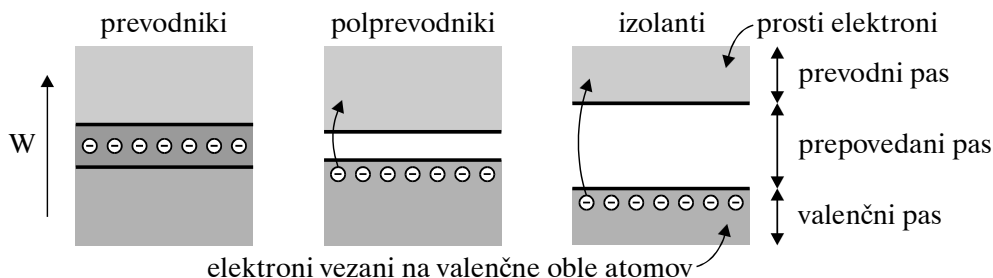
elektroni, ki so vezani v atomu, negativno energijo. Ko atomu dovedemo energijo, preskočijo elektroni v stanja z višjo energijo – pravimo, da je atom vzbujen. Ko npr. elektron vodikovega atoma preskoči iz prvega vzbujenega stanja zopet v normalno stanje, odda foton valovne dolžine 1,216 angstroma (10^{-10} m, področje ultravijolične svetlobe).

2.1. PREVODNOST MATERIALOV

Prevodnost materialov je odvisna od števila prostih elektronov, ki se lahko po materialu prostorsko gibljejo. Atomi dobrih prevodnikov ionizirajo že pri zelo nizkih temperaturah, kar pomeni, da kroži po materialu veliko število prostih elektronov. Ko na prevodni material priključimo napetost, začnejo elektroni zaradi električne sile potovati. Ker imajo negativni naboj, se gibljejo od negativnega proti pozitivnemu potencialu. Tako steče električni tok.

Nasprotno pa so v izolantih valenčni elektroni trdneje vezani na jedro atoma. Zaradi tega je v materialu le minimalno število prostih elektronov, prevodnost teh materialov izredno nizka.

Dogajanje lahko opišemo z energijami. Zunanjo oblo, kjer v atomu krožijo elektroni, imenujemo valenčna obla. Pravimo, da se elektroni, ki krožijo na tej zunanji obli, energijsko nahajajo v valenčnem pasu. To tudi pomeni, da imajo premalo energije, da bi lahko zapustili atom. Če želimo, da elektron zapusti atom, mora imeti vsaj toliko energije, da preskoči iz valenčnega v prevodni energijski pas. Med valenčnim in prevodnim energijskim pasom je t.i. prepovedani pas, ki je zelo pomemben za določanje električnih lastnosti materialov.



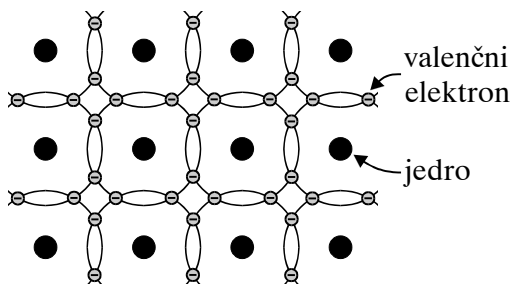
Slika 2.1. Razpored energijskih pasov.

Na sliki 2.1 vidimo energijske pasove za prevodnik, polprevodnik in izolant. Čim širši je prepovedani pas, tem večjo energijo moramo dovesti atomu, da elektron preskoči iz valenčnega v prevodni pas. Razlika med prevodniki, polprevodniki in izolanti je prav v velikosti energije, ki je potrebna, da atom ioniziramo ter pridobimo prosti elektron.

2.2. POLPREVODNIKI

Atomi polprevodniških materialov imajo **štiri** elektrone na zunanji obli, zato pravimo, da so štirivalenčni. V prostoru se atomi razporedijo simetrično v monokristalno mrežo, kjer vzpostavijo med seboj posebne vezi, ki jim pravimo **kovalentne** vezi. Vsak od atomov prispeva vsakemu sosedu po en elektron iz zunanje oble. Ker ima vsak atom po štiri sosedbe, to pomeni, da krožijo na zunanji obli poleg njegovih štirih še štirje sosedovi elektroni. Skupaj torej osem. Na ta način so zunanje oble atomov izpolnjene.

Čisti polprevodnik ima pri nizkih dovedenih energijah lastnost izolanta, pri dovolj veliki dovedeni energiji pa se obnaša kot slab prevodnik. To lastnost imajo štirivalenčni elementi silicij, germanij in ogljik ter nekatere kemične spojine elementov med II. in VI. skupino periodičnega sistema, kot so na primer GaAs, GaN, GaP, InSb, CdO, CdS ter ZnSe.



Slika 2.2. Zgradba polprevodniškega materiala.

Polprevodniki so materiali, ki imajo posebne električne lastnosti. Pri zelo nizki temperaturi so izolanti, pri višji temperaturi pa se obnašajo kot slabi prevodniki. V elektronski industriji je kot polprevodnik najpogosteje uporabljen silicij.

2.2.1. Elektroni in vrzeli

Povedali smo že, da pri primerno veliki dovedeni energiji (dovolj je že sobna temperatura) določeno število atomov v polprevodniku ionizira. To pomeni, da imajo elektroni dovolj energije, da zapustijo svoj atom in postanejo prosti. Pobegli elektron pusti za seboj v atomu praznino, torej primanjkljaj enega elektrona, ki ji pravimo vrzel. Atom postane pozitiven ion, toda že pri nizkih energijah se zgodi, da v to praznino vskoči elektron iz sosednjega atoma. V tega sedaj vskoči elektron iz naslednjega sosedu in tako naprej. Vrzel se tako prosto premika iz atoma na atom in prispeva k prevodnosti materiala. Zato si lahko vrzel predstavljamo kot pozitiven gibljiv delec, ki ima naboj po vrednosti enak elektronu.

Iz vsakega ioniziranega atoma dobimo par: prosti elektron in vrzel. Tako kot nastajajo oziroma se generirajo, tudi izginjajo. Temu pojavu pravimo **rekombinacija**, ki se zgodi vsakič, ko elektron izgubi toliko energije, da pade v valenčni pas. Pri tem izgine elektron v prevodnem in vrzel v valenčnem pasu.

Generacija in rekombinacija je lahko neposredna ali posredna. Pri neposredni rekombinaciji se elektron iz prevodnega pasu rekombinira z vrzeljo v valenčnem pasu. Razliko energije odda kot foton. Pri posredni rekombinaciji pa se elektron ali vrzel ujameta v energijskem pasu, ki leži med prevodnim in valenčnim, nastane pa zaradi nečistoč v polprevodniku – takim mestom pravimo pasti ali rekombinacijski centri. Tu ostaneta ujeta določen čas, dokler se ne srečata in dejansko rekombinirata. Do prave rekombinacije torej pride z določeno zamudo.

V električnem polju potujejo prosti elektroni k pozitivnejšemu potencialu, vrzeli pa k negativnejšemu. Tej šibki prevodnosti, ki jo ima čisti polprevodnik, pravimo intrinzična prevodnost. Če se temperatura polprevodnika poveča, se v njem tvori večje število prostih elektronov in vrzeli, zato se prevodnost poveča.

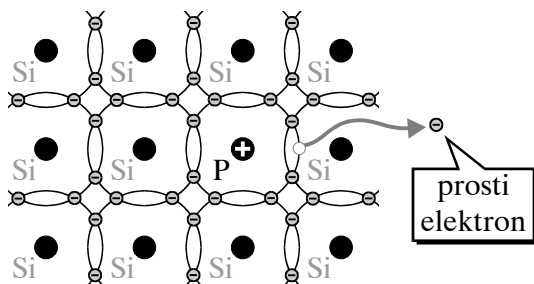
Prevodnost polprevodnika je odvisna od števila prostih elektronov in vrzeli. Ko elektron zapusti atom polprevodnika, pusti za sabo vrzel, ki prav tako prispeva k prevodnosti polprevodnika.

2.2.2. Polprevodnik s primesmi

Pomembno spremembo v električni lastnosti polprevodnika dosežemo s tako imenovanim dopiranjem. Pri tem postopku v strukturo polprevodnika dodajamo primesi – atome tujih elementov –, ki zaradi različnega valenčnega števila močno izboljšajo prevodnost. Take primesi so lahko petvalenčne ali pa trivalenčne. Poglejmo si lastnosti polprevodnika za oba primera.

2.2.3. N-tip polprevodnika

Ko se ustvarja kristal polprevodnika, se lahko na različna mesta v njegovi strukturi namesto atomov polprevodnika vselijo atomi tuje primesi. Če to mesto zasede petvalenčni atom (atom, ki ima pet elektronov na zunanji obli), se štirje valenčni elektroni spojijo v kovalentne vezi s silicijevimi atomi, peti valenčni elektron pa ne. Ta elektron ima tako majhno vezalno energijo (to je energija, s katero je elektron vezan na atom), da se že pri nizki dovedeni energiji odtrga od atoma. Za sabo pusti nepremičen pozitiven ion, sam pa se lahko prosto giblje po materialu.

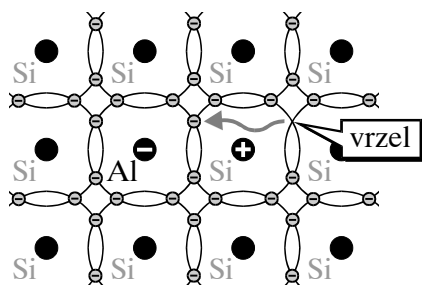


Slika 2.3. Petvalenčna primes v polprevodniku.

Večje število primesi povzroči povečanje števila prostih elektronov, ki občutno povečajo prevodnost polprevodnika. Petvalenčne primesi, kot so fosfor, arzen in antimon, dajo svoj elektron, zato jih imenujemo **donorji**. Čim več jih je, boljša je prevodnost polprevodnika. Ker prevladujejo kot nosilci električnega toka negativni elektroni, se tak polprevodnik imenuje **n-tip** polprevodnika.

2.2.4. P-tip polprevodnika

Če se v štirivalenčni polprevodnik vselijo trivalenčni atomi primesi (atomi, ki imajo tri elektrone na zunanji obli), se vsi trije elektroni spojijo v valenčne vezi z obkrožajočimi silicijevimi atomi. Četrta kovalentna vez ostane prazna, kar povzroči, da že pri sobni temperaturi prileti vanjo elektron iz okolice. Ta pa pusti za seboj gibljivo vrzel. Atom primesi se tedaj spremeni v nepremičen negativen ion z enim elektronom več v valenčni obli. Ker so ionizacijske energije teh primesi zelo majhne, so vsi atomi pri normalnih temperaturah ionizirani. To pomeni, da so v polprevodniku sedaj gibljive vrzeli, ki omogočajo prevodnost.



Slika 2.4. Trivalenčna primes v polprevodniku.

Trivalenčne primesi, kot so bor, aluminij, galij in indij, »jemljejo« elektrone (in ustvarijo gibljive vrzeli), zato jim pravimo **akceptorji**. Ker prevladujejo kot nosilci električnega toka pozitivne vrzeli, se tak polprevodnik imenuje **p-tip** polprevodnika.

Če polprevodniku dodajamo primesi petvalenčnih atomov, se v polprevodniku poveča število prostih elektronov. Če pa dodajamo primesi trivalenčnih atomov, se poveča število vrzeli. Tako dobljena polprevodnika imenujemo polprevodnik **n-tipa** oz. polprevodnik **p-tipa**.

2.2.5. Večinski in manjšinski nosilci elektrine

Poleg prostih elektronov, ki jih v n -tipu polprevodnika ustvarijo primesi (v p -tipu vrzeli), ne smemo zanemariti – četudi majhnega – deleža elektronov in vrzeli, ki se ustvarijo v polprevodniku zaradi dovedene energije. Rojevanje teh nabojev je odvisno od temperature, zato se večini polprevodniških elementov karakteristike s temperaturo spreminjajo. Ker se število prostih elektrin v polprevodniku s temperaturo večja, se istočasno večja tudi prevodnost.

Elektrine, ki jih polprevodnik pridobi zaradi primesi, so v veliki večini, zato jim rečemo **večinski** nosilci elektrine. To so elektroni v n -tipu ter vrzeli v p -tipu polprevodnika, njihovo število pa ni odvisno od temperature. Prevodnosti zaradi teh elektrin pravimo ekstrinzična prevodnost.

V polprevodniku pa se rojevajo tudi pari elektron-vrzel, ki jih je manj kot večinskih nosilcev elektrine, njihovo število pa je odvisno od **temperature**. Elektrinam, ki so v polprevodniku v manjšini, rečemo, da so **manjšinski** nosilci elektrine. V n -tipu so to vrzeli, v p -tipu pa elektroni.

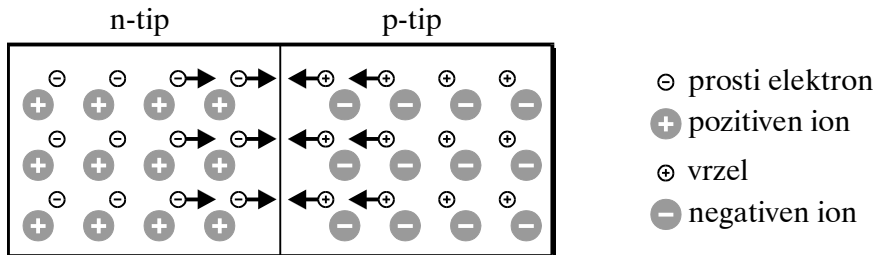
V n -tipu polprevodnika so elektroni večinski, vrzeli pa manjšinski nosilci elektrine. Nasprotno so v p -tipu polprevodnika vrzeli večinski, elektroni pa manjšinski nosilci elektrine.

2.3. PN SPOJ

Ko v polprevodniku ustvarimo področja z različnimi koncentracijami primesi donorjev in akceptorjev, se meja, ki loči z donorji bogatejše področje od področja, bogatejšega z akceptorji, imenuje **pn spoj**.

Zamislimo si, da spojimo skupaj dva polprevodnika, prvi je n -tip, drugi pa p -tip. Ko sta daleč narazen, je v n -tipu enakomerna koncentracija prostih elektronov, v p -tipu pa vrzeli. V trenutku spojitve pa različna koncentracija elektronov in vrzeli v obeh tipih povzroči difuzijski tok: prosti elektroni namreč iz n -tipa odtekajo v p -tip polprevodnika, ker jih je tam manj. Tako pustijo za sabo pozitivne ione, ki so nepomični in zato ostanejo v n -tipu. Enako se zgodi z vrzelmi, ki odtekajo iz p -tipa v n -tip, ker jih je tam manj. Za njimi ostanejo v p -tipu polprevodnika negativni ioni, ki so nepomični. Difuzijski tok

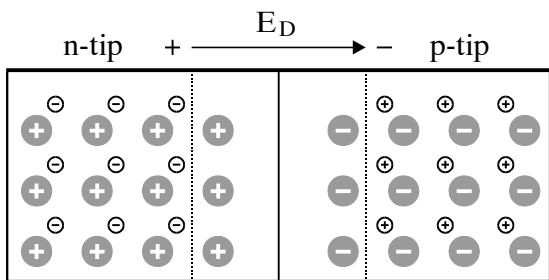
je torej tok, ki ga povzroči neenakomerna koncentracija prostorskega naboja. Elektrine odtekaajo iz področja, kjer jih je več, v področje, kjer jih je manj.



Slika 2.5. Difuzijski tok skozi *pn* spoj.

Elektroni, ki zapustijo *N*-tip polprevodnika, pustijo za seboj pozitivne ione; podobno vrzeli iz *p*-tipa pustijo za seboj negativne ione. Prostorski naboj je sedaj neenakomerno razporejen, posledica tega pa je električno polje, ki ima smer od pozitivnega naboja (zaradi pozitivnih ionov) v *n*-tipu proti negativnemu naboju (zaradi negativnih ionov) v *p*-tipu polprevodnika.

Električna poljska jakost tega polja je tem večja, čim več elektrin preide iz enega v drugi tip. Po smeri pa nastalo električno polje deluje na proste elektrine zaviralno, tako da pri določeni vrednosti zaustavi odtekanje. Vzpostavi se ravnovesno stanje.



Slika 2.6. Električno polje v zaporni plasti.

Električna nevtralnost se poruši le v ozkem predelu med *n* in *p*-tipom polprevodnika, ki ji pravimo **zaporna plast** oz. **prehodno ali osiromašeno področje**

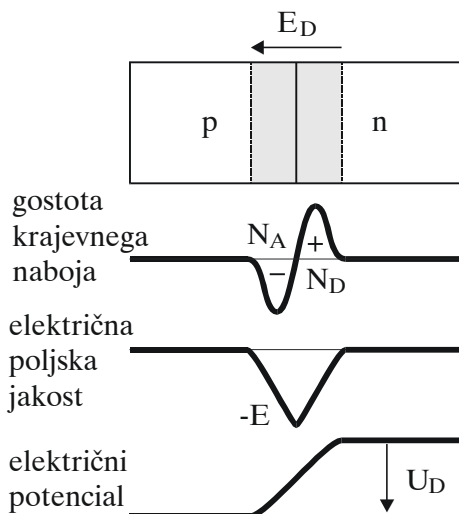
(angl. depletion layer). Osiromašeno zato, ker se v njem ne zadržujejo proste elektrine. To področje je širše tam, kjer je koncentracija primesi manjša.

Električna poljska jakost v zaporni plasti povzroča spremembo električnega potenciala, ki raste v smeri iz p -tipa k n -tipu polprevodnika. Tej potencialni razliki pravimo difuzijska napetost ali kontaktna napetost in je odvisna predvsem od materiala, ki ga uporabimo za polprevodnik ter od koncentracij primesi v p in n -tipu polprevodnika:

$$U_D = \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln \frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2},$$

kjer je:

U_D	difuzijska napetost,
k	Boltzmannova konstanta ($1.38 \cdot 10^{-23}$ Ws/K),
T	absolutna temperatura v K,
q	absolutna vrednost naboja elektrona ($1.6 \cdot 10^{-19}$ As),
N_A	koncentracija akceptorjev v p -tipu ($1/\text{cm}^3$),
N_D	koncentracija donorjev v n -tipu ($1/\text{cm}^3$),
n_i	koncentracija prostih elektronov v 1 cm^3 čistega polprevodnika.



Slika 2.7. Potek gostote prostorskega naboja, električne poljske jakosti in potenciala.

Ko v polprevodniku ustvarimo pn spoj, stečejo elektroni iz n v p -tip (ker jih je tam manj) ter vrzeli iz p v n -tip polprevodnika. Ker se zaradi tega poruši električna nevtrálnost, se v prehodnem področju med n in p -tipom ustvari električno polje. Temu področju pravimo zaporna plast ali osiromašeno področje.

VPRAŠANJA

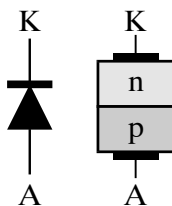
1. Kaj pomenita valenčni in prevodni pas? Kdaj so elektroni v prvem, kdaj pa v drugem?
2. Kako sta povezani med seboj prevodnost materialov in širina prepovedanega pasu?
3. Kdaj lahko preskoči elektron iz valenčnega v prevodni pas? Kaj se zgodi, ko se vrne nazaj?
4. Naštej nekaj polprevodnikov!
5. Kaj je rekombinacija?
6. Kaj je vrzel?
7. Kaj se zgodi, ko polprevodniku dodamo 3 ali 5-valentne primesi? Kaj pomeni izraz »3-valentni«?
8. Kaj so donorji in kaj akceptorji?
9. Opiši razliko med n -tipom in p -tipom polprevodnika!
10. Kaj so manjšinski nosilci elektrine in kaj večinski?
11. Kaj se zgodi v trenutku, ko ustvarimo pn spoj?
12. Zakaj nastane med p in n polprevodnikom električno polje? V katero smer je usmerjeno? Zakaj?
13. Kaj je difuzijski tok?
14. Kaj je zaporna plast?

DIODE

Polprevodniška dioda je najstarejši polprevodniški element. Narejena je kot spoj p in n -tipa polprevodnika. Priključka diode imenujemo anoda in katoda.

Prve diode so izdelovali kot t.i. točkaste diode. Kovinsko žico so zavarili na površino polprevodnika n -tipa. Pri zvaru so atomi iz žice zaradi visoke temperature prodrli nekoliko v polprevodnik in ustvarili p -tip.

Najpogosteje srečamo usmerniške diode, vendar pa poznamo še veliko drugih vrst diod.



Slika 3.1. Simbol in zgradba diode.

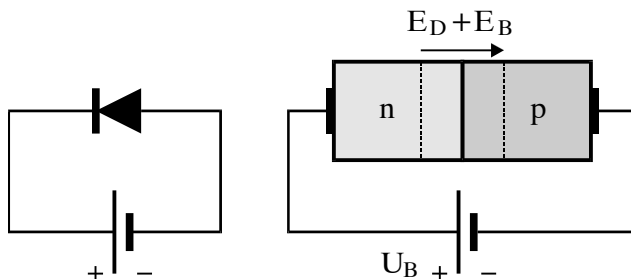
3.1. DELOVANJE DIODE

Nastanek *pn* spoja smo si ogledali že v predhodnem poglavju. Diodo si lahko predstavimo kot ventil, ki prepušča električni tok samo v eno smer. Zato lahko na diodo priključimo napetost v prevodno ali pa v zaporno smer.

3.1.1. Zaporna smer diode

Povedali smo že, da je v okolici *pn* spoja področje brez prostih nosilcev elektronov, ki se imenuje zaporna plast, in da tam vlada električno polje. Elektron, ki bi hotel iz *n*-tipa v *p*-tip, bi na svoji poti zašel v omenjeno električno polje, kjer bi ga električna sila potegnila zopet v *n*-tip. Enako bi se zgodilo z vrzeljo, ki bi potovala iz *p*-tipa polprevodnika.

Če na diodo priključimo električni vir tako, da je katoda na pozitivnem, anoda pa na negativnem potencialu (slika 3.2), bo ta napetost še povečala električno polje v *pn* spoju in tako še bolj preprečila potovanje elektronov proti pozitivnemu polu ter vrzeli proti negativnemu polu vira. Tok skozi diodo ne bi stekel.

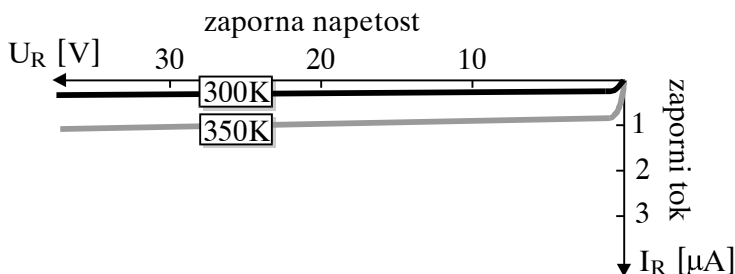


Slika 3.2. Zaporna smer diode.

3.1.2. Tok nasičenja diode

Pri zaporni priključeni napetosti vseeno teče skozi diodo majhen tok. Povzročijo ga predvsem generacije nosilcev naboja v zaporni plasti ter manjšinski nosilci naboja, ki difundirajo skozi zaporno plast. Oba tokova sta zelo majhna (nekaj nA za silicij in nekaj μ A za germanij) in se s spremembo zaporno

priključene napetosti le malo spreminjata. Oba toka običajno obravnavamo skupaj – govorimo o toku nasičenja diode. Ker je tak tok odvisen od rojevanja elektronov (parov elektron-vrzel) v zaporni plasti, se s povečanjem temperature zvišuje tudi tok nasičenja. Ta narašča eksponentno s temperaturo: pri silicijevi diodi se podvoji že, če povišamo temperaturo za 7K.

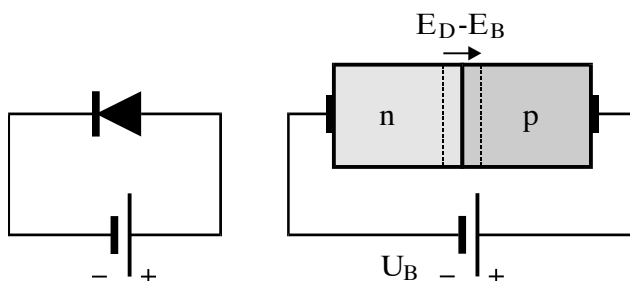


Slika 3.3. Tok nasičenja diode.

Pri delovanju elektronskih elementov je tok nasičenja nezaželen, saj pomeni spreminjanje tokov v vezju s temperaturo. Uporaben pa je lahko za merjenje temperature ali osvetlitve.

3.1.3. Prevodna smer diode

Če anodo priključimo na pozitivni pol vira, katodo pa na negativni, smo diodo priključili v prevodno smer. Tako priključena napetost se odšteva od difuzijske napetosti, ki vlada na pn spoju: $U_D - U_{BAT}$.

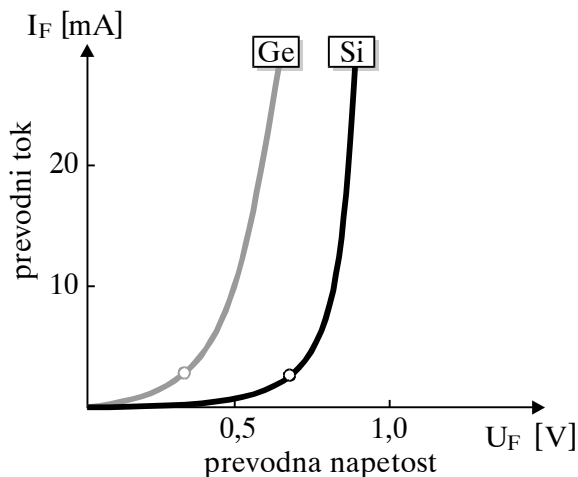


Slika 3.4. Prevodna smer diode.

Ker se zmanjša napetost preko zaporne plasti, se zmanjša tudi zaviralno električno polje. Čim večja je napetost vira, tem manjše je zaviralno električno polje in vse več je elektronov in vrzeli, ki sedaj prehajajo iz enega v drugi tip polprevodnika. Ko zunanja napetost povsem nevtralizira notranjo difuzijsko napetost, zaporne plasti ni več in tok skozi diodo naglo narašča.

3.1.4. Napetost kolena

Zaradi električnega polja v pn spoju sta p in n plast na različnih električnih potencialih. Razliki potencialov preko zaporne plasti pravimo potencialni prag. Od njega je odvisna višina napetosti, ki jo moramo priključiti na pn spoj, da bo dioda prevajala. Napetosti, kjer začne tok v prevodni smeri strmo naraščati, pravimo napetost kolena. Odvisna je predvsem od materiala polprevodnika ter od števila primesi in je za germanij (Ge) približno 0,3V, za silicij (Si) 0,7V in za galijev arzenid (GaAs) 1,2V.



Slika 3.5. Napetost kolena germanijeve in silicijeve diode.

Ko prekoračimo napetost kolena, začne tok skozi diodo strmo naraščati. Dioda postaja vse prevodnejša, kar tudi pomeni, da lahko prevelik tok uniči spoje znotraj diode, ki bo zato nehala prevajati.

Dioda je sestavljena iz *pn* spoja polprevodnika in dveh priključkov: anode in katode. V prevodni smeri prevaja šele pri napetosti kolena, v zaporni pa teče skozi diodo le zelo majhen tok.

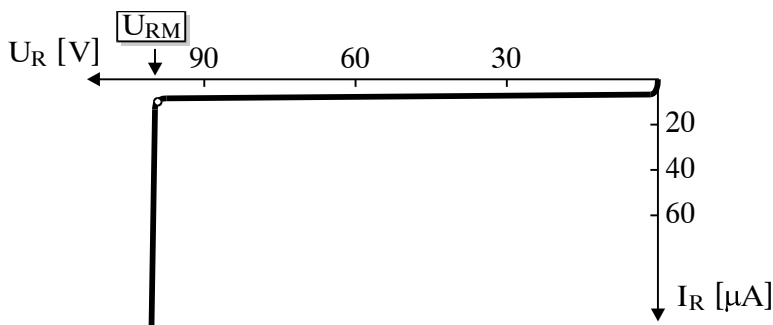
3.2. LASTNOSTI DIOD

Spoznali bomo nekaj značilnih lastnosti polprevodniških diod, kot so prebojna napetost, kapacitivnost in podobno.

3.2.1. Električni preboj diode

Dioda v zaporni smeri ne prevaja električnega toka. Tok, ki teče skozi zaporno plast, je zanemarljivo majhen. Ko pa je priključena napetost diode velika, dioda prebije in zaporni tok strmo naraste. Če tega toka ne omejimo, diodo uničimo. Dopustna temenska vrednost zapornega toka je mnogo manjša od prevodne temenske vrednosti.

Zaporna plast diode, v kateri vlada električno polje, je zelo tanka. Zato prebojne napetosti niso nujno visoke; podatke najdemo v katalogih.



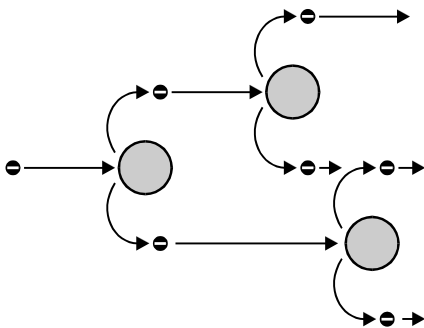
Slika 3.6. Električni preboj diode v zaporni smeri.

Električni preboj nastane zaradi dveh vzrokov:

Zenerjev preboj: Ko napetost večamo, se večja tudi električno polje v *pn* spoju. Z njim postaja tudi sila na elektrone vse večja. Pri določeni zaporni napetosti, ko je sila na atome v zaporni plasti že dovolj velika, se pričnejo

elektroni trgati iz valenčnih obel atomov in stečejo proti n -tipu. Atomi, ki tako ionizirajo, močno povečajo koncentracijo elektrin v zaporni plasti in s tem tok v zaporno smer diode. Do izrazitega zenerjevega pojava pride, če ima polprevodnik veliko primesi in zato zelo ozko zaporno plast.

Plazovita ionizacija: Pri dovolj veliki zaporni napetosti imajo elektrine, ki potujejo skozi prehodno področje pn spoja, velike kinetične energije. Ko se elektron zaleti v atom, lahko atom zaradi trka in predane energije ionizira. Trk elektrona izbije iz valenčne oble atoma nov elektron. Tako nastane v prehodnem področju novi par elektron-vrzel. Ko postane električno polje v prehodnem področju dovolj močno, lahko en sam elektron sproži plaz novih elektronov: vsak novo pridobljeni elektron v električnem polju močno pospeši in ob trku ionizira nov atom. Pojavu pravimo plazovita ionizacija (angl. avalanche breakdown), tok v zaporni smeri diode pa se naglo poveča.



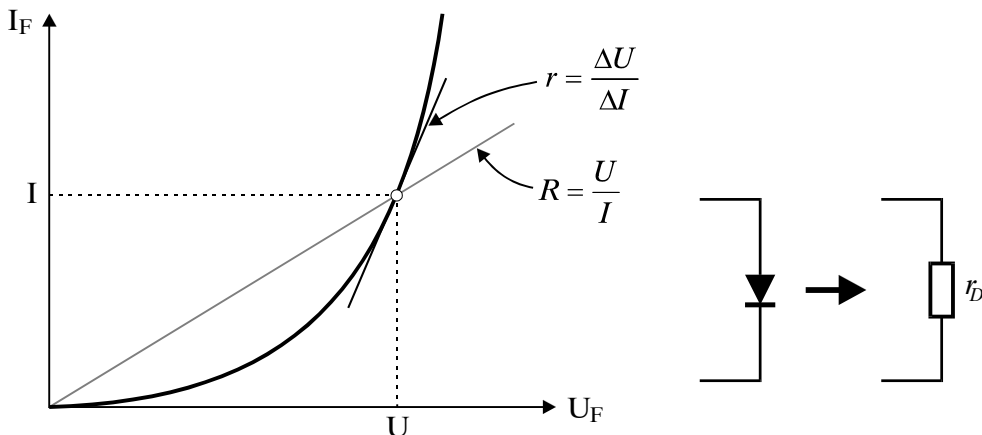
Slika 3.7. Plazovita ionizacija.

Ko z zaporno priključeno napetostjo dosežemo mejno vrednost diode, le-ta prebije. Če toka skozi diodo ne omejimo, jo uničimo. Dioda lahko prebije zaradi Zenerjevega efekta ali plazovite ionizacije.

3.2.2. Diferencialna upornost diode

Dioda je nelinearen element, zato je lahko izračun v vezjih zapleten. Če pa so signali, s katerimi krmilimo diodo, dovolj majhni, lahko upornost diode lineariziramo. To pomeni, da si za majhen signal predstavljamo diodo kot ohmski upor. Najprej si oglejmo razliko med statično in dinamično upornostjo diode.

Statična upornost je razmerje med priključeno enosmerno napetostjo in enosmernim tokom, ki teče skozi element ali vezje: $R=U/I$. **Dinamična** upornost pa je razmerje med priključeno izmenično napetostjo in izmeničnim tokom, ki teče skozi element ali vezje: $r=u/i$. Enačba velja le za majhne spremembe napetosti in toka, ko lahko kratek odsek krivulje nadomestimo z odsekom premice – uporabimo linearizacijo.



Slika 3.8. Statična in dinamična upornost na nelinearnem elementu.

Pri ohmskem uporju sta obe upornosti enaki, medtem ko pri nelinearnem elementu ne. Majhna izmenična napetost povzroči na bolj strmi krivulji nelinearnega elementa večjo spremembo toka (in s tem manjšo dinamično upornost), kot bi jo sicer ohmski upor (glej sliko 3.8). Pri nizkih frekvencah je napetostno tokovna karakteristika diode opisana z enačbo:

$$I_D = I_S \cdot \left(e^{\frac{q \cdot U}{k \cdot T}} - 1 \right),$$

kjer je:	I_S	tok nasičenja diode,
	q	absolutna vrednost naboja elektrona ($1.6 \cdot 10^{-19}$ As),
	k	Boltzmannova konstanta ($1.38 \cdot 10^{-23}$ Ws/K),
	T	absolutna temperatura v K.

3.2.3. Kapacitivnost diode

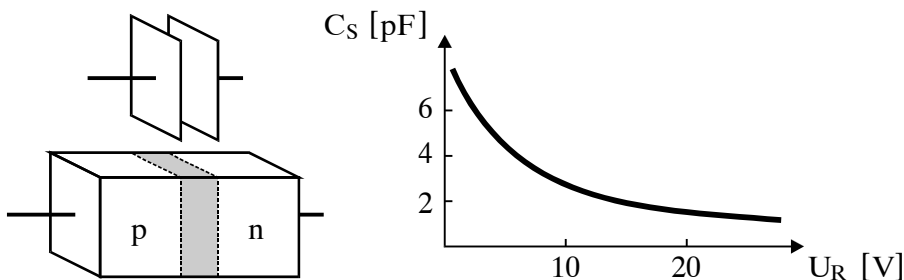
Pri višjih frekvencah ter pri hitrih preklonih se moramo soočiti tudi s kapacitivnostjo, ki jo ima dioda. Kapacitivnost diode v prevodni smeri se po vrednosti razlikuje od kapacitivnosti v neprevodni smeri. Poznamo dve kapacitivnosti:

Difuzijska kapacitivnost: Dioda ima v prevodni smeri zaradi kopičenja elektrin kapacitivnost, ki ji pravimo difuzijska kapacitivnost. Enačba za difuzijsko kapacitivnost se glasi:

$$C_D = \frac{q \cdot I_D}{k \cdot T} \cdot \frac{\tau}{2} = \frac{1}{r} \cdot \frac{\tau}{2}$$

Odvisna je od diferencialne upornosti r ter od življenjske dobe (τ) manjšinskih nosilcev elektrine, ki podaja povprečni čas trajanja manjšinskih elektrin – od njihovega nastanka pa do rekombinacije. Manjšinske elektrine so tisti elektroni ali vrzeli, ki so v danem tipu polprevodnika v manjšini (na primer v n -tipu prevladujejo prosti elektroni, zato so vrzeli manjšinski nosilci elektrine). Zmanjšanju τ pripomorejo dodatki atomov zlata, ki delujejo kot rekombinacijski centri ali pasti. Difuzijska kapacitivnost znaša nekaj nF (nano faradov).

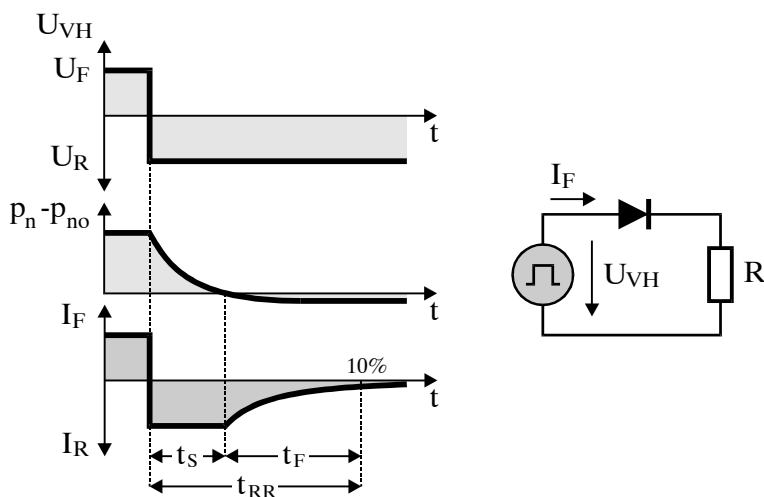
Spojna kapacitivnost: V zaporni smeri deluje zaporna plast diode kot dielektrik pri kondenzatorju. Kapacitivnosti, ki jo tako povzroči prehodno področje, pravimo spojna kapacitivnost. Ker sprememba zaporne napetosti vpliva na debelino zaporne plasti, se z napetostjo spremeni tudi spojna kapacitivnost. Čim večja je zaporna napetost na diodi, tem širša je zaporna plast in manjša je spojna kapacitivnost. Spojna kapacitivnost znaša nekaj pF (piko faradov).



Slika 3.9. Vpliv zaporne napetosti na spojno kapacitivnost.

3.2.4. Preklopne lastnosti diod

Pri vzburjanjih z impulzi deluje dioda kot stikalo: v prevodno smer prevaja, v zaporno pa je njen tok zanemarljivo majhen. Ko diodo krmilimo z impulzi pravokotne oblike, opazimo, da tok skozi diodo ne sledi popolnoma željeni obliki. Tok steče za kratek trenutek tudi v zaporno smer diode. Razlog je v nakopičenih elektrinah, ki so se v diodi nabrali med tem, ko je bila priključena v prevodni smeri.



Slika 3.10. Razmere pri preklopu iz prevodne v zaporno smer diode.

Ko se napetost generatorja nenadoma spremeni tako, da je dioda priključena v zaporno smer, se obrne tudi tok v zanki (slika 3.10). V trenutku preklopa je v n -tipu veliko vrzeli, v p -tipu pa veliko elektronov, ki so se tam nakopičili v času, ko je dioda prevajala. Ker ta presežek koncentracije iz prehodnega področja ne izgine takoj, teče tok v zaporno smer diode še nekaj časa. Proizvajalec daje naslednje podatke: čas kopičenja t_S , čas upadanja t_F ter vsoto obeh – čas preklopa t_{RR} (angl. reverse recovery time). Dioda, ki so posebej narejene za hitre preklopne čase, so SRD (angl. step-recovery-diodes).

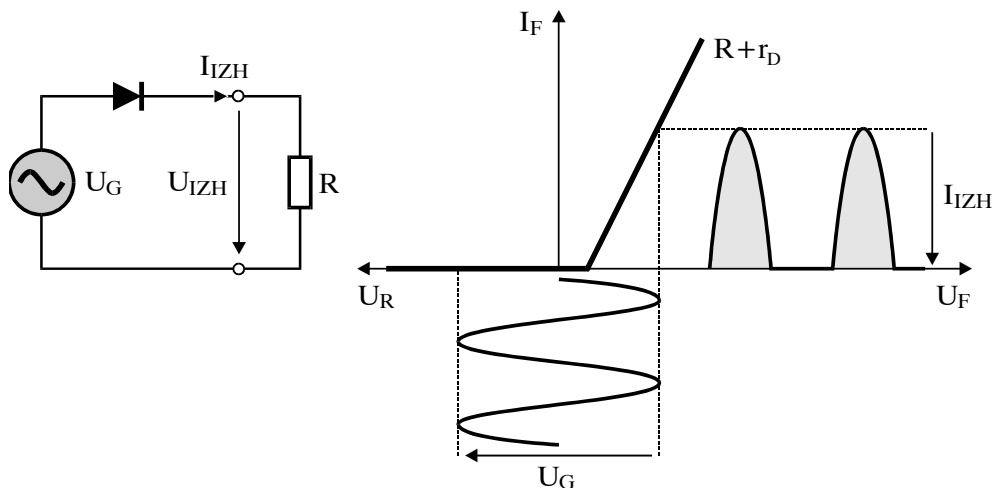
Dioda ima tako v zaporni kot tudi v prevodni smeri kapacitivnost, ki je v prevodni smeri neprimerno večja. Ko diodo preklapimo iz prevodne v zaporno smer, se zaradi nakopičenih elektrin ne zapre takoj.

Za konec še pregled nekaj karakterističnih parametrov diode:

U_{RRM}	največja trenutna ponovljiva zaporna napetost
U_{RSM}	največja trenutna neponovljiva zaporna napetost
U_{RWM}	največja trenutna periodična zaporna napetost pri sinusni obliki napetosti frekvence 50 ali 60 Hz
I_{FAV}	srednja vrednost najvišjega trajno dovoljenega toka v prevodni smeri
I_{FRMS}	največji trenutni ponovljiv tok v prevodni smeri
I_{FSM}	največji trenutni neponovljiv tok v prevodni smeri
T_J	maksimalna temperatura spoja
Θ_{JA}	termična upornost med spojem in ohišjem
t_{RR}	čas preklopa diode

3.3. USMERNIKI

Dioda je kot nalašč za usmerniška vezja, saj je njena poglavitna lastnost, da prevaja električni tok samo v eno smer. Usmerniško vezje pretvarja izmenični tok (angl. alternate current, AC) v enosmernega (angl. direct current, DC).



Slika 3.12. Polvalni usmernik z diodo.

Diodam, ki so narejene za usmernike, pravimo **usmerniške diode**. Pri usmerniku na sliki 3.12 teče v pozitivni polperiodi tok skozi diodo in breme R . Dioda ima v prevodni smeri zelo majhno upornost, zato največkrat upoštevamo samo upornost bremena. Dioda bo začela prevajati pri napetosti, ki je višja od napetosti kolena. Pri silicijevi diodi znaša kolenska napetost okrog 0,7V.

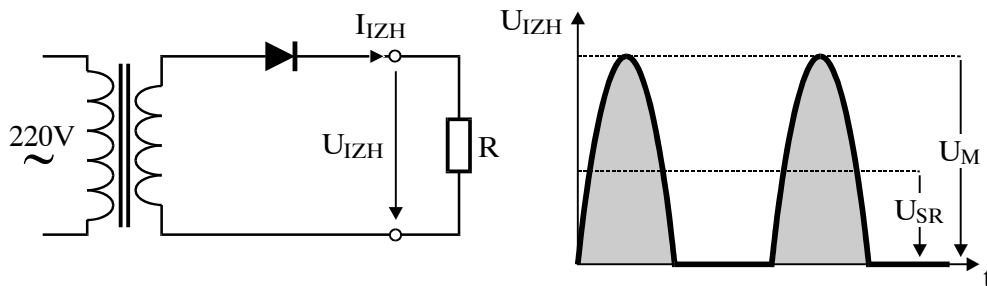
V negativni polperiodi dioda ne prevaja, tok skozi njo je zanemarljivo majhen. Oblika toka skozi porabnik je zato enaka samo pozitivni polovici sinusne napetosti na vходу vezja.

Ker usmernik prevaja samo v pozitivni polperiodi, mu pravimo **polvalni usmernik**. Poznamo pa tudi usmernike, ki usmerijo obe polperiodi. Tem pravimo **polnovalni usmerniki**.

3.3.1. Polvalni usmernik

Ker dioda prepušča tok samo v pozitivni polperiodi, smo izmenični tok na izhodu usmerili. Toda enosmerni tok iz usmernika ni enakomeren, temveč močno utripa, zato tak način usmerjanja ni posebno uporaben.

V pozitivni polperiodi steče električni tok iz transformatorja skozi diodo in breme. Na bremenu ustvari padec napetosti v obliki sinusne polperiode. V negativni polperiodi dioda ne prevaja, zato toka v breme ni. Vsa napetost transformatorja je sedaj na diodi v zaporni smeri.



Slika 3.13. Polvalno usmerniško vezje s porabnikom.

Pri izmeničnih signalih imamo največkrat podatke o efektivnih vrednostih napetosti in toka (angl. root-mean-square, RMS), predvsem to velja pri omrežni napetosti.

Efektivna vrednost napetosti in toka izhajata iz opravljenega dela: efektivna vrednost izmeničnega toka je tista velikost enosmernega toka, ki bi dal pri enakih pogojih in v enakem času enako toploto. Za signal sinusne oblike velja:

$$U_{EF} = \frac{U_M}{\sqrt{2}} \text{ efektivna vrednost napetosti, kjer je } U_M \text{ temenska napetost.}$$

$$I_{EF} = \frac{I_M}{\sqrt{2}} \text{ efektivna vrednost toka, kjer je } I_M \text{ temenski tok.}$$

Pri usmerjenem toku pa nas zanima predvsem srednja vrednost napetosti in toka (angl. average). To je povprečna vrednost napetosti in toka v nekem časovnem intervalu. Tako je srednja vrednost sinusnega signala v eni periodi enaka nič, srednja vrednost enosmernega konstantnega signala pa enaka enosmerni vrednosti. Pri polvalnem usmerjenem signalu je srednja vrednost enaka:

$$U_{SR} = \frac{U_M}{\pi} \text{ srednja vrednost napetosti, kjer je } U_M \text{ temenska napetost.}$$

$$I_{SR} = \frac{I_M}{\pi} \text{ srednja vrednost toka, kjer je } I_M \text{ temenski tok.}$$

Pri nižjih napetostih je srednja napetost na izhodu nekoliko nižja od izračunane. Upoštevati moramo namreč tudi padec napetosti na diodi, ki znaša za silicijevo diodo okrog 0,7V.

Diode za usmernik izbiramo s pomočjo katalogov, kjer najdemo podatke o njihovi vzdržljivosti. Zato moramo pri načrtovanju usmernika upoštevati vse tokove in napetosti, ki jih bodo morale diode prenesti. Te so predvsem:

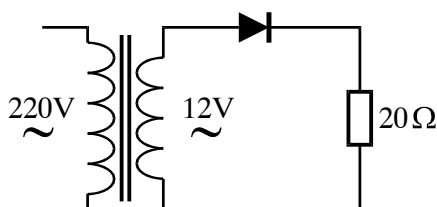
1. V prevodni smeri morajo prenesti tako srednji I_{FAV} kot maksimalni ali temenski tok I_{FRMS} . Ta tok teče tudi skozi porabnik, zato ga ni težko izračunati.
2. Dioda v zaporni smeri ne prevaja, zato mora prenesti vso napetost transformatorja. Pri previsokih zapornih napetostih se v zaporni plasti diode sproži plazovita ionizacija. Če se to zgodi, steče skozi diodo velik tok, ki jo uniči. Največjo zaporno napetost U_{RM} , ki jo mora dioda prenesti, izračunamo iz temenske napetosti negativne polperiode:

$$U_{RM} = U_{EF} \cdot \sqrt{2} < U_{RRM}$$

3. Električna moč, ki se troši na diodi, povzroči njeno segrevanje. Ko je potrošnja moči na diodi prevelika, se zaradi visoke temperature dioda uniči. To moč izračunamo kot produkt srednjega toka in padca napetosti na diodi v prevodni smeri:

$$P_D = U_D \cdot I_D \approx 0,7V \cdot I_D$$

Primer



Izračunajmo enosmerno napetost in tok skozi breme polvalnega usmernika! Kolikšno zaporno napetost mora vzdržati dioda?

Temensko napetost, ki jo potrebujemo za izračun srednje vrednosti, dobimo iz efektivne:

$$U_M = U_{EF} \cdot \sqrt{2} = 12V \cdot 1,41 = \underline{16,97V}$$

Oblika napetosti na bremenu je polvalna, zato jo izračunamo po enačbi:

$$U_{SR} = \frac{U_M}{\pi} = \frac{16,97V}{\pi} = \underline{5,4V}$$

Električni tok pa izračunamo iz napetosti na bremenu:

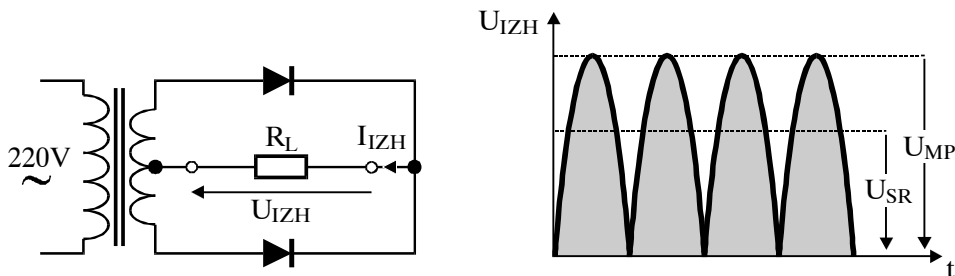
$$I_{SR} = \frac{U_{SR}}{R_B} = \frac{5,4V}{20\Omega} = \underline{0,27A}$$

Dioda mora v zaporni smeri zdržati temensko napetost transformatorja:

$$U_{RM} = U_M = \underline{16,97V}$$

3.3.2. Polnovalni usmernik s sredinskim odcepom

Boljši od polvalnih usmernikov so polnovalni usmerniki. Ker usmerijo obe polperiodi izmeničnega signala, imajo boljši izkoristek in povzročajo manjše utripanje toka skozi breme. Kot prvega bomo spoznali usmernik s sredinskim odcepom transformatorja.



Slika 3.14. Polnovalni usmernik s sredinskim odcepom.

Delovanje usmernika si oglejmo najprej v eni, nato še v drugi polperiodi! V času pozitivne polperiode izmeničnega signala steče tok I_1 skozi diodo D_1 , breme R_L in sredinski odcep nazaj v transformator. Ker je na diodi D_2 zaporna napetost, ta ne prevaja, zato skozi njo in spodnjo polovico navitja transformatorja tok ne teče. Tok teče samo skozi zgornjo polovico navitja. V času negativne polperiode steče tok I_2 skozi diodo D_2 , breme R_L in sredinski odcep nazaj v transformator. Zaporna napetost na diodi D_1 sedaj prepreči, da bi tok tekkel tudi skozi zgornjo polovico navitja.

Skozi breme teče tok v obeh polperiodah vedno v isto smer. Srednja vrednost napetosti na bremenu U_{SR} je ravno dvakrat večja kot pri polnovalnem usmerniku in znaša:

$$U_{SR} = 2 \cdot \frac{U_{MP}}{\pi} \quad \text{srednja vrednost napetosti}$$

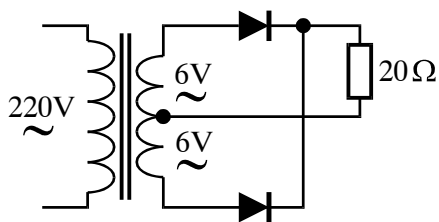
$$I_{SR} = 2 \cdot \frac{I_{MP}}{\pi} \quad \text{srednja vrednost toka}$$

Temensko vrednost napetosti U_{MP} in toka I_{MP} upoštevamo le za polovico navitja transformatorja, saj v vsaki polperiodi teče tok le skozi polovico celotnega navitja!

Če upoštevamo tokovno zanko – transformator, dioda D_1 in dioda D_2 –, velja, da je vsota vseh padcev napetosti v zanki enaka nič (drugi Kirchhoffov zakon). Ker pa je ena od diod prevodna, pomeni, da mora druga dioda prenesti celotno zaporno napetost transformatorja, ne pa polovice:

$$U_{RM} = U_M = U_{EF} \cdot \sqrt{2} \quad \text{zaporna napetost diode}$$

Frekvenca izhodnega signala je ravno dvakrat večja od frekvence vhodnega signala. Pri omrežni frekvenci 50Hz je na izhodu signal frekvence 100Hz.

Primer

Izračunajmo enosmerno napetost in tok na bremenu polnovalnega usmernika s sredinskim odcepom, če transformator pretvori 220V na $2 \times 6V$! Kolikšno zaporno napetost morata vzdržati diodi?

Najprej izračunajmo temensko vrednost napetosti polovice navitja:

$$U_{MP} = U_{EF} \cdot \sqrt{2} = 6V \cdot \sqrt{2} = 8,485V$$

Sedaj lahko izračunamo še enosmerno napetost in tok na bremenu:

$$U_{SR} = 2 \cdot \frac{U_{MP}}{\pi} = 2 \cdot \frac{8,485V}{\pi} = \underline{5,4V}$$

$$I_{SR} = \frac{U_{SR}}{R_B} = \frac{5,4V}{20\Omega} = \underline{270mA}$$

Največja zaporna napetost, ki jo morata diodi vzdržati, je enaka temenski vrednosti napetosti celotnega navitja:

$$U_{RM} = 2 \cdot U_{MP} = \underline{16,97V}$$

Primer

Kolikšno napetost mora imeti sekundarno navitje transformatorja s sredinskim odcepom, da bo na izhodu polnovalnega usmernika napetost $U_{SR} = 12V$?

Izračun začnemo tako, da najprej izračunamo potrebno temensko vrednost napetosti polovice navitja transformatorja:

$$U_{MP} = U_{SR} \cdot \frac{\pi}{2} = 12V \cdot \frac{\pi}{2} = 18,85V$$

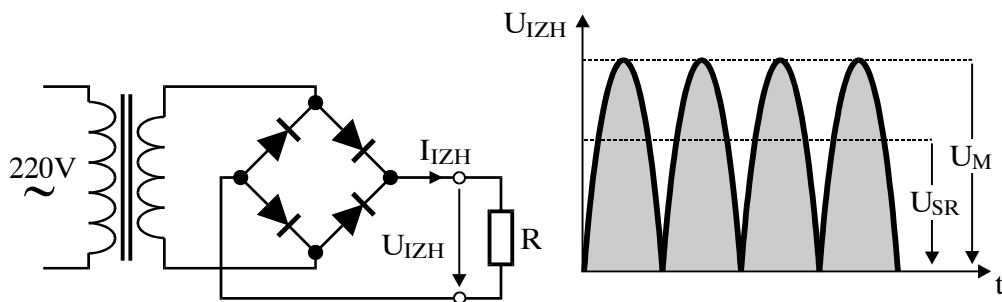
Nato izračunamo še efektivno vrednost napetosti na polovici navitja transformatorja:

$$U_{EF} = \frac{U_{MP}}{\sqrt{2}} = \frac{18,85\text{V}}{\sqrt{2}} = \underline{13,3\text{V}}$$

Transformator mora pretvoriti 220V na $2 \times 13,3\text{V}$ (skupaj 26,6V), diodi pa morata v zaporni smeri vzdržati napetost $2 \cdot U_{MP} = 37,7\text{V}$.

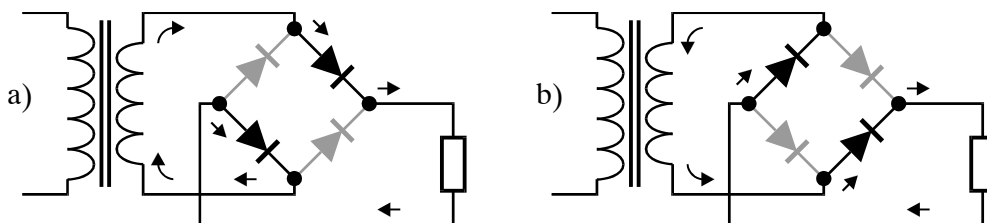
3.3.3. Mostični polnovalni usmernik

Z mostičnim polnovalnim usmernikom dosežemo polnovalno usmerjanje brez uporabe sredinskega odcepa na transformatorju. Sestavljen je iz štirih usmerniških diod, vezanih v mostiček (pravimo mu tudi Greatzov mostiček).



Slika 3.15. Mostični polnovalni usmernik.

Delovanje si spet oglejmo v posameznih polperiodah. V času pozitivne polperiode steče tok iz transformatorja skozi diodo D_1 , breme R in nazaj skozi diodo D_3 v transformator (slika 3.16 a). Na diodah D_2 in D_4 je zaporna napetost, zato ne prevajata. V času negativne polperiode pa steče tok iz transformatorja skozi diodo D_2 , breme R in nazaj skozi diodo D_4 v transformator (slika 3.16 b). Sedaj je zaporna napetost na diodah D_1 in D_3 , zato ne prevajata.



Slika 3.16. Prevajanje mostička v a) pozitivni in b) negativni polperiodi.

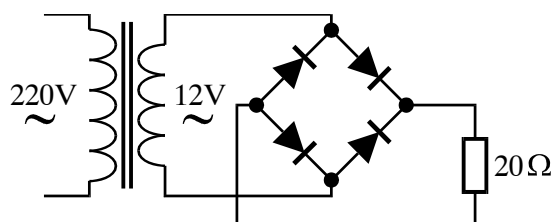
V vsaki polperiodi dve nasproti ležeči diode prevajata, ostali dve pa ne. Zato je padec napetosti na mostičku vedno enak dvema padcema napetosti na diodi (okrog 1,4V). Zaporna napetost, ki jo morajo diode prenesti, je enaka temenski napetosti na transformatorju. Srednji vrednosti napetosti in toka na izhodu sta enaki kot pri prejšnjem vezju, le da sedaj upoštevamo temensko vrednost napetosti in toka celotnega navitja transformatorja:

$$U_{SR} = 2 \cdot \frac{U_M}{\pi} \text{ srednja vrednost napetosti, kjer je } U_M \text{ temenska napetost.}$$

$$I_{SR} = 2 \cdot \frac{I_M}{\pi} \text{ srednja vrednost toka, kjer je } I_M \text{ temenski tok.}$$

Mostično vezje lahko sestavimo iz štirih diod, lahko pa ga dobimo že narejenega. Ta ima štiri sponke: dve z oznakami »~ ~« za vhod ter dve z oznakami »+ -« za izhod. Na ohišju je tudi oznaka, ki pomeni mejno vrednost napetosti in toka: npr. oznaka B80C4700/3300 pomeni, da je zaporna napetost lahko največ 80V, največji tok s hlajenjem 4700 mA, brez hlajenja pa 3300 mA.

Primer



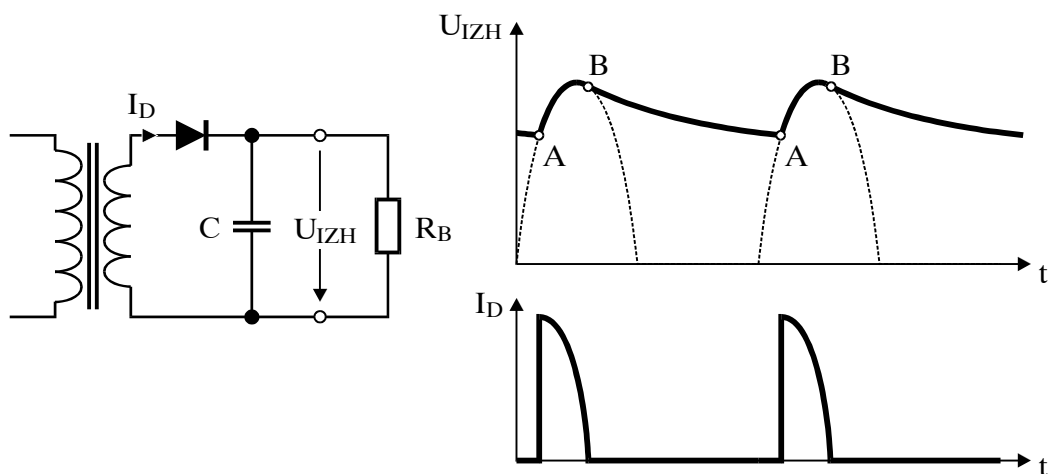
Izračunajmo napetost in tok na bremenu polnovalnega usmernika! Kolikšno zaporno napetost morajo zdržati diode?

$$U_M = U_{EF} \cdot \sqrt{2} = 12\text{V} \cdot \sqrt{2} = 16,97\text{V}$$

$$U_{SR} = 2 \cdot \frac{U_M}{\pi} = 2 \cdot \frac{16,97\text{V}}{\pi} = \underline{10,8\text{V}}$$

Dioda prevaja, ko je napetost na transformatorju višja od napetosti na kondenzatorju (od točke *A* do točke *B* na sliki 3.23). Tok, ki teče skozi diodo, nadaljuje pot skozi kondenzator in breme. V tem času se v kondenzatorju kopiči elektrina.

Ko pa napetost na transformatorju pade pod napetost na kondenzatorju, dioda ne prevaja več (od točke *B* do točke *A* na sliki 3.23). Elektrina, ki se je medtem nabrala na kondenzatorju, se sedaj prazni skozi breme. Zaradi kondenzatorja nihanje napetosti na bremenu ni več tako izrazito.



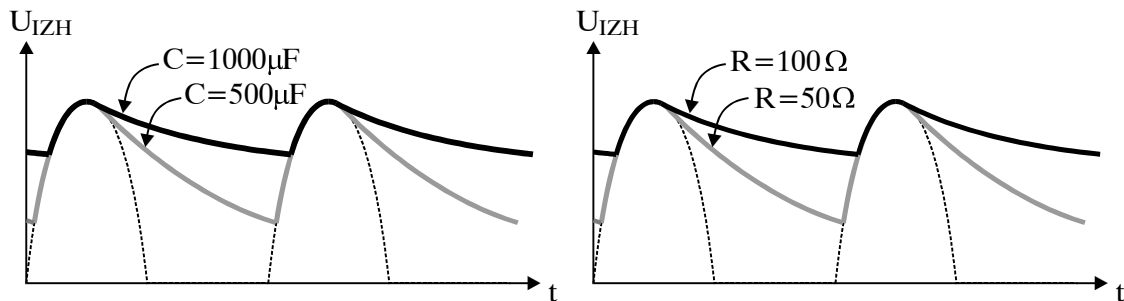
Slika 3.23. Glajenje napetosti s kondenzatorjem.

Kako hitro se kondenzator polni ali prazni, je odvisno od časovne konstante:

$$\tau = R \cdot C ,$$

kjer je R upornost, skozi katero se kondenzator C polni ali prazni. Velika časovna konstanta τ pomeni počasnejše praznjenje in manjše utripanje napetosti na bremenu. Majhna časovna konstanta τ pa pomeni hitro praznjenje kondenzatorja in večje utripanje napetosti na bremenu. Pri usmerniku na sliki 3.23 se kondenzator polni preko diode, prazni pa preko bremena. Ker je upornost diode r_D največkrat mnogo manjša od upornosti bremena, se kondenzator hitreje polni kot prazni. Hitrost praznjenja in s tem velikost utripanja izhodne napetosti je odvisna od produkta upornosti bremena in kapacitivnosti

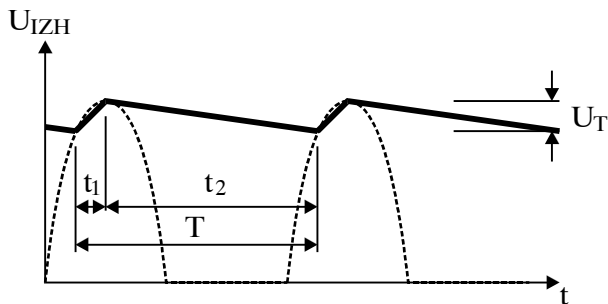
kondenzatorja. Pri večjih tokovih skozi breme (manjša upornost bremena) potrebujemo zato večjo kapacitivnost, če želimo imeti enako učinkovito glajenje kot pri manjših tokovih.



Slika 3.24. Vpliv kapacitivnosti in toka skozi breme na obliko napetosti.

Srednjo napetost na izhodu lahko izračunamo s pomočjo poenostavitve. Pri dovolj veliki kapacitivnosti kondenzatorja ($\omega RC \gg 1$) bomo eksponencialno padanje napetosti nadomestili s premico. Če je U_M temenska napetost, U_{Tizm} pa napetost od temena do temena (angl. peak-to-peak) izmenične komponente napetosti, lahko napišemo:

$$U_{SR} = U_M - \frac{U_{Tizm}}{2}$$



Slika 3.25. Poenostavitev pri izračunu napetosti.

Naj bo t_1 čas polnjenja, t_2 pa čas praznjenja kondenzatorja. V času t_2 bo kondenzator izgubil $I_{SR} \cdot t_2$ naboja, torej bo napetost nihanja:

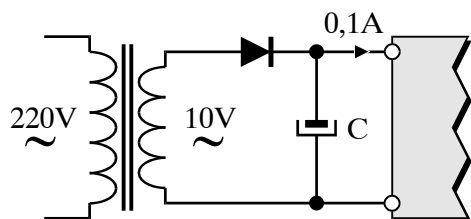
$$U_{Tizm} = \frac{I_{SR} \cdot t_2}{C}$$

Če je glajenje napetosti dovolj učinkovito, bo čas polnjenja t_1 zelo majhen, čas praznjenja t_2 pa se bo bližal času ene periode $t_2 = 1/f$ za polvalni usmernik ali času ene polperiode $t_2 = 1/2f$ za polnovalnega. Tako je:

$$U_{SR} = U_M - \frac{I_{SR}}{2 \cdot f \cdot C} \quad \text{za polvalni usmernik}$$

$$U_{SR} = U_M - \frac{I_{SR}}{4 \cdot f \cdot C} \quad \text{za polnovalni usmernik}$$

Primer



Izračunajmo kapacitivnost kondenzatorja C , da bo utripanje napetosti na izhodu U_T znašalo 2V. Napetost transformatorja je 10V, tok bremena 0,1A, omrežna frekvenca pa $f=50\text{Hz}$! Kolikšna je izhodna napetost U_{SR} ?

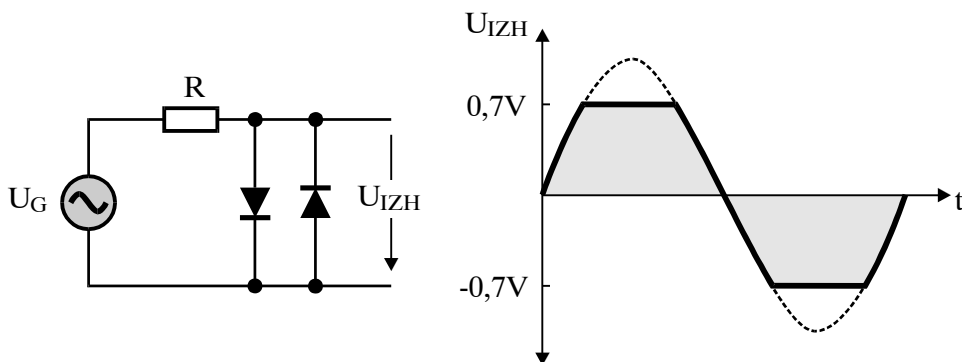
$$C = \frac{I_{SR}}{f \cdot U_T} = \frac{0,1\text{A}}{50\text{Hz} \cdot 2\text{V}} = 1000\mu\text{F}$$

$$U_M = U_{EF} \cdot \sqrt{2} = 10\text{V} \cdot \sqrt{2} = 14,14\text{V}$$

$$U_{SR} = U_M - \frac{U_T}{2} = 14,14\text{V} - \frac{2\text{V}}{2} = 13,14\text{V}$$

3.3.8. Dioda pri omejevanju napetosti

Zaradi napačne priključitve, inducirane napetosti v vodih ali električne spraznitve se lahko napetost na vhodu vezja nevarno poveča in uniči vezje. To lahko preprečimo z ustrezno vezavo diod, ki omeji napetosti na vhodu vezja. Na sliki 3.26 je enostavno vezje z diodama, ki začneta prevajati, brž ko vhodna napetost preseže napetost kolena diod. Prva začne prevajati, ko je na vhodu napetost večja od $+0,7\text{V}$, druga pa pri $-0,7\text{V}$. Upor služi zato, da ne bi s prevelikim prevodnim tokom uničili diod.



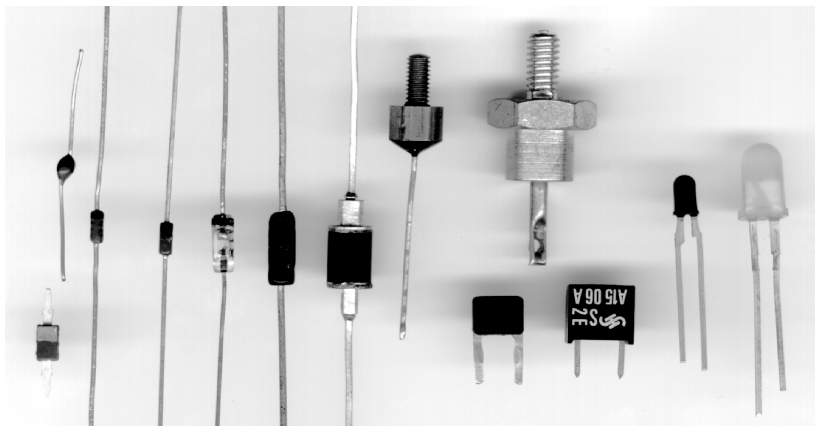
Slika 3.26. Preprosto omejevalno vezje z diodama.

Da bi omejili različne napetosti, moramo diodi spremeniti napetost, pri kateri prevaja. To naredimo s pomočjo napetostnega vira, ki ga vežemo zaporedno z diodo. Napetostni vir obrnemo tako, da se prišteje k napetosti kolena diode (pozitivni pol vira je priključen na katodo diode). Na sliki 3.27 a) je omejevalnik z diodo, kjer začne dioda prevajati šele, ko je vhodna napetost višja od napetosti vira in napetosti kolena diode: $4,3\text{V} + 0,7\text{V} = 5\text{V}$.

V tem primeru smo omejili samo pozitivno napetost. Navzdol omejimo napetost tako, da vežemo še eno diodo in napetostni vir v nasprotno smer. Na sliki 3.27 b) je vezje, ki omeji napetost na $+5\text{V}$ in -2V . Na sliki 3.27 c) pa je omejevalnik, ki ga pogosto srečamo na vhodu digitalnih vezij. Dioda D_1 začne prevajati, ko vhodna napetost preseže $+5,7\text{V}$, dioda D_2 pa pri $-0,7\text{V}$.

3.4. POSEBNE VRSTE DIOD

Poleg usmerniških diod poznamo še vrsto drugih diod, ki prav tako služijo najrazličnejšim namenom. Nekaj najpomembnejših bomo spoznali v naslednjih odstavkih.

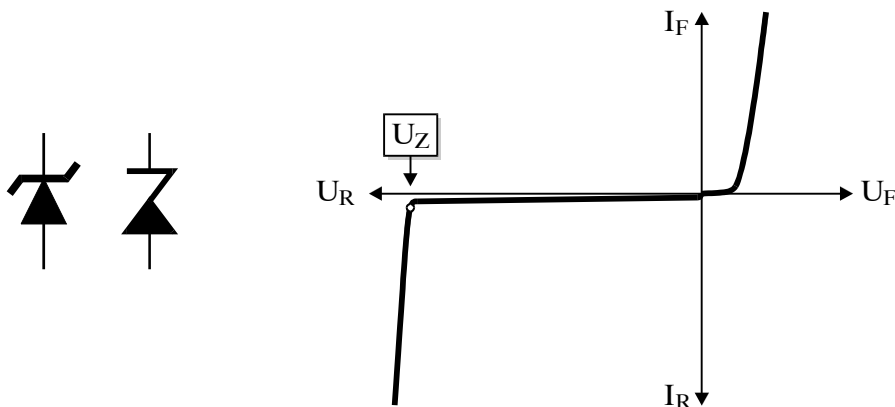


Slika 3.30.
Različne oblike
diod.

3.4.1. Prebojna dloda

Prebojne diode (ali tudi Z-diode oz. Zenerjeve diode) uporabljamo v zaporni smeri pri napetostih, ki presegajo prebojno napetost diode, kar je – v nasprotju z usmerniško diodo – tu dopustno. Prevodna karakteristika je podobna karakteristiki usmerniške silicijeve diode. Pri zaporni napetosti, ki je nižja od prebojne, teče majhen zaporni tok v vrednosti nekaj nA (nano amperov).

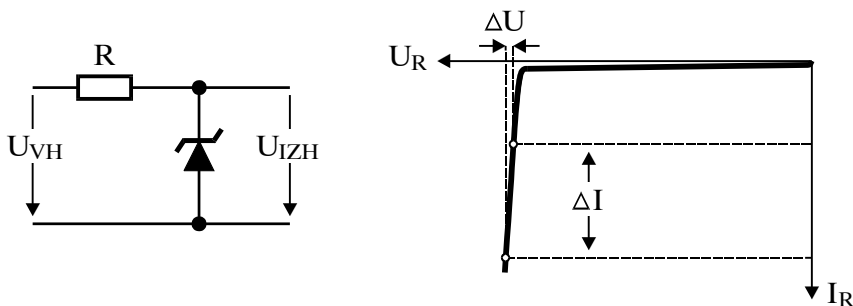
Ko pa prekoračimo zaporno napetost preboja (Z-napetost), začne zaporni tok strmo naraščati. Vsako dodatno povečanje zaporne napetosti povzroči strmo povečanje zapornega toka. Zaradi tega moramo tok ustrezno omejiti, saj je dopustni tok v zaporni smeri občutno nižji od dopustnega toka v prevodni smeri. Prebojne diode za napetosti do 5V, prevajajo v zaporno smer zaradi Zenerjevega efekta, nad to napetostjo pa zaradi plazovitega preboja. Prav zaradi prvega pojava so te diode dobile ime Zenerjeve diode (čeprav Zenerjev efekt velja samo za tiste do 5V). Prebojno napetost določijo pri izdelavi diode z ustreznim dopiranjem (dodajanjem primesi) in znaša nekje od 1,8V pa do 200V.



Slika 3.31. Simbola in karakteristika prebojne diode.

Dioda ima v področju Zenerjevega preboja negativni temperaturni koeficient, v področju plazovite ionizacije pa pozitivnega.

Prebojne diode najpogosteje uporabljamo za stabilizacijo napetosti – v zaporni smeri v področju, ki mu pravimo stabilizacijsko področje. Na sliki 3.32 je preprosto stabilizacijsko vezje z uporom in prebojno diodo. Ta deluje kot stabilizator le, če je napetost na diodi v stabilizacijskem področju. Zato mora biti vhodna napetost U_{VH} večja od prebojne napetosti diode U_Z . Ko vhodno napetost zvečamo, se strmo poveča tok skozi diodo (kar je razvidno že iz karakteristike, ki je v stabilizacijskem območju zelo strma). Zaradi tega se zveča tudi tok skozi upor R in padec napetosti U_R . Izhodna napetost pa le malo naraste.



Slika 3.32. Stabilizator napetosti s prebojno diodo.

Prebojno diodo najpogosteje uporabljamo za stabilizacijo napetosti, kjer izkoristimo strmo naraščanje toka v prebojnem področju diode.

Za koliko se izhodna napetost spremeni, če spremenimo napetost na vhodu, je odvisno predvsem od strmine krivulje diode v stabilizacijskem področju. Del območja lahko lineariziramo in podamo kot diferencialno upornost r_Z . Sedaj je sprememba izhodne napetosti podana z enačbo:

$$\frac{\Delta U_{IZH}}{\Delta U_{VH}} = \frac{r_Z}{R + r_Z} \cong \frac{r_Z}{R},$$

kjer je R zaporedno vezan upor. Pomembna podatka za doseženo stabilizacijo sta še gladilni faktor G ter faktor stabilizacije S :

$$G = \frac{\Delta U_{VH}}{\Delta U_{IZH}} = \frac{R}{r_Z} + 1$$

$$S = \frac{\frac{\Delta U_{VH}}{U_{VH}}}{\frac{\Delta U_{IZH}}{U_{IZH}}} = \left(\frac{R}{r_Z} + 1 \right) \cdot \frac{U_{IZH}}{U_{VH}}$$

Zaporedno vezani upor izberemo tako, da ne prekoračimo dopustne izgubne moči prebojne diode. Upornost mora biti v mejah:

$$\frac{U_{VH \max} - U_{IZH}}{I_{Z \max} + I_{IZH \min}} < R < \frac{U_{VH \min} - U_{IZH}}{I_{Z \min} + I_{IZH \max}},$$

kjer za najmanjši tok skozi diodo $I_{Z \min}$ vzamemo nekje od 5% do 10% maksimalnega $I_{Z \max}$.

Primer

Izračunajmo upornost zaporednega upora R tako, da prebojna dioda pri neobremenjenem vezju ne bo prekoračila dopustne izgubne moči, ki znaša $P_Z = 0,5 \text{ W}$ (slika 3.32)! Največja vhodna napetost znaša $U_{VH} = 15 \text{ V}$, napetost na izhodu pa $U_Z = 8 \text{ V}$.

Najprej izračunajmo, kolikšen je tok diode pri dopustni izgubni moči:

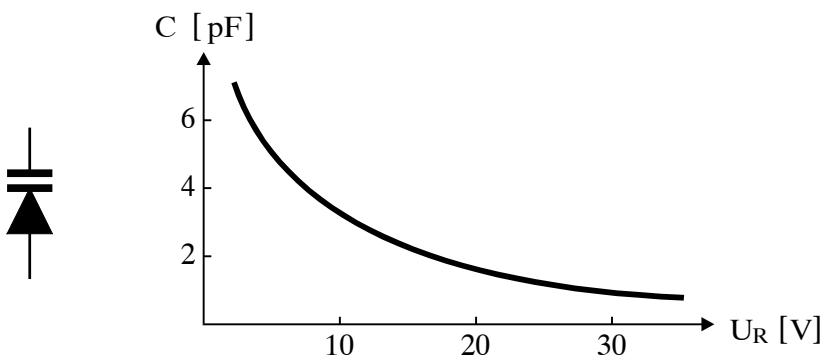
$$I_Z = \frac{P_Z}{U_Z} = \frac{0,5\text{W}}{8\text{V}} = 62,5\text{mA}$$

Sedaj lahko izračunamo upornost upora R :

$$R = \frac{U_R}{I_R} = \frac{U_{VH} - U_Z}{I_Z} = \frac{15\text{V} - 8\text{V}}{62,5\text{mA}} = \underline{112\Omega}$$

3.4.2. Kapacitivna (varicap) dioda

Dioda, ki jo priključimo v zaporno smer, se obnaša kot majhen kondenzator. Tej kapacitivnosti pravimo spojna kapacitivnost diode. V zaporni smeri deluje zaporna plast kot dielektrik, dobro prevodni p in n področji pa kot plošči majhnega kondenzatorja. Zaporna plast se z večanjem pritisnjene zaporne napetosti širi, podobno, kot če bi razmikali plošči kondenzatorja. Zaradi tega se spojna kapacitivnost z zaporno napetostjo manjša. Le-ta je odvisna od izvedbe diod in znaša nekje od 0,1 do 10pF (piko faradov).

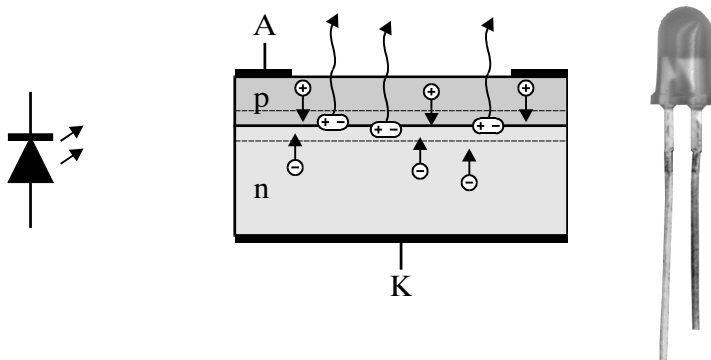


Slika 3.33. Simbol in potek kapacitivnosti z zaporno napetostjo kapacitivne diode.

Kapacitivno diodo uporabljamo povsod tam, kjer želimo z napetostjo spremenjati kapacitivnost v vezju, kot npr. v nihajnem krogu na sliki 3.34. Zaporedno vezani kondenzator C_S prepreči, da bi stekel tok skozi tuljavo zaradi napetosti U_{UGL} , s katero uglašujemo diodo. Da bi bil vpliv C_S čim manjši, mora imeti

3.4.6. Svetleča dioda (LED)

Svetleča dioda (angl. light emitting diode, LED) spreminja električno energijo v svetlobo. Ko diodo priključimo v prevodno smer, se presežki nabojev, ki prehajajo preko pn spoja, rekombinirajo. Pri rekombinaciji se prosti elektroni vračajo iz prevodnega zopet v valenčni pas in s tem oddajajo energijo. Valovna dolžina oddanega valovanja je odvisna od količine energije, ki se je sprostila pri rekombinaciji. Za valovanje v področju vidne svetlobe silicijev polprevodnik ni uporaben. Najpogosteje uporabljamo polprevodnike iz GaAs (infra-rdeče), GaAsP (med rdečo in rumeno) ter GaP (med rdečo in zeleno). Barva oddane svetlobe je odvisna od širine prepovedanega pasu (glej sliko 2.1.); čim širši je, tem višja je frekvenca (oz. krajša valovna dolžina oddane svetlobe).



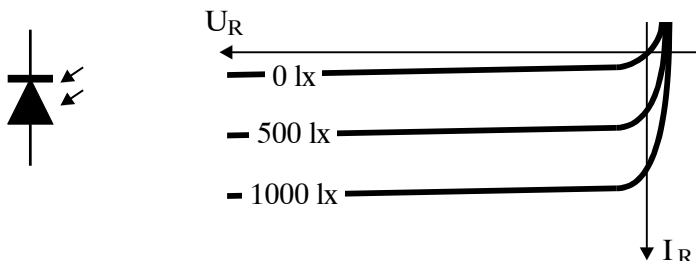
Slika 3.37. Svetleča dioda (LED).

Svetleče diode najpogosteje uporabljamo za kontrolne lučke, v numeričnih prikazovalnikih (angl. 7-segment display) ali pri optičnih spojnikih (angl. opto-coupler). Optični spojnik je vezje, sestavljeno iz svetleče diode in svetlobno občutljivega polprevodniškega elementa. Električni signal se pretvarja v svetlobnega in nazaj v električnega. Optični spojnik tako galvanjsko loči vhodne od izhodnih priključkov.

Svetleča dioda ali LED izkorišča oddajanje svetlobe, ki nastane zaradi rekombinaciji, ko je dioda priključena v prevodno smer. Uporabimo jo kot signalno lučko, v prikazovalnikih, optičnih spojnikih ter v komunikacijskih vezjih.

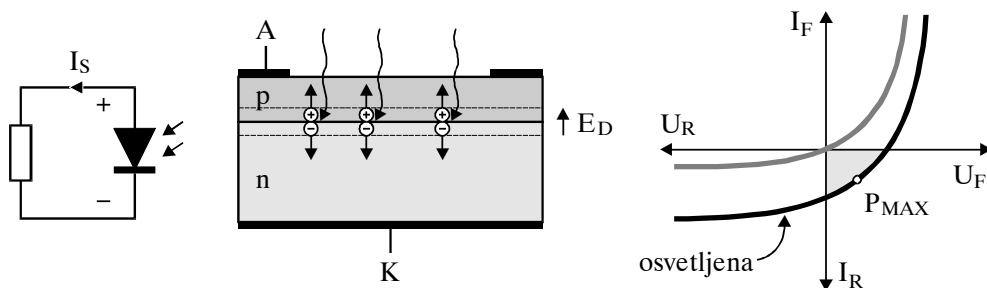
3.4.7. Fotodiode in sončna celica

Ko prehodno področje med p in n -tipom polprevodnika osvetlimo, dobijo mnogi elektroni dovolj energije, da preskočijo iz valenčnega v prevodni pas. Zaradi tega se ustvarijo proste elektrone, pari elektron-vrzel, ki v električnem polju stečejo vsak na svojo stran. Osvetlitev prehodnega področja ustvari majhen tok skozi to področje.



Slika 3.38. Simbol fotodiode in njena karakteristika v zaporni smeri.

Pri fotodiode se na zgoraj opisan način poveča zaporni tok. Najpogosteje je silicijeva, ima večjo površino pn spoja kot navadna dioda ter odprtino, skozi katero prehaja svetloba. Ojačevalne fotodiode (angl. avalanche photodiodes) izkoriščajo plazovito ionizacijo za ojačitev toka, ki ga povzroči svetloba. Pri dovolj veliki zaporni napetosti povzročijo elektrone, ki nastajajo zaradi svetlobe, plazovito ionizacijo; tok se v zaporni smeri diode naglo poveča.



Slika 3.39. Sončna celica ter njena karakteristika.

Podobno kot fotodiode deluje tudi sončna celica. Zaradi elekričnega polja, ki vlada v zaporni plasti, stečejo elektroni, ki se v tem področju odtrgajo iz valenčnih obel atomov, v n -tip. Prav tako stečejo nastale vrzeli v p -tip. To

povzroči negativen električni potencial na priključku n -tipa (katodi) in pozitiven na priključku p -tipa (anodi). Če na sončno celico priključimo breme, steče skozenj električni tok v smeri od anode h katodi diode.

Če si ogledamo karakteristiko osvetljene diode (na sliki 3.39), ugotovimo, da seže tudi v četrti kvadrant, kjer imamo opraviti s pozitivno prevodno napetostjo U_F ter negativnim zapornim tokom I_R . Njun produkt (električna moč) ima zato negativen predznak. To pomeni, da dioda v tem delu karakteristike proizvaja električno energijo. Sončna celica je narejena tako, da se njen pn spoj razprostira na celotni površini celice, ki je zelo velika in znaša nekje od 5 do 7,5 cm.

Če zaporno plast diode osvetlimo, se v njej tvorijo prosti elektroni in vrzeli, ki zaradi električnega polja stečejo vsak na svojo stran. Tako se v diodi z osvetlitvijo poveča zaporni tok.

3.4.8. Laserska dloda

Laserska svetloba je ozek snop svetlobe, ki je za razliko od sončne svetlobe monokromatska in koherentna: monokromatska pomeni, da so vsi fotoni enake valovne dolžine, koherentna pa to, da je elektromagnetno valovanje fotonov v fazi.

Oglejmo si, kako dobimo lasersko svetlobo. Upoštevati moramo tri pojave, ki potekajo med elektroni in fotoni:

1. **Absorpcija:** elektron se povzpne na višji energijski nivo s pomočjo energije fotona (slika 3.40 a).

$$\text{elektron} + \text{foton} = \text{vzbujen elektron}$$

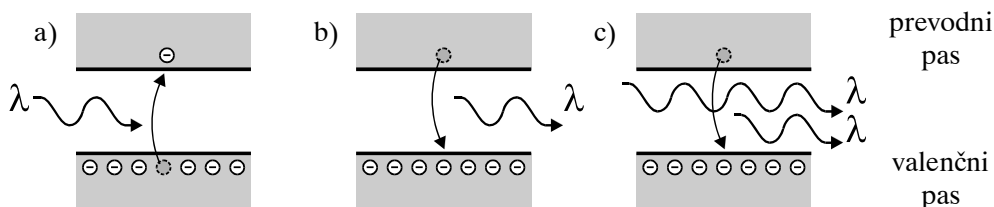
2. **Spontana emisija:** obraten proces; vzbujen elektron preide na nižji energijski nivo tako, da odda foton (slika 3.40 b).

$$\text{vzbujen elektron} = \text{elektron} + \text{foton}$$

3. **Stimulirana emisija:** foton vpliva na vzbujen elektron tako, da se ta povrne na nižji energijski nivo (slika 3.40 c).

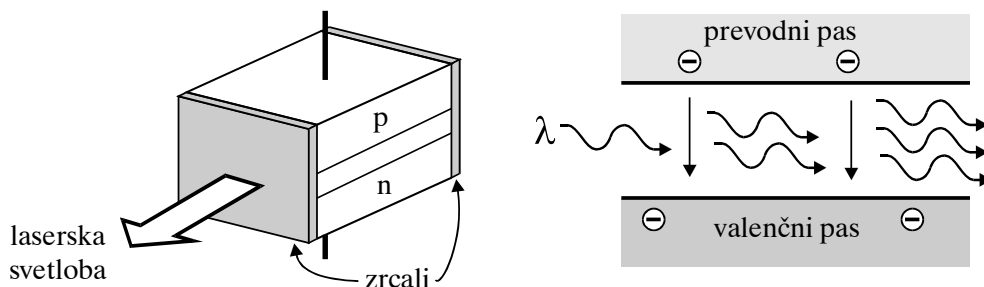
$$\text{vzbujen elektron} + \text{foton} = \text{elektron} + \text{foton} + \text{foton}$$

Oba fotona stimulirane emisije sta koherentna, torej je njuno elektromagnetno valovanje v fazi. Pogoji za tvorbo laserske svetlobe je med drugim veliko število vzbujenih elektronov, ki povzročijo stimulirano emisijo. Ko vzbujeni atom absorbira foton, odda dva fotona, ki sta v fazi. Ta zadena druga dva vzbujena atoma, ki spet oddata vsak po dva fotona, itd.



Slika 3.40. Potek a) absorpcije, b) spontane emisije in c) stimulirane emisije.

Omenjeni pojav je mogoče doseči v prevodno priključenem *pn* spoju (podobno kot pri svetleči diodi), ki mora imeti visoko koncentracijo primesi v *p* in *n*-tipu polprevodnika. Stranici diode sta natančno polirani, tako da se od njiju svetloba odbija. Prehodno področje diode je torej narejeno kot optični resonator, odbita svetloba pa povzroča stimulirano emisijo. Na tisti strani, kjer ima polirana stranica slabšo odbojnost, se del fotonov odbije nazaj v spoj in povzroča nadaljnjo stimulirano emisijo, drugi del pa uide v obliki laserske svetlobe.



Slika 3.41. Laserska dioda.

VPRAŠANJA

1. Zakaj dioda v zaporni smeri ne prevaja električnega toka? Kaj je tok nasičenja diode?
2. Kaj je napetost kolena? Zakaj dioda v prevodni smeri prevaja šele pri določeni napetosti? Kolikšna je ta napetost za silicij in germanij?
3. Kaj je plazovita ionizacija? Ali diode prebijejo še na kakšen drug način?
4. Kaj je spojna kapacitivnost in od česa je odvisna?
5. Zakaj nastane difuzijska kapacitivnost pri diodi in kakšen je njen vpliv na preklopne lastnosti diod?
6. Kako deluje mostični polnovalni usmernik?
7. Koliko diod in kondenzatorjev mora imeti kaskadni usmernik, če želimo imeti 8-krat višjo napetost?
8. Kje srečamo Delonovo vezje?
9. Zakaj vežemo več diod zaporedno, kakšna je slabost take vezave in kako jo odpravimo?
10. Zakaj vežemo več diod vzporedno, kakšna je slabost take vezave in kako jo odpravimo?
11. Kaj označuje pojem »valovitost« pri usmernikih? Kako jo najlažje zmanjšamo?
12. Kaj se zgodi z napetostjo na bremenu usmernika, če zvečamo kapacitivnost kondenzatorja, ki služi za glajenje?
13. Kako lahko uporabimo diodo kot analogno stikalo?
14. V kakšen namen najpogosteje uporabljamo prebojno diodo?
15. Kako spreminjamo kapacitivnost pri kapacitivni diodi?
16. Kje uporabimo PIN diode?
17. Kakšna je značilnost tunelske diode? Kje jo zato lahko uporabimo?
18. Kako se imenuje dioda, ki je izdelana iz spoja med kovino in polprevodnikom? Kakšna je njena lastnost?
19. Zaradi česa svetleča dioda sveti?
20. Kako sončna celica pretvarja energijo v električno?
21. Kaj je stimulirana emisija in kje jo lahko uporabimo?

NALOGE

1. Kolikšna je lahko največja izgubna moč na silicijevi diodi in kolikšen je prevodni tok, če je delovna temperatura 30°C ? Totalna toplotna upornost znaša 100°C/W , največja dopustna temperatura polprevodniškega spoja pa je 150°C . (Odg.: $1,2\text{W}$, $1,7\text{A}$)
2. Kolikšno napetost mora imeti sekundar transformatorja, da bo na izhodu mostičnega usmernika 10V ? (Odg.: $11,1\text{V}$)
3. Kolikšna je napetost na izhodu mostičnega usmernika s kondenzatorjem za glajenje napetosti $C=500\mu\text{F}$ a) brez bremena ter b) z bremenom $R=100\Omega$? Kolikšna je temenska vrednost izmenične komponente napetosti v drugem primeru? Napetost na sekundarju transformatorja znaša 10V . (Odg.: $14,14\text{V}$, $12,85\text{V}$, $2,57\text{V}$)
4. Nariši omejevalno vezje z diodami, ki naj omeji vhodno napetost na $+3\text{V}$ in -1V !
5. Izračunaj zaporedno vezani upor pri stabilizatorju napetosti s prebojno diodo, da pri najvišji vhodni napetosti $U_{\text{VH}}=20\text{V}$ dioda ne prekorači dovoljene izgubne moči $P_D=0,25\text{W}$! Napetost na izhodu je $U_{\text{IZH}}=9\text{V}$, tok porabnika pa niha od 10 do 50mA . (Odg.: 291Ω)

BIPOLARNI TRANZISTOR

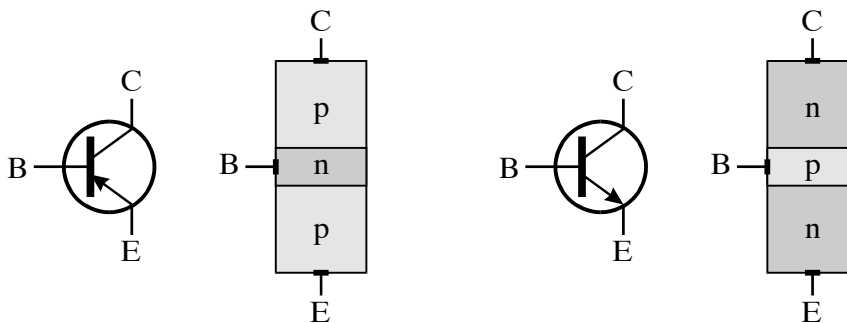
Bipolarni tranzistor, ki sta ga leta 1947 odkrila ameriška fizika Bardeen in Brattain, je zgrajen iz dveh pn spojev. Ugotovila sta, da je tok skozi prvi pn spoj, ki je priključen v zaporni smeri, odvisen od toka skozi drugi spoj, ki je priključen v prevodno smer. Tako je nastal polprevodniški element, ki služi za ojačenje signalov.



4.1. SIMBOL IN ZGRADBA

Bipolarni tranzistor dobimo z združitvijo treh plasti polprevodnika. Kombiniramo jih lahko na dva načina: *pnp* ter *nnp*, zato tudi tranzistorje delimo na ta dva tipa.

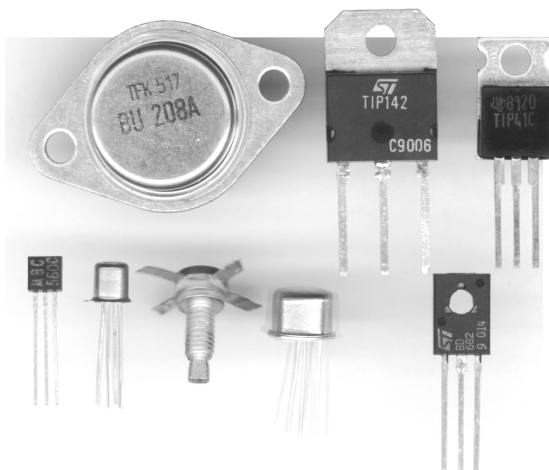
Na vsako polprevodniško plast je pritrjen po en priključek. Imenujejo se emitor (E), baza (B) in kolektor (C). V simbolu za tranzistor ima emitor obliko puščice, po njeni smeri lahko ugotovimo tip tranzistorja. Če kaže puščica navznoter, je tranzistor *pnp*, če pa kaže puščica navzven, potem je tranzistor *nnp*.



Slika 4.1. Bipolarna tranzistorja: *pn*p in *np*n.

Bipolarni tranzistor nam služi najpogosteje kot ojačevalnik ali kot stikalo. V prvem primeru je sposoben ojačati majhne spremembe toka na vhodu, zato tudi pravimo, da je to aktivni element. Kot stikalo ga najpogosteje najdemo v digitalni tehniki, kjer od njega zahtevamo, da se glede na vhodni signal čim hitreje odpre ali pa zapre.

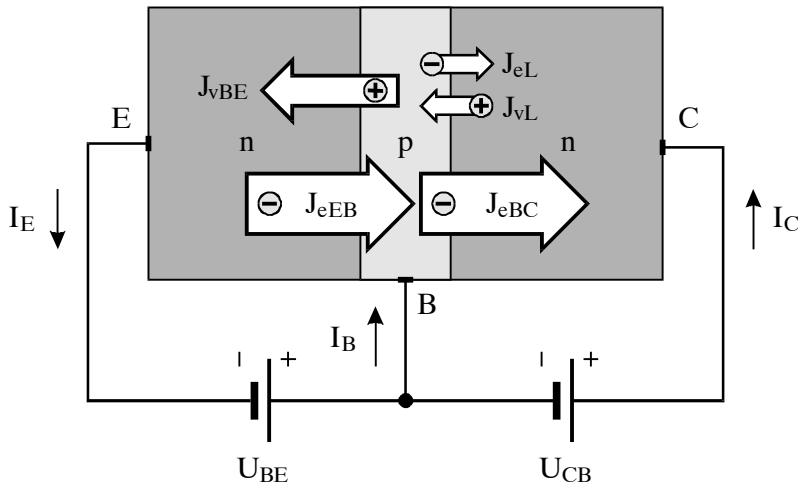
Tranzistor je izdelan na ploščici polprevodnika, ki je pritrjena v plastičnem ali kovinskem ohišju, iz njega pa molijo tri sponke. Ohišje je pri močnejših tranzistorjih oblikovano tako, da lahko nanj pritrdimo hladilni element, ki preprečuje pregrevanje tranzistorja. Če je na ploščici polprevodnika združenih več tranzistorjev in je ploščica zaptra v eno ohišje, takemu vezju pravimo integrirano vezje.



Slika 4.2. Raznolike oblike bipolarnega tranzistorja.

4.2. DELOVANJE BIPOLARNEGA TRANZISTORJA

Tranzistor vsebuje dva *pn* spoja, ki ju lahko priključimo v prevodni ali v zaporni smeri. Prvi spoj je med emitorjem in bazo, imenujemo ga emitorski spoj, drugi pa med kolektorjem in bazo – kolektorski spoj. Tranzistor deluje v tako imenovanem aktivnem področju le, če je emitorski spoj priključen v prevodni smeri, kolektorski pa v zaporni smeri. Na sliki 4.3 si oglejmo tokove, ki tečejo zaradi napetostnih virov U_{BE} in U_{CB} .



Slika 4.3. Tokovi v npn bipolarnem tranzistorju.

Ko na emitorski spoj priključimo napetost U_{BE} v prevodni smeri, začnejo elektroni iz emitorja prehajati v bazo (J_{eEB}), vrzeli pa iz baze v emitor (J_{vBE}). Skozi emitorski spoj steče emitorski tok I_E . Pri izdelavi tranzistorja so primesi v polprevodniških plasteh dodane tako, da je število elektronov, ki prehaja iz emitorja v bazo, neprimerno večje od števila vrzeli v bazi. Zaradi tega nastane v bazi višek elektronov, ki pa, ko bomo videli, ne zaključijo svoje poti skozi bazo.

Med kolektorjem in bazo je zaporna napetost U_{CB} , ki prepreči, da bi elektroni iz kolektorja stekli v bazo, vrzeli pa iz baze v kolektor. Kolektor je na pozitivnejšem električnem potencialu kot baza, zato privlači elektrone, ki so prišli iz emitorja v področje baze in so tu manjšinski nosilci elektrine.

Ko je emitorski spoj prevodno polariziran, priteka v bazo iz emitorja veliko število elektronov. Zaradi zaporne napetosti med kolektorjem in bazo U_{CB} pa

stečejo v kolektor in povzročijo kolektorski tok I_C (J_{eBC}). To je mogoče le, če je baza zelo tanka. V nasprotnem primeru bi se večina elektronov rekombinirala (zapolnila vrzeli) vzdolž baze. Nekaj elektronov, ki jih emitor emitira v bazo, sicer zaključi pot v bazi z rekombinacijo in tvori bazni tok I_B , a večino jih pritegne kolektor. Opis velja za *npn* tranzistor; v *pnp* tranzistorju potujejo od emitorja h kolektorju vrzeli, napetostna vira pa morata biti obrnjena v nasprotno smer.

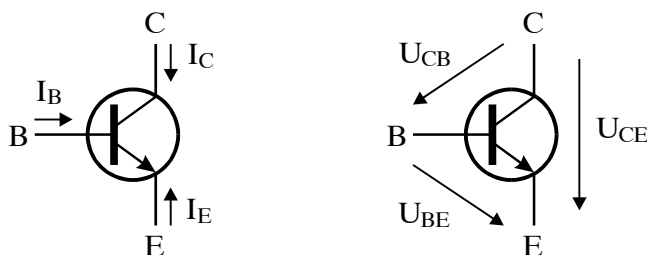
Bipolarni tranzistor dela v aktivnem področju tako, da je spoj med emitorjem in bazo priključen v prevodno smer, spoj med bazo in kolektorjem pa v zaporno smer. Tedaj elektrine, ki stečejo zaradi prevodne napetosti iz emitorja v bazo, nadaljujejo pot v kolektor, ker jih privleče zaporno priključena napetost kolektorskega spoja.

4.2.1. Analiza tokov v tranzistorju

Zaradi prevodne napetosti na emitorskem spoju U_{BE} steče emitorski tok I_E . Število elektrin, ki jih emitor pošilja v bazo, je odvisno od napetosti U_{BE} . Pri *npn* tranzistorju so potujoče elektrine elektroni, pri *pnp* pa vrzeli.

Zaporna napetost U_{CB} med kolektorjem in bazo povzroči, da elektrine, ki prihajajo iz emitorja v bazo, stečejo v kolektor in tvorijo kolektorski tok I_C . Zaradi spremembe napetosti U_{CB} se tokovi le malo spremenijo.

Koliko elektrin se med potjo v bazi rekombinira in tvori bazni tok I_B , je odvisno predvsem od širine baze. Čim širša je baza, večji je bazni tok I_B in manjši je kolektorski tok I_C . Pri dovolj široki bazi kolektorski tok ne bi več tekel in tranzistor bi deloval le še kot dva ločena *pn* spoja (ali dve diodi).



Slika 4.4. Označbe tokov in napetosti na tranzistorju.

Med kolektorjem in bazo se pretakajo še manjšinski nosilci elektrin ter pari elektronov in vrzeli, ki nastajajo v baznem prehodnem področju (J_{eL} in J_{vL} na sliki 4.3). Ker je ta tok majhen, ga bomo na začetku zanemarili.

Pomeni:	U_{BE}	napetost med bazo in emitorjem
	U_{CB}	napetost med kolektorjem in bazo
	U_{CE}	napetost med kolektorjem in emitorjem
	I_B	bazni tok
	I_C	kolektorski tok
	I_E	emitorski tok

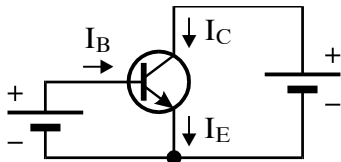
Kolektorski tok I_C je nekoliko manjši od emitorskega I_E ($I_C = I_E - I_B$). Razmerje med I_C in I_E podaja faktor, ki mu pravimo tokovno ojačenje:

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} \text{ kratkostični tokovni ojačevalni faktor}$$

Ker tranzistor najpogosteje uporabimo tako, da je vhod na bazi, izhod pa na kolektorju, določimo ojačevalni faktor med kolektorskim in baznim tokom:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \text{ kratkostični tokovni ojačevalni faktor}$$

Oba faktorja sta kratkostična zato, ker veljata, ko je izhod kratkostičen (upornost bremena je 0). Kolektorski tok je skoraj enak emitorskemu, zato ima faktor ojačenja α vrednost blizu 1 (okrog 0,99) in je vedno manjši od 1. Ker je bazni tok majhen, je faktor ojačenja β mnogo večji od 1 (tipično 100). Če je vhodni priključek baza, izhodni pa kolektor, ima ojačevalec s tranzistorjem veliko tokovno ojačenje. Faktor tokovnega ojačenja β se od tranzistorja do tranzistorja močno razlikuje, tudi pri tranzistorjih istega tipa, ker je odvisen od tehnoloških izvedb tranzistorja. Zaradi fizikalnih dogajanj v bazi je β nekoliko odvisen tudi od velikosti kolektorskega toka.

Prvi primer

Izračunajmo tokova I_C , I_B ter β , če sta $I_E = 10\text{mA}$ in $\alpha = 0,99$!

$$I_C = \alpha \cdot I_E = 0,99 \cdot 10\text{mA} = \underline{9,9\text{mA}}$$

$$I_B = I_E - I_C = 10\text{mA} - 9,9\text{mA} = 0,1\text{mA} = \underline{100\mu\text{A}}$$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{9,9\text{mA}}{0,1\text{mA}} = \underline{99}$$

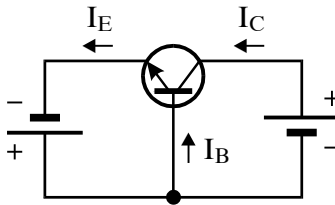
Drugi primer

Izračunajmo tok I_B ter faktorja α in β , če sta tokova $I_C = 15\text{mA}$ in $I_E = 15,2\text{mA}$!

$$I_B = I_E - I_C = 15,2\text{mA} - 15\text{mA} = \underline{0,2\text{mA}}$$

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} = \frac{15\text{mA}}{15,2\text{mA}} = \underline{0,9868}$$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{15\text{mA}}{0,2\text{mA}} = \underline{75}$$

Tretji primer

Izračunajmo tokova I_C in I_E ter faktor β , če je tranzistor priključen tako, kot kaže slika! Bazni tok $I_B = 0,1\text{mA}$, $\alpha = 0,988$.

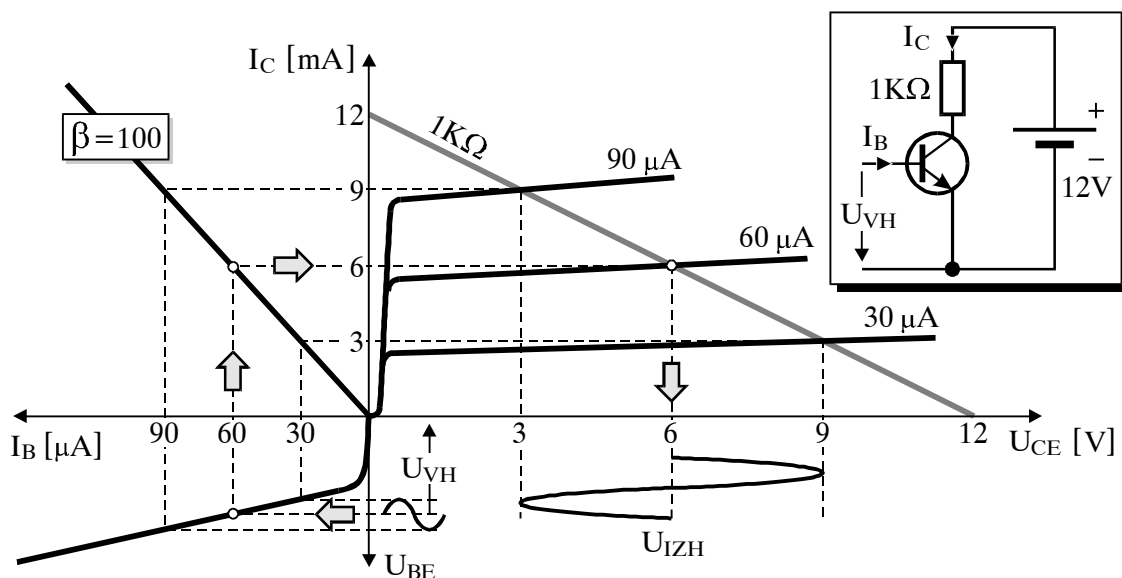
$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = \frac{0,988}{1 - 0,988} = \underline{82,33}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B = 82,33 \cdot 0,1\text{mA} = \underline{8,233\text{mA}}$$

$$I_E = I_C + I_B = 8,233\text{mA} + 0,1\text{mA} = \underline{8,333\text{mA}}$$

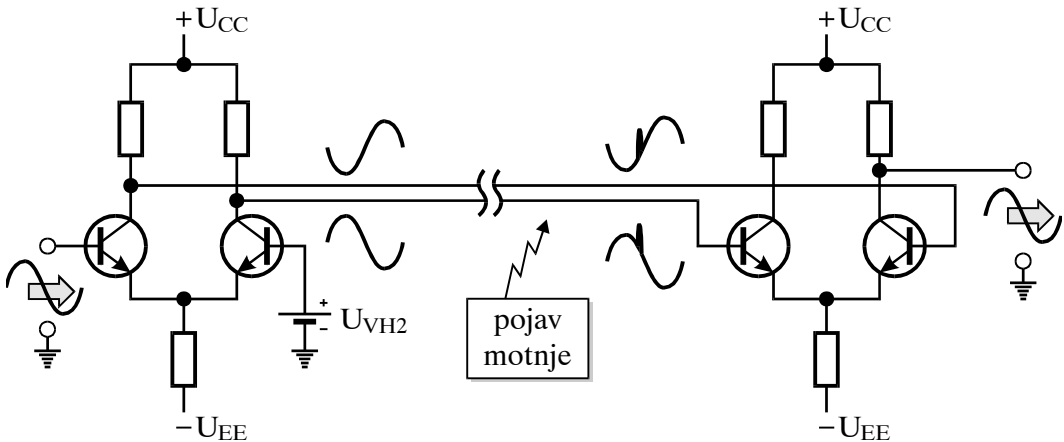
delovno točko tranzistorja: enosmeren vhodni tok bo povzročil, da bo spoj baza-emitor vedno prevoden in tudi majhne spremembe vhodnega signala bodo povzročile nihanje vhodnega (baznega) toka in s tem nihanje izhodnega (kolektorskega) toka.

Nastavitev delovne točke je odvisna predvsem od tipa ojačevalnika. Če želimo, da bo signal na izhodu čim manj popačen, bomo pri dovolj veliki napajalni napetosti ($U_{CC} \gg U_{CEsat}$) nastavili delovno točko kar na sredino delovne premice $U_{CE} = U_{CC}/2$.



Slika 4.18. Oblika izhodnega signala ojačevalnika s tranzistorjem, če je delovna točka nastavljena na sredino delovne premice.

Prenizka nastavitev delovne točke bi povzročila predčasno popačenje izhodnega signala. Nižanje baznega toka bi povsem zaprlo tranzistor (slika 4.19 a). Podobno bi previsoka nastavitev delovne točke povzročila, da bi napetost med kolektorjem in emitorjem zašla v področje nasičenja, ki je določeno z napetostjo U_{CEsat} (slika 4.19 b).



Slika 4.36. Odstranjevanje motenj z uporabo diferencialnih ojačevalnikov.

Diferencialni ojačevalnik je sestavljen iz dveh tranzistorjev, ki imata emitorja vezana na isti emitorski upor (ali tokovni generator). To povzroči, da delujeta protitaktno: ko se prvi zaradi vhodnega signala odpira, se drugi zapira. Tak ojačevalnik ojača le diferenčne signale, medtem ko sofazne slabi.

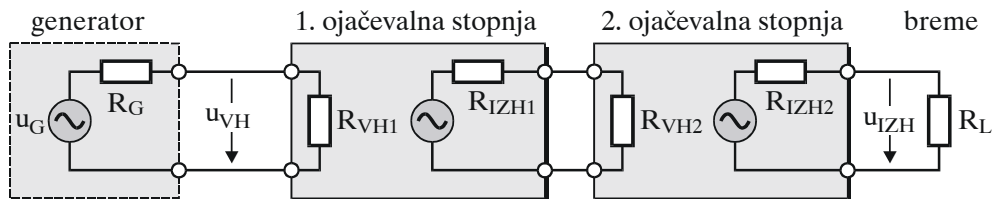
4.6. VEČSTOPENJSKI OJAČEVALNIKI

Za doseganje večjega ojačenja večemo več ojačevalnikov enega za drugim. Med seboj so lahko povezani na več različnih načinov, ki jih bomo spoznali v tem poglavju. Najprej si oglejmo, kako upoštevamo upornosti posameznih stopenj.

4.6.1. Skupno ojačenje

Na sliki 4.37 vidimo, da ima generator signala, ki je vezan na vhod ojačevalnika, svojo notranjo upornost R_G . Zato je napetost na vhodu prve ojačevalne stopnje enaka:

$$u_{VH1} = u_G \cdot \frac{R_{VH1}}{R_{VH1} + R_G}$$



Slika 4.37. Nadomestno vezje ojačevalnika, sestavljenega iz dveh ojačevalnih stopenj.

Zaradi enostavnejšega izračuna smo privzeli ohmske vrednosti. Za natančnejšo sliko bi morali upoštevati tudi vse kapacitivnosti in morebitne induktivnosti v vezju, kar bi upornosti spremenilo v impedance Z . Tako bi postali vsi izračuni odvisni tudi od delovne frekvenke.

Podoben izraz, kot smo ga zapisali za vhodno napetost v prvo ojačevalno stopnjo, lahko zapišemo tudi za drugo, le da sedaj notranjo upornost generatorja nadomesti izhodna upornost prve stopnje:

$$u_{VH2} = u_{IZH1} \cdot \frac{R_{VH2}}{R_{VH2} + R_{IZH1}}$$

Napetostno ojačenje celotnega ojačevalnika je potem:

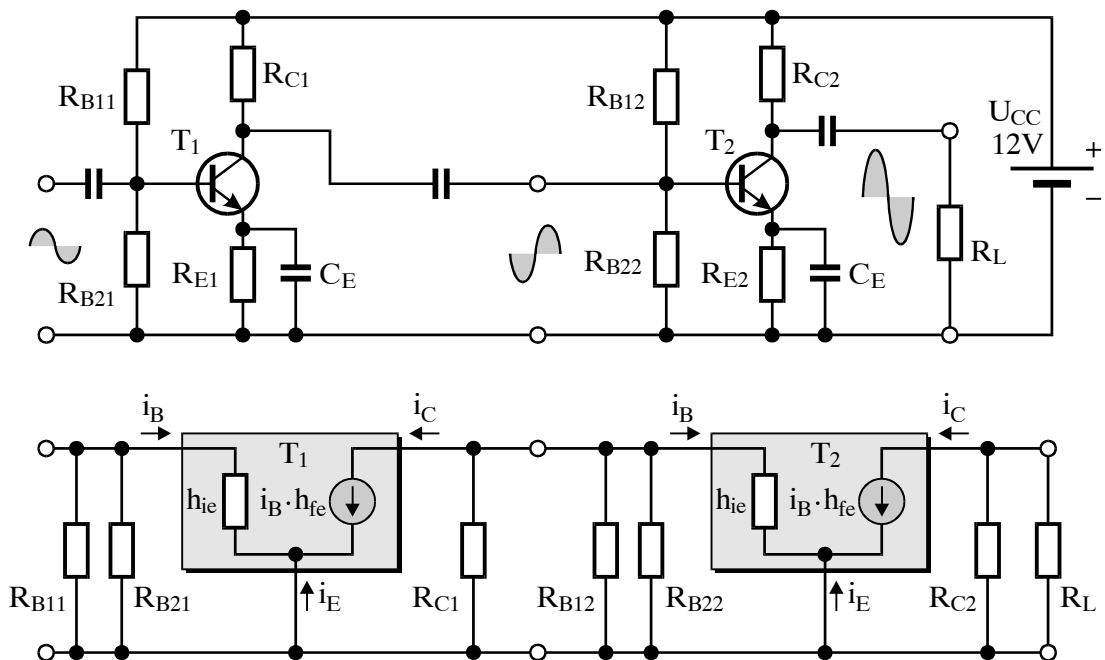
$$A_U = \frac{u_{IZH}}{u_{VH}} = A_{U1} \cdot A_{U2} \cdot \dots \cdot A_{Un},$$

kjer je n število vseh ojačevalnih stopenj.

4.6.2. Prilagoditev ojačevalnih stopenj

Sedaj poskušajmo ugotoviti, kolikšno vhodno upornost mora imeti ojačevalec, da je pri generatorju z določeno notranjo upornostjo moč na vходу ojačevalnika največja. Na sliki 4.38 je generator z napetostjo u_G ter notranjo upornostjo R_G priključen na vходу ojačevalnika z vhodno upornostjo R_{VH} . Električna moč na vходу ojačevalnika je $p_{VH} = i_{VH} \cdot u_{VH}$ ali drugače:

$$p_{VH} = \frac{u_{VH}^2}{R_{VH}}$$



Najprej izračunajmo upore za stabilizacijo delovne točke: $R_{C1}=R_{C2}=1,2\text{k}\Omega$, $R_{E1}=R_{E2}=297\Omega$, $R_{B11}=R_{B12}=23\text{k}\Omega$, $R_{B21}=R_{B22}=4,75\text{k}\Omega$.

Vhodna upornost posamezne ojačevalne stopnje je:

$$R_{VH} = R_{B1} \parallel R_{B2} \parallel h_{ie} = \frac{1}{23\text{k}\Omega^{-1} + 4,75\text{k}\Omega^{-1} + 1,2\text{k}\Omega^{-1}} = \underline{920\Omega}$$

Izhodna upornost je enaka upornosti kolektorskega upora $R_{IZH} \cong R_C = 1,2\text{k}\Omega$. Napetostno ojačenje za tranzistor v orientaciji s skupnim emitorjem se glasi:

$$A_U = -\frac{h_{fe} \cdot R_L'}{h_{ie}},$$

kjer je R_L' celotna bremenska upornost tranzistorja. Iz nadomestnega vezja vidimo, da sta breme prvemu tranzistorju kolektorski upor ter vzporedno vezana vhodna upornost naslednje ojačevalne stopnje. Torej:

Napetostno ojačenje prvega ojačevalnika dobimo tako, da najprej izračunamo vhodno upornost drugega ojačevalnika:

$$R_{VH2} = h_{ie2} + (h_{fe2} + 1) \cdot R_{E2} = 100\Omega + (50 + 1) \cdot 392\Omega = 20k\Omega$$

Tako je napetostno ojačenje prvega ojačevalnika:

$$A_U = \frac{h_{fe1} \cdot R_{C1} \parallel R_{VH2}}{h_{ie1}} = \frac{100 \cdot 1060\Omega \parallel 20k\Omega}{500\Omega} = 201,3$$

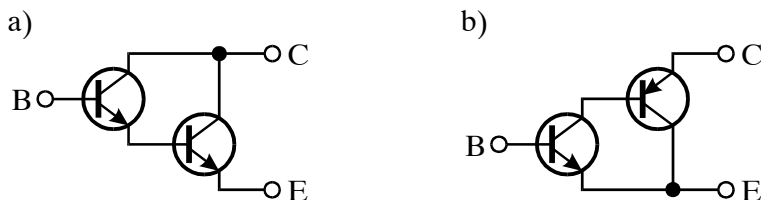
Napetostno ojačenje drugega ojačevalnika je približno enako 1 (vezava s skupnim kolektorjem), zato je skupno napetostno ojačenje enako kar ojačenju prvega ojačevalnika.

Položaj delovne točke tranzistorja se s temperaturo spremeni. Če se spremeni delovna točka enega tranzistorja, se spremenijo tudi položaji delovnih točk drugih tranzistorjev, ki so nanj vezani. Sprememba enosmernih veličin se v vsaki naslednji stopnji ojača. Tej nevšečnosti se izognemo z uporabo dovolj učinkovitih povratnih zank, ki pa znižajo ojačenje ojačevalnika.

Enosmerno povezani ojačevalniki lahko ojačajo tudi enosmerne signale. Problematični pa sta nastavitev delovne točke in velik vpliv segrevanja tranzistorjev na drsenje delovne točke: drsenje na enem tranzistorju povzroči premik delovne točke tudi na drugih nanj vezanih tranzistorjih.

Vezje, v katerem sta tranzistorja enosmerno vezana tako, kot kaže slika 4.41 a), imenujemo **Darlingtonovo** vezje. Drugi tranzistor deluje s svojo vhodno upornostjo r_{BE} kot emitorski upor prvemu. Oba skupaj delujeta kot en sam *nnpn* tranzistor. Pomembna lastnost Darlingtonovega vezja je veliko tokovno ojačenje ($\approx \beta_1 \cdot \beta_2$) ter velika vhodna upornost ($\approx r_{BE1} + \beta_1 \cdot r_{BE2}$). Dobimo ga v skupnem ohišju s tremi priključki, podobno kot navaden tranzistor. Parametri vezja so:

$$\begin{aligned} h_{ie} &= h_{ie1} + h_{ie2} \cdot h_{fe1} \\ h_{fe} &= h_{fe1} + h_{fe2} + h_{fe1} \cdot h_{fe2} \\ h_{oe} &= h_{oe2} + h_{oe1} \cdot h_{fe2} \\ h_{re} &= \text{zanemarljiv} \end{aligned}$$

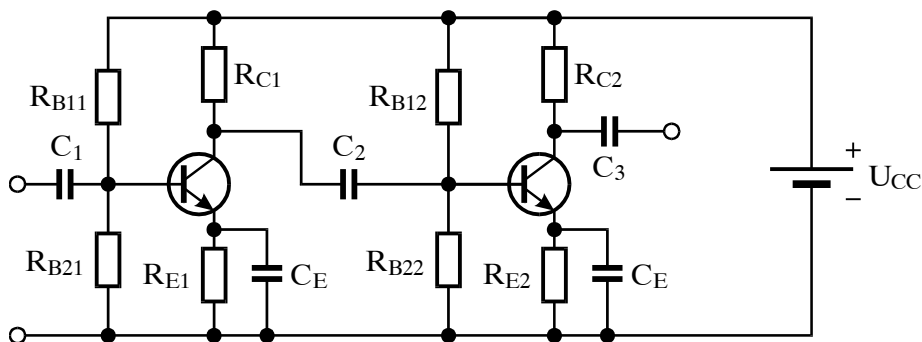


Slika 4.41. Darlingtonovi vezji.

Sorodnemu vezju na sliki 4.41 b) pa pravimo White-follower.

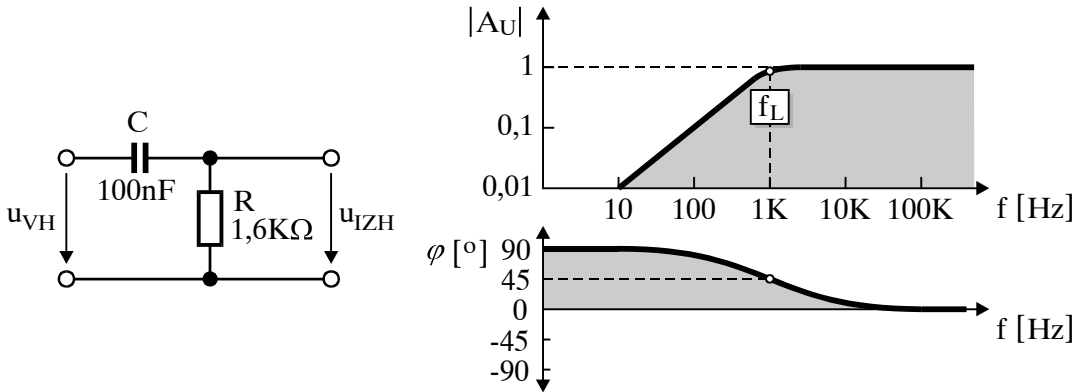
4.6.5. RC povezava ojačevalnikov

S pomočjo kondenzatorjev, ki jih vstavimo med ojačevalne stopnje, preprečimo enosmeren tok iz enega v drug ojačevalec. Zato je delovna točka posameznega tranzistorja stabilizirana ne glede na druge ojačevalnike. Poleg tega preprečimo, da bi enosmeren tok iz ojačevalnika odtekal v generator (mikrofon, gramofonska glava in podobno) ali v breme (slušalke, zvočnik in podobno).



Slika 4.42. Ojačevalnika, povezana z RC povezavo.

Ker so kondenzatorji vezani zaporedno, ojačevalnik ne more ojačati enosmer-nih signalov. Kondenzator predstavlja skupaj z vhodno upornostjo ojačevalne stopnje delilnik napetosti. Ta je zaradi kapacitivnosti kondenzatorja odvisen od frekvence izmeničnega signala.



Slika 4.43. Delilnik napetosti in frekvenčni potek napetosti ter faznega toka.

Poglejmo si najprej vezje na sliki 4.43. Padec napetosti na uporu je enak:

$$u_R = u_G \cdot \frac{R}{R + X_C} = u_G \cdot \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega \cdot C}} = u_G \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega \cdot C \cdot R}}$$

Absolutna vrednost razmerja med napetostjo na uporu in generatorjevo napetostjo je:

$$\left| \frac{u_R}{u_G} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 \cdot C^2 \cdot R^2}}}$$

Ko se absolutna vrednost razmerja napetosti z nižanjem frekvence zniža na $1/\sqrt{2}$ (v decibelih to pomeni padec za 3dB), pravimo, da nastopi spodnja mejna frekvenca f_L . Pri spodnji mejni frekvenci velja:

$$\frac{1}{\omega^2 \cdot C^2 \cdot R^2} = 1 \quad \text{ali} \quad \omega_L = \frac{1}{C \cdot R} = 2 \cdot \pi \cdot f_L$$

Vezje povzroči tudi fazni zasuk, ki je prav tako odvisen od frekvence signala in znaša:

$$\tan \varphi = \frac{\text{imaginarni del}}{\text{realni del}} = \frac{1}{\omega \cdot C \cdot R} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot R}$$

Frekvenci, pri kateri pade ojačenje za 3dB, določata širino frekvenčnega pasu. Ta je odvisna od kvalitete resonančnega kroga, ki je podana kot:

$$Q = \omega_0 \cdot R \cdot C,$$

kjer je R upornost nihajnega kroga pri resonančni frekvenci ω_0 . Ko je nihajni krog v resonanci, ima le ohmsko komponento upornosti. Spodnja in zgornja mejna frekvenca sta sedaj določeni z enačbama (če je le $Q > 1$):

$$f_H = f_0 \cdot \left(1 + \frac{1}{2 \cdot Q}\right) \quad \text{ter} \quad f_L = f_0 \cdot \left(1 - \frac{1}{2 \cdot Q}\right)$$

Selektivni transformator uporabljamo tam, kjer želimo, da ojačevalnik ojača le signale določenih frekvenc.

4.6.9. Decibeli

Ojačenje je lastnost ojačevalnikov, da povečajo velikost vhodnega signala. Definiramo ga kot razmerje amplitud ali efektivnih vrednosti. Tako poznamo napetostno in tokovno ojačenje ter ojačenje moči.

$$A_U = \frac{u_{IZH}}{u_{VH}} \quad \text{napetostno ojačenje}$$

$$A_I = \frac{i_{IZH}}{i_{VH}} \quad \text{tokovno ojačenje}$$

$$A_P = \frac{P_{IZH}}{P_{VH}} = A_U \cdot A_I \quad \text{ojačenje moči}$$

Ko govorimo o ojačevalnikih, ne moremo mimo enote dB (decibel). Ta izvira iz logaritemskega zapisa ojačenja:

$$A = 10 \cdot \log \frac{P_{IZH}}{P_{VH}} \quad [\text{dB}]$$

S pomočjo enačbe za ojačenje moči lahko izpeljemo še napetostno in tokovno ojačenje:

$$A = 10 \cdot \log \frac{P_{IZH}}{P_{VH}} = 10 \cdot \log \frac{u_{IZH}^2 \cdot Z_{IZH}}{u_{VH}^2 \cdot Z_{VH}} = 20 \cdot \log \frac{u_{IZH} \cdot \sqrt{Z_{IZH}}}{u_{VH} \cdot \sqrt{Z_{VH}}}$$

$$A = 10 \cdot \log \frac{P_{IZH}}{P_{VH}} = 10 \cdot \log \frac{i_{IZH}^2 \cdot Z_{VH}}{i_{VH}^2 \cdot Z_{IZH}} = 20 \cdot \log \frac{i_{IZH} \cdot \sqrt{Z_{VH}}}{i_{VH} \cdot \sqrt{Z_{IZH}}}$$

Če sta vhodna in izhodna impedanca enaki, lahko enačbi poenostavimo:

$$A = 20 \cdot \log \frac{u_{IZH}}{u_{VH}} \quad [\text{dB}]$$

$$A = 20 \cdot \log \frac{i_{IZH}}{i_{VH}} \quad [\text{dB}]$$

4.6.10. Šum ojačevalnika

Vsak element ojačevalnika proizvaja šum (angl. noise). To je neharmonski, naključni signal, ki je prisoten na celotnem frekvenčnem pasu. Občutljivost ojačevalnika je odvisna prav od velikosti šuma: če je signal zelo šibek, je lahko šum večji od signala. Poglejmo si nekaj razlogov za nastanek šuma.

Termični (ali Johnsonov) šum je posledica termičnega gibanja elektrin, ki je neurejeno in kaotično. Trenutna prerazporeditev elektrin in trki povzročijo majhna nihanja napetosti na priključkih elementa. Efektivna vrednost napetosti šuma je podana z enačbo:

$$U_n = \sqrt{4 \cdot k \cdot T \cdot R \cdot \Delta f},$$

kjer je:

k	Boltzmannova konstanta ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K),
T	temperatura v K,
R	upornost v Ω ,
Δf	pasovna širina v Hz.

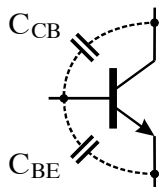
Kontaktni šum (shot ali Schottky) nastane, ko elektrina preleti potencialni prag med dvema polprevodniškima tipoma, med različnimi kovinami ali med kovino in polprevodnikom. Vsaka elektrina povzroči pri prehodu majhen tokovni sunek. Velikost šuma je sorazmerna toku, ki teče skozi enega od spojev.

Razmerje signal/šum (angl. signal to noise ratio) nam pove, v kolikšni meri je ojačevalnik sposoben ločevati med koristnim signalom in šumom. To razmerje je enako razmerju med močjo signala in močjo šuma na izhodu vezja:

$$S / N = 10 \cdot \log \frac{P_{IZH}}{P_{IZHn}} = 20 \cdot \log \frac{U_{IZH}}{U_{IZHn}} \quad [\text{dB}]$$

4.7. OJAČEVALNIKI PRI VISOKIH FREKVENCAH

Ko ojačevalnik obratuje pri višjih delovnih frekvencah, se izkaže, da kapacitivnosti polprevodniških elementov ne moremo več zanemariti. V tem poglavju bomo spoznali predvsem vpliv notranjih kapacitivnosti tranzistorja na delovanje ojačevalnika. V notranjosti bipolarnega tranzistorja se vsak *pn* spoj obnaša kot majhen kondenzator, zato lahko opredelimo dve kapacitivnosti: prvo med bazo in emitorjem, drugo pa med kolektorjem in bazo.



Slika 4.49. Kapacitivnosti v notranjosti tranzistorja.

4.7.1. Kapacitivnost baza-emitor

Pn spoj med bazo in emitorjem je seštevek dveh kapacitivnosti: spojne in difuzijske. Spojna kapacitivnost nastane zato, ker deluje osiromašeno področje med *p* in *n* polprevodnikom kot dielektrik. Ta kapacitivnost je zelo majhna, največ nekaj pF (piko faradov). Druga, difuzijska, nastane zaradi omejene hitrosti difuzije manjšinskih nosilcev, ki prehajajo iz enega v drugi tip polprevodnika. Pri hitrih spremembah toka se zaradi počasnosti difuzije kopiči elektrina v polprevodniku. Ko prevodna napetost na spoju upade, tok ne upade takoj, temveč šele takrat, ko elektrina dejansko odteče iz prehodnega področja. Difuzijska kapacitivnost lahko doseže vrednost tudi nekaj nF (nano faradov), podana je z enačbo:

$$C_{BE} = \tau \cdot \frac{q \cdot I_E}{k \cdot T},$$

kjer je τ življenjski čas manjšinskih nosilcev elektrine, ki potujejo skozi bazo.

4.7.2. Kapacitivnost kolektor-baza

Kapacitivnost kolektorskega spoja povzroča spojna kapacitivnost, ki nastane zaradi zaporno polariziranega spoja. Čim višja je zaporna napetost na spoju, širša je zaporna plast in manjša je spojna kapacitivnost $C_{CB'}$ (opuščaj ob B-ju pomeni, da gre za kapacitivnost med pravo bazo – torej bazo na sami polprevodniški ploščici – in kolektorskim priključkom). $C_{CB'}$ je sicer po velikosti majhna, toda povezuje vhod in izhod ojačevalnika. Ker gre za povratno zanko, je vpliv te kapacitivnosti na vhod večji za velikost ojačenja ojačevalnika:

$$C_C = C_{CB'} \cdot (1 + A_U) \approx C_{CB'} \cdot (1 + g_m \cdot R_L),$$

kjer je g_m transkonduktanca tranzistorja, R_L pa breme, ki je vezano na izhodu tranzistorja (glej nadomestno vezje na sliki 4.51).

4.7.3. Vpliv kapacitivnosti na ojačenje

Skupna kapacitivnost na vhodu je enaka seštevku obeh, torej:

$$C_{SK} = C_{B'E} + C_{CB'} \cdot (1 + g_m \cdot R_L)$$

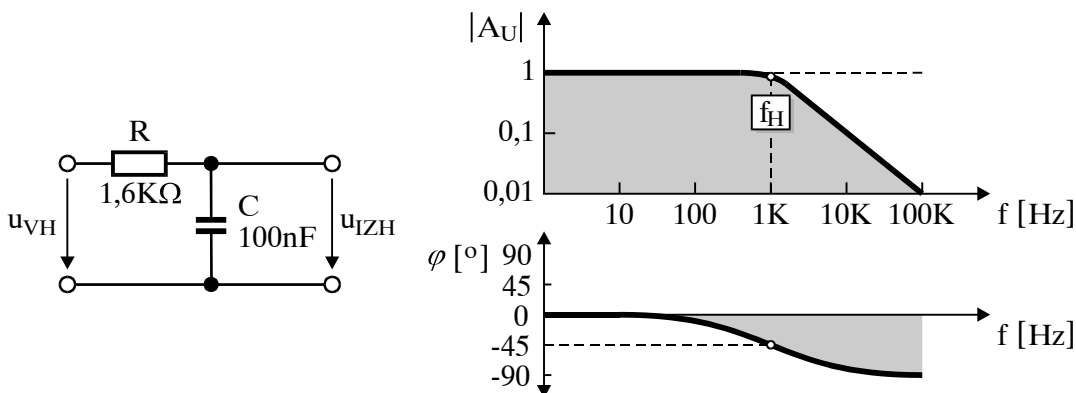
Skupna kapacitivnost deluje skupaj z vhodno upornostjo kot delilnik napetosti. Zaradi kapacitivnosti je delilnik odvisen od frekvence. Napetost na izhodu je enaka:

$$u_{IZH} = u_{VH} \cdot \frac{X_C}{X_C + R} = u_{VH} \cdot \frac{1}{1 + j\omega \cdot C \cdot R}$$

Z višanjem frekvence se izhodna napetost niža. Frekvenci, pri kateri ojačenje pade za vrednost $1/\sqrt{2}$, pravimo zgornja mejna frekvenca. Absolutno vrednost ojačenja dobimo iz predhodne enačbe in znaša:

$$|A_U| = \left| \frac{u_{IZH}}{u_{VH}} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \cdot C^2 \cdot R^2}}$$

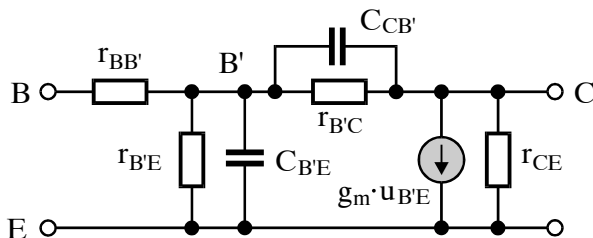
Ojačenje pade za vrednost $1/\sqrt{2}$ pri frekvenci: $f_H = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C \cdot R}$



Slika 4.50. Delilnik napetosti ter potek ojačenja in faznega zasuka s frekvenco.

Diagram na sliki 4.50 prikazuje potek ojačenja s frekvenco. Diagram je narejen po logaritemski lestvici. Opisani delilnik napetosti povzroči tudi fazni zasuk, ki je enak:

$$\tan \varphi = -\omega \cdot C \cdot R$$



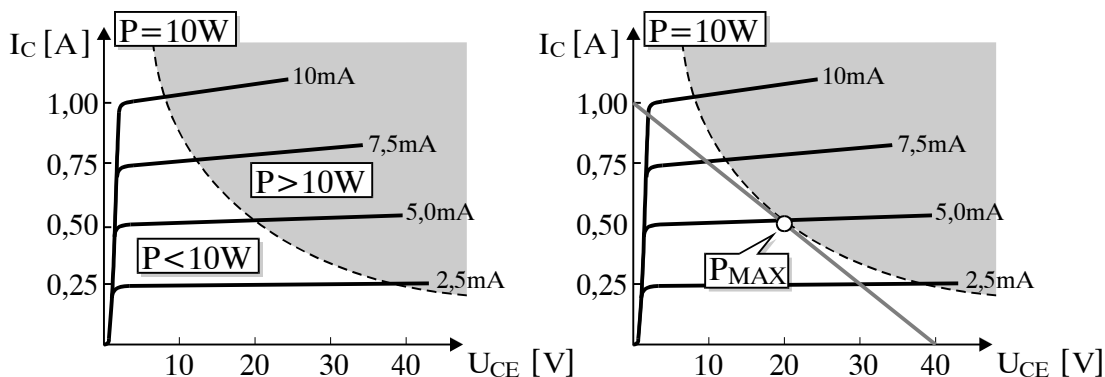
Slika 4.51. Nadomestna vezava tranzistorja za visoke frekvence.

Nadomestno vezje tranzistorja na sliki 4.51 je hibridni Π -čtetveropol, ki smo mu dodali kapacitivnosti emitorskega in kolektorskega spoja. Tokovni ojače-

4.8. MOČNOSTNI OJAČEVALNIKI

Močnostni ojačevalniki so ojačevalniki z veliko močjo na izhodu ter z velikimi signali, ki so blizu izkrmiljenja (izkrmiljenje se zgodi, ko ima izhodni signal največjo možno amplitudo). Tako postanejo pomembni potrošnja električne moči, izkoristek moči, segrevanje tranzistorja, hlajenje, izkrmiljenje signala in popačenje. Pozorni moramo biti predvsem na omejitve tranzistorja, ki so tako tokovne (največji dopustni tokovi), napetostne (prebojne napetosti spojev) in omejitev izgubne moči (segrevanje tranzistorja).

Izgubno električno moč lahko vrišemo v polje izhodnih karakteristik kot hiperbolo $P = U_{CE} \cdot I_C$. V polju nad hiperbolo je moč povsod večja, pod njo pa manjša. Prekoračitev dopustne izgubne moči povzroči prekomerno pregrevanje tranzistorja in njegovo uničenje.



Slika 4.55. Omejitev izgubne moči tranzistorja.

4.8.1. Izkoristek ojačenja moči

Izkoristek ojačenja moči je definiran kot razmerje med koristno močjo na bremenu in srednjo močjo, ki jo proizvaja napajalni vir. Pove nam, koliko električne moči, ki jo mora proizvajati napajalni vir, se porablja na bremenu.

$$\eta = \frac{\text{moč na bremenu}}{\text{moč napajalnega vira}}$$

Za določeno napajalno napetost moramo izračunati največjo moč, ki jo lahko dobimo na izhodu ojačevalnika. Pri teoretičnem polnem izkrmiljenju je napetostni signal na izhodu velik: $2 \cdot U_M = U_{CC}$, kjer je U_M temenska vrednost napetosti. Električna moč je določena kot: $P = U_{EF} \cdot I_{EF}$, zato lahko izpeljemo:

$$P_L = \frac{U_{EF}^2}{R_L} = \frac{U_M^2}{2 \cdot R_L} = \frac{U_{CC}^2}{8 \cdot R_L}$$

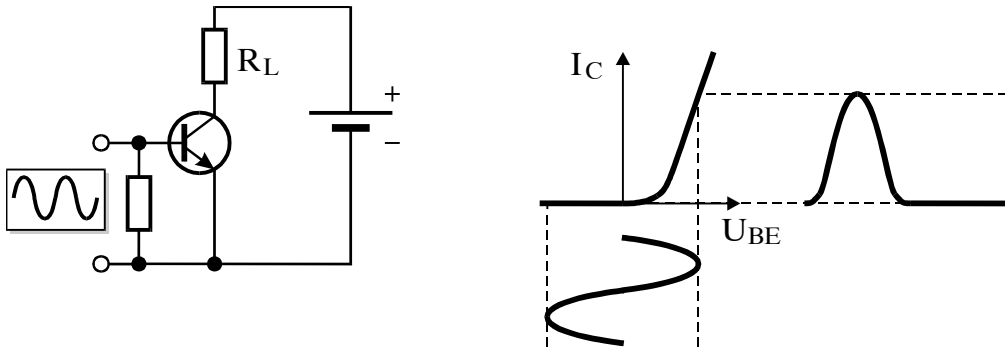
Ta enačba nam na primer pove, da pri ojačevalnikih v avtomobilu, kjer je napajalna napetost 12V in upornosti zvočnika 4Ω , ne moremo doseči večje moči od 4,5W (ojačevalniki v avtomobilih imajo vezje, ki poveča napajalno napetost).

Pri največjem možnem teoretičnim izkrmiljenju, kjer ima izhodni signal amplitudo od 0 do U_{CC} , pade na breme 25% moči. Če na primer želimo imeti ojačevalnik, ki na bremenu troši 100W koristne moči signala, mora napajalni vir proizvajati 400W moči. Preostalih 300W pa troši tranzistor za lastno segrevanje. To pomeni, da lega delovne točke na sredini delovne premice ni najbolj primerna za močnostne ojačevalnike.

Ker breme ne porabi vse električne moči, ki jo nudi napajalni vir, moramo pri močnostnih ojačevalnikih upoštevati tudi izkoristek moči.

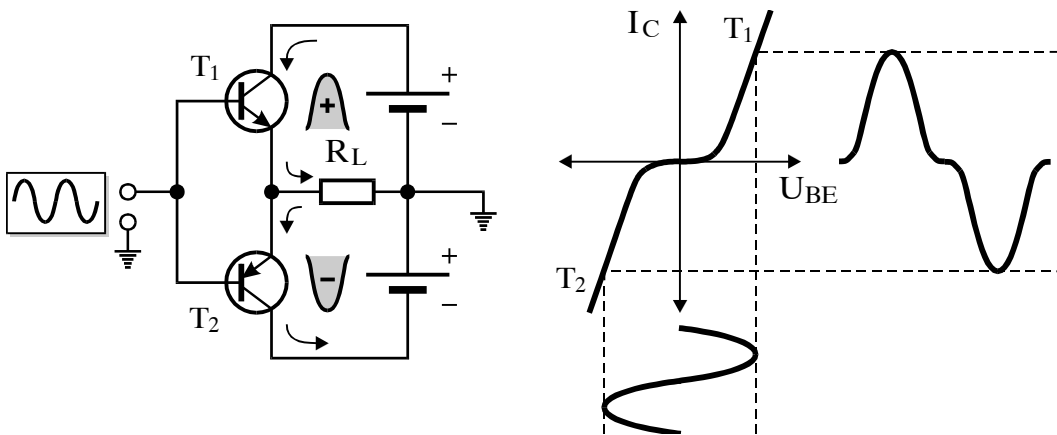
4.8.2. Popačenje

Ko tranzistor krmilimo z velikimi signali, moramo upoštevati, da je njegova karakteristika nelinearna. Zaradi tega je signal na izhodu v primerjavi z vhodnim popačen. Ko se signal sinusne oblike določene frekvence popači, ugotovimo, da nastane poleg osnovnega signala še množica manjših signalov. Le-ti imajo frekvence, ki so mnogokratniki frekvence osnovnega signala, zato jim pravimo višjeharmonski signali. Popačenje, ki je nastalo, imenujemo **nelinearno** ali **amplitudno** popačenje in ga lahko le merimo (ne moremo ga izračunati, saj se karakteristike tranzistorjev tudi pri istih tipih razlikujejo). Vzrok za nelinearno popačenje so najpogostejše nelinearni elementi, nepravilna nastavitve delovnih pogojev komplementarnih tranzistorjev in podobno. Popačenje lahko omilimo z uporabo povratnih vezav.



Slika 4.57. Ojačevalnik v »B« razredu.

Slabost ojačevalnika na sliki 4.57 je v tem, da lahko *nnp* tranzistor ojača le pozitivno polperiodo vhodnega signala. Rešitev je v dveh tranzistorjih, kjer je prvi *nnp* in drugi *pnp*. Tak komplementarni par tranzistorjev lahko ojača obe polperiodi, potrebujemo pa dva napajalna vira.



Slika 4.58. Ojačevalnik v »B« razredu s komplementarnim parom tranzistorjev.

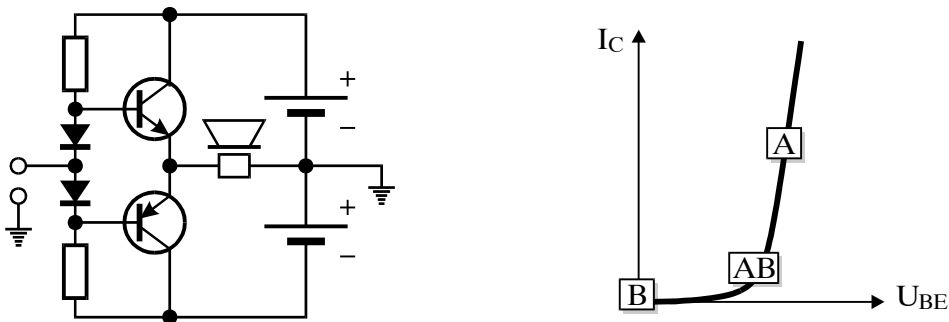
Tranzistorja v vezju na sliki 4.58 sta orientirana s skupnim kolektorjem. To pa zato, ker je taka orientacija tranzistorjev primernejša za krmiljenje bremen z majhno upornostjo, kot je zvočnik. Signal na izhodu je kljub temu popačen.

Razlog je v velikosti prevodne napetosti, ki je potrebna med bazo in emitorjem, da steče kolektorski tok. Šele ko vhodni signal preseže napetost kolena tranzistorjev (za silicij okrog 0,7V), tranzistorja prevajata.

Tranzistor troši manj, če miruje (skozenj ne teče kolektorski tok), ko na vходу ni signala. Ker tako nastavljen tranzistor prevaja le eno polperiodo, potrebujemo za ojačenje obeh polperiod dva komplementarna tranzistorja.

4.8.5. AB razred ojačevalnika

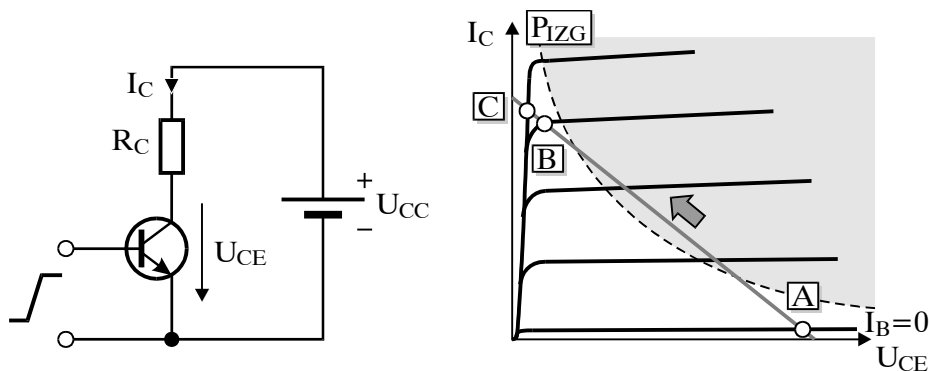
Popačenje v »B« razredu popravimo tako, da postavimo delovno točko tranzistorja nekoliko višje. Ko na vходу ni signala, teče skozi tranzistor majhen kolektorski tok. Če je delovna točka pravilno nastavljena in kolektorski tok dovolj majhen, je izkoristek še vedno zadovoljiv.



Slika 4.59. Ojačevalnik v »AB« razredu.

Tranzistorjem v vezju na sliki 4.59 nastavimo delovno točko s pomočjo uporov ter obeh diod. Diodi služita za pravilno nastavitve delovnih točk. Napetost med bazo in emitorjem posameznega tranzistorja mora biti tolikšna, da je tranzistor na meji prevajanja, okrog 0,7V. Večja napetost bi povzročila prevelik kolektorski tok in segrevanje tranzistorjev, prenizka pa popačenje, ker bi bila tranzistorja preveč zaprta.

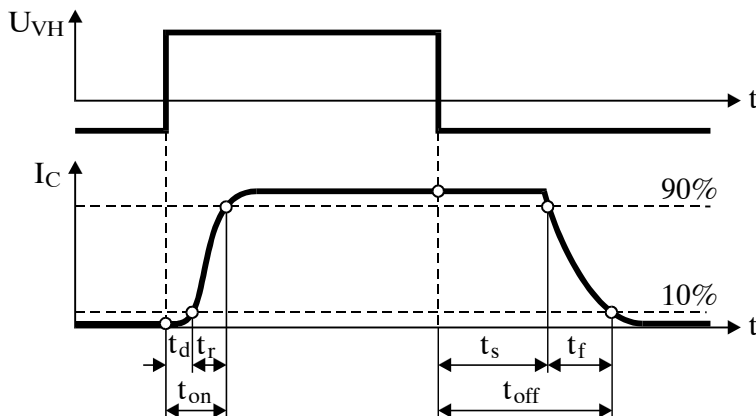
odpremo. Delovna točka se dvigne po delovni premici navzgor do točke B. Napetost med kolektorjem in emitorjem je blizu področja nasičenja, zato je tranzistor izkrmiljen. Če dodatno povečujemo bazni tok na vhodu, se kolektorski tok bistveno ne poveča. Tranzistor je v področju nasičenja, zato je prekrmljen (točka C).



Slika 4.64. Tranzistor v vlogi stikala.

Potrošnja električne moči tranzistorja je v enem ali drugem stanju zelo majhna. Ko je tranzistor zaprt, je vsa napajalna napetost med kolektorjem in emitorjem, kolektorski tok je zanemarljiv. Ko pa tranzistor prevaja, je kolektorski tok skozenj dovolj velik, padec napetosti pa pri vrednosti nasičenja. Tranzistor troši največ moči takrat, ko je delovna točka na sredini delovne premice. To pa zato, ker je produkt napetosti in toka tam največji. Ko tranzistor odpiramo, se delovna točka pomika po delovni premici navzgor. Na začetku se giblje proti polovici delovne premice, kjer je potrošnja tranzistorja največja, nato nadaljuje pot navzgor in se od sredine oddaljuje. Tranzistor se bo najbolj segrel ravno pri preklopu. Večje število preklapov v časovni enoti pomeni, da bo morala delovna točka pogostokrat skozi sredino delovne premice in tranzistor se bo čedalje bolj segreval. Zato je segrevanje tranzistorja pri preklapnih vezjih odvisno od števila preklapov v časovni enoti.

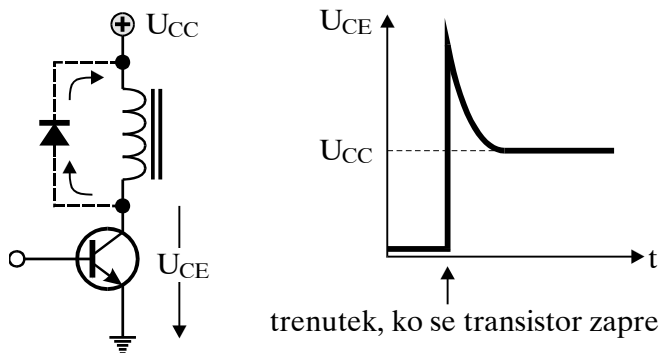
Ker delovna točka pri preklopu tranzistorja zelo naglo prečka sredino delovne premice, lahko tranzistor nastavimo tako, da delovna premica seka krivuljo največje dopustne izgubne moči P_{TOT} (glej diagram na sliki 4.64). Delovna



Slika 4.65. Časi zakasnitve tranzistorja.

4.9.2. Induktivno breme

Induktivno breme tranzistorja je lahko rele, tuljava elektromotorja in podobno. Zaradi induktivnosti se ta bremena obnašajo drugače kot ohmska. Indukcijski zakon pravi, da se v vsakem ovoju pojavi električna napetost, če se v njem spreminja magnetni pretok. V trenutku preklopa tranzistorja se kolektorski tok skokovito spremeni, zato se spremeni tudi magnetni pretok v tuljavi. Inducira se lastna napetost tuljave, ki temu toku nasprotuje.

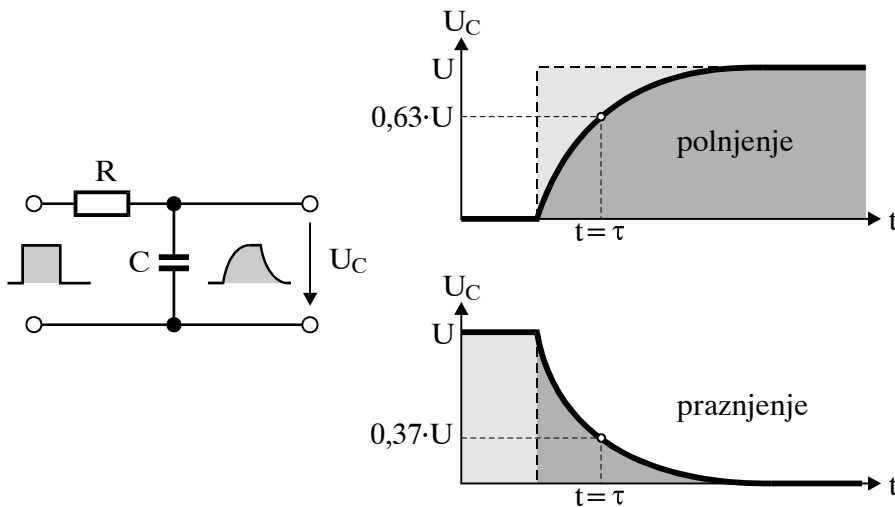


Slika 4.66. Delovanje tranzistorja z induktivnim bremenom.

Posebej nevaren je trenutek, ko prekinemo kolektorski tok. Zaradi tega v tuljavi naglo upade magnetni pretok, ki povzroči, da se v ovojih inducira napetost. Ta je na kolektorju pozitivna in ima vrednost $R \cdot I_C$. Napetost med kolektorjem in emitorjem tranzistorja je sedaj enaka seštevku napajalne napetosti in inducirane napetosti tuljave. Če presežemo dopustno temensko vrednost napetosti tranzistorja, le-ta prebije. Temu se izognemo tako, da vzporedno s tuljavo vežemo diodo, kot kaže vezje na sliki 4.66). Dioda je obrnjena tako, da kratko sklene tuljavo, ko se v njej pojavi inducirana napetost.

4.9.3. Kapacitivno breme

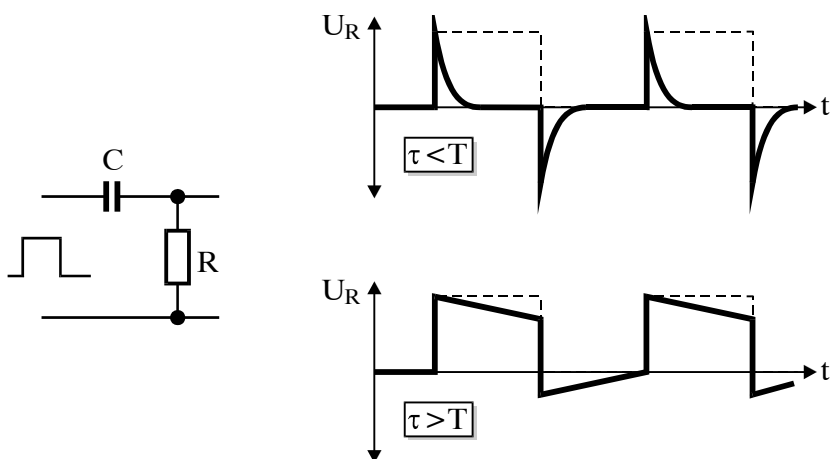
Kapacitivno breme povzroči, da se v njem nabira elektrina, ki se kasneje prazni preko tranzistorja in onemogoči hipne spremembe napetosti. Napetost na izhodu tranzistorja ne more slediti kolektorskemu toku. Kapacitivno breme lahko povzročijo tudi dolgi vodniki ali vhodna kapacitivnost naslednje stopnje. Oglejmo si odziv kapacitivnega bremena na vhodni signal pravokotne oblike.



Slika 4.67. Potek polnjenja in praznjenja kondenzatorja.

Čas polnjenja in praznjenja kondenzatorja je izpeljan s pomočjo dejstva, da je tok, ki teče skozi kondenzator, enak produktu kapacitivnosti in hitrosti spre-

Na sliki 4.69 vidimo vpliv sklopnega kondenzatorja na obliko pravokotnega vhodnega signala. Ko je kondenzator prazen, teče skozenj največji tok, ki je omejen z uporom. V času polnjenja napetost na kondenzatorju narašča, padec napetosti na uporju pa zaradi tega upada proti ničli. Ko se kondenzator popolnoma napolni, je padec napetosti na njem enak celotni vhodni napetosti, zato je na uporu napetost 0V in tok več ne teče. Ko pa se kondenzator prazni, teče tok v obratno smer, zato ima izhodna napetost nasproten predznak. Tok ponovno pade na nič, ko se kondenzator popolnoma izprazni. V vezju na sliki 4.69 je v prvem primeru časovna konstanta $R \cdot C$ manjša, v drugem primeru pa večja od trajanja polperioda pravokotnega signala.



Slika 4.69. Oblika signala na izhodu vezja, vzbujenega s signalom pravokotne oblike.

VPRAŠANJA

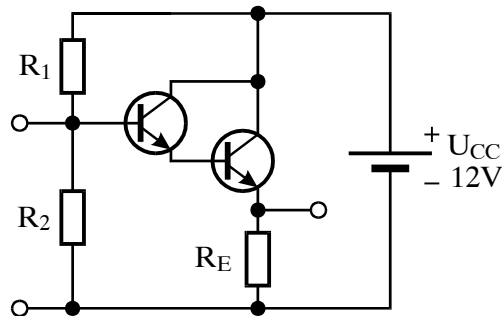
1. Kaj pomeni, da je tranzistor »pnp« tipa?
2. V katero smer moramo priključiti emitorski in kolektorski spoj pri bipolarnem tranzistorju, da bo deloval v aktivnem področju?
3. Zaradi česa teče skozi kolektorski spoj električni tok, kljub temu, da ga priključimo v zaporno smer?
4. Kaj je α ? Kolikšno vrednost ima? Ali je lahko večji od 1?
5. V kakšni povezavi sta si α in β pri bipolarnem tranzistorju?
6. Kaj je tok nasičenja? Kako ga označimo in od česa je najbolj odvisen?
7. Naštej vse orientacije tranzistorja! Zakaj jih tako poimenujemo?
8. Zakaj potrebujemo nadomestna vezja? Nariši preprosto nadomestno vezje za bipolarni tranzistor!
9. Kaj nam pove parameter h_{fe} ?
10. Kaj je področje nasičenja tranzistorja?
11. Kaj je enosmerna delovna točka in zakaj jo moramo nastavljanje? Na kakšen način jo nastavimo?
12. Kaj se zgodi, če delovno točko tranzistorja nastavimo z baznim uporom, kot na sliki 4.20, β tranzistorja pa je večji, kot smo pričakovali?
13. Zakaj moramo delovno točko pri tranzistorju stabilizirati?
14. Razloži, kako deluje stabilizacija delovne točke z emitorskim uporom! Čemu v takem vezju služi emitorski kondenzator?
15. Opiši prednosti in slabosti posameznih orientacij tranzistorja!
16. Čemu služi diferencialni ojačevalnik? Kako deluje?
17. Zakaj diferencialni ojačevalnik izboljšamo s tokovnim generatorjem in kaj je faktor rejekcije ali CMRR?
18. Zakaj moramo vhodno upornost ojačevalnikov prilagoditi upornosti generatorja?
19. Kakšna je prednost in kakšna slabost enosmerno povezanih ojačevalnikov? Kaj moramo paziti pri taki povezavi?
20. Kaj je Darlingtonovo vezje?

21. Čemu služi sklopni kondenzator med posameznimi ojačevalnimi stopnjami?
22. Kako vplivajo sklopni kondenzatorji na frekvenčno karakteristiko ojačevalnika? Kaj se zgodi, če nižamo kapacitivnost teh kondenzatorjev?
23. Čemu tuljava namesto kolektorskega upora ojačevalnika?
24. Zakaj v ojačevalnikih uporabljamo selektivne transformatorje?
25. Opiši, kako nastane šum v ojačevalnikih!
26. Kakšen vpliv imata kapacitivnosti tranzistorja na ojačenje?
27. Kaj je skrajna frekvenca tranzistorja?
28. Kako deluje kaskadni ojačevalnik? Zakaj je primernejši za višje frekvence?
29. Kaj je izkoristek ojačenja moči pri močnostnih ojačevalnikih?
30. Zakaj nastane nelinearno popačenje?
31. Zakaj delimo ojačevalnike v razrede? Kakšne so razlika med posameznimi razredi?
32. Zakaj je izkoristek ojačenja moči boljši v »B« od tistega v »A« razredu?
33. Zakaj v »B« razredu potrebujemo dva komplementarna tranzistorja?
34. Kako deluje ojačevalnik v »AB« razredu, če imamo na voljo en sam napajalni vir?
35. Zakaj nastane zakasnitev pri preklopu bipolarnega tranzistorja?

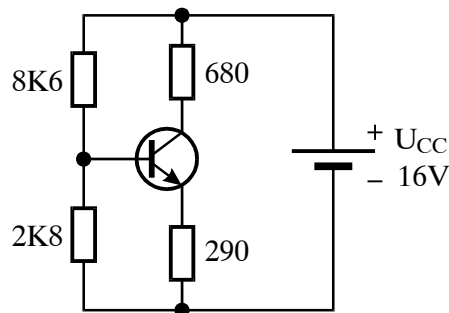
NALOGE

1. Kolikšen je kolektorski tok tranzistorja, če je $I_B=0,3\text{mA}$, $\beta=120$ in $I_{CB0}=40\mu\text{A}$? (Odg.: $40,84\text{mA}$)
2. Kolikšna je transkonduktanca tranzistorja g_m , če je $I_E=8\text{mA}$ in $\beta=120$ (termična napetost znaša 25mV)? (Odg.: 320mS)
3. Pri tranzistorju v orientaciji s skupnim emitorjem sta parametra $h_{fe}=120$ in $h_{ie}=1\text{k}\Omega$, upornost bremena pa je $2\text{k}\Omega$. Izračunajte A_I , A_U , R_{VH} in R_{IZH} ! (Odg.: -120 , -240 , $1\text{k}\Omega$, ∞)
4. Izračunajte upornost kolektorskega R_C in baznega upora R_B v vezju na sliki 4.20 tako, da bo delovna točka tranzistorja pri $U_{CE}=4\text{V}$ in $I_C=5\text{mA}$! $U_{CC}=12\text{V}$ in $\beta=120$. (Odg.: $1,6\text{k}\Omega$, $271\text{k}\Omega$)

5. Izračunajte upornosti uporov R_{C1} , R_{E1} in R_{E2} v vezju na sliki 4.40 tako, da bo delovna točka pri obeh tranzistorjih na sredini. Podatki: $I_{C1}=5\text{mA}$, $\beta_1=120$, $I_{C2}=10\text{mA}$, $\beta_2=80$ in $U_{CC}=16\text{V}$! (Odg.: $1,4\text{k}\Omega$, 140Ω , 800Ω)
6. Kolikšno je napetostno ojačenje iz predhodnega primera, če so parametri: $h_{fe1}=120$, $h_{ie1}=1\text{k}\Omega$, $h_{fe2}=80$ in $h_{ie2}=1\text{k}\Omega$? (Odg.: ≈ 9)
7. Izračunajte upornosti uporov R_1 , R_2 in R_E spodnjega vezja tako, da bo $I_{E2}=240\text{mA}$ in delovna točka drugega tranzistorja na sredini delovne premice ($\beta_1=100$, $\beta_2=60$)! Kolikšna je približno vhodna upornost ojačevalnika? (Odg: $10,4\text{k}\Omega$, $18,5\text{k}\Omega$, 25Ω , $6,37\text{k}\Omega$)



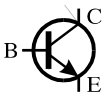
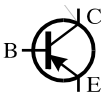
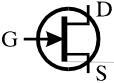
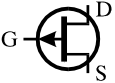
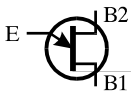
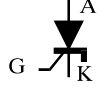
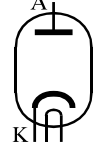
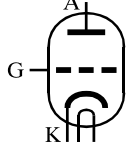
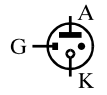
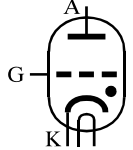
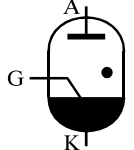
8. Izračunajte, kolikšno izgubno moč troši tranzistor v danem vezju, če je $\beta=80$! (Odg.: $59,5\text{mW}$)



9. Ojačevalnik ima na izhodu selektivni transformator (glej sliko 4.47) s podatki: $C=470\text{pF}$ in $L=50\mu\text{H}$. Kolikšna je resonančna frekvenca nihajnega kroga in kolikšni zgornja in spodnja mejna frekvenca, če ima nihajni krog pri resonančni frekvenci upornost $R=10\text{k}\Omega$? (Odg.: 1,038MHz, 1,055MHz, 1,021MHz)
10. Na izhodu ojačevalnika je narastel signal z 12mV na 17mV. Za koliko decibelov se je signal povečal? (Odg.: 3dB)
11. Ojačevalnik s pasovno širino 10kHz ima v vezju upor z upornostjo $5\text{k}\Omega$. Kolikšno šumno napetost povzroči termični šum na upor pri temperaturi 25°C ? (Odg.: $0,9\mu\text{V}$)
12. Kolikšna je zgornja mejna frekvenca tranzistorja, če je $h_{fe}=120$ in $f_T=10\text{MHz}$? (Odg.: 83kHz)
13. Kolikšna je lahko največja (teoretična) moč na izhodu ojačevalnika v AB razredu pri napajalni napetosti 24V in upornosti bremena 8Ω ? (Odg: 9W)

10.7. SIMBOLI

	ohmski upor		dioda
	spremenljivi upor (potenciometer)		prebojna dioda
	nastavljivi (trimer) upor		kapacitivna (varicap) dioda
	kondenzator		Schottkyjeva dioda
	spremenljivi (vrtljivi) kondenzator		tunelska dioda
	nastavljivi (trimer) kondenzator		svetleča (LED) dioda
	elektrolitski kondenzator		foto dioda
	dušilka		diodni tiristor
	dušilka s feritnim jedrom		diac
	vir izmeničnega signala		idealen napetostni generator
	napetostni vir		idealen tokovni generator

	bipolarni <i>nnp</i> tranzistor		bipolarni <i>pnp</i> tranzistor
	unipolarni JFET s kanalom <i>n</i> tipa		unipolarni JFET s kanalom <i>p</i> tipa
	MOSFET z induciranim <i>n</i> kanalom		MOSFET z induciranim <i>p</i> kanalom
	MOSFET z vgrajenim <i>n</i> kanalom		MOSFET z vgrajenim <i>p</i> kanalom
	enospojni tranzistor UJT		tranzistor z možnostjo programiranja PUT
	dvosmerna dioda		tiristor
	ugasljivi tiristor GTO		tetrodni tiristor SCS
	zaporno prevodni tiristor RCT		triac
	vakuumaska dioda		vakuumaska trioda
	tlivka		tlivka s tremi elektrodami
	tiratron		ignitron

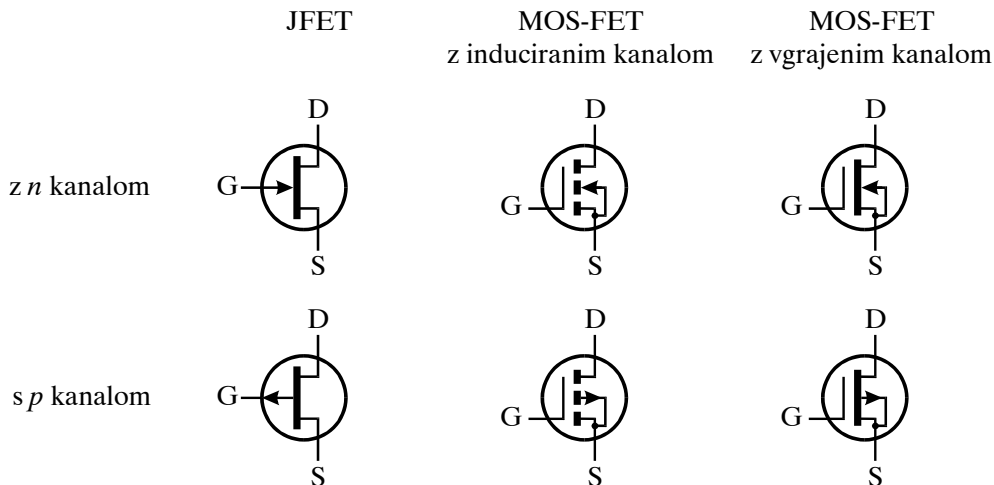
10.8. PREDPONE

<i>predpona</i>	<i>faktor</i>	<i>simbol</i>
exa	10^{18}	E
peta	10^{15}	P
tera	10^{12}	T
giga	10^9	G
mega	10^6	M
kilo	10^3	k
mili	10^{-3}	m
mikro	10^{-6}	μ
nano	10^{-9}	n
piko	10^{-12}	p
femto	10^{-15}	f
ato	10^{-18}	a

UNIPOLARNI TRANZISTORJI

Unipolarnim tranzistorjem pravimo tudi tranzistorji z vplivom polja (FET, angl. field effect transistor). Unipolarni so zato, ker je električni tok v teh tranzistorjih sestavljen le iz večinskih nosilcev naboja. Ta tok teče skozi polprevodniški kanal, ki ima dva priključka: izvor (S, angl. source) in ponor (D, angl. drain). Vhodni priključek, s katerim krmilimo tok skozi kanal, imenujemo vrata (G, angl. gate). Glede na zgradbo vhodnega priključka ločimo dve vrsti unipolarnih tranzistorjev: spojni FET (JFET, angl. junction gate field effect transistor) ter FET z izoliranimi vrati (IGFET, angl. insulated gate field effect transistor), ki ga imenujemo tudi MOSFET (angl. metal-oxide-semiconductor FET). MOSFET tranzistorji se po zgradbi delijo v dva tipa: z induciranim kanalom (angl. enhancement-type) ter z vgrajenim kanalom (angl. depletion-type). Simbole vseh tranzistorjev vidimo na sliki 5.1. Poleg teh poznamo še posebne tipe tranzistorjev, ki so najpogostejše kombinacija med unipolarnimi in bipolarnimi tranzistorji, kot je na primer bipolarni tranzistor z izoliranimi vrati (IGBT, angl. insulated gate bipolar transistor).

Unipolarni tranzistorji imajo – za razliko od bipolarnih – zelo veliko vhodno upornost, ki znaša od $10^6 \Omega$ pri JFET do $10^{14} \Omega$ pri MOSFET.



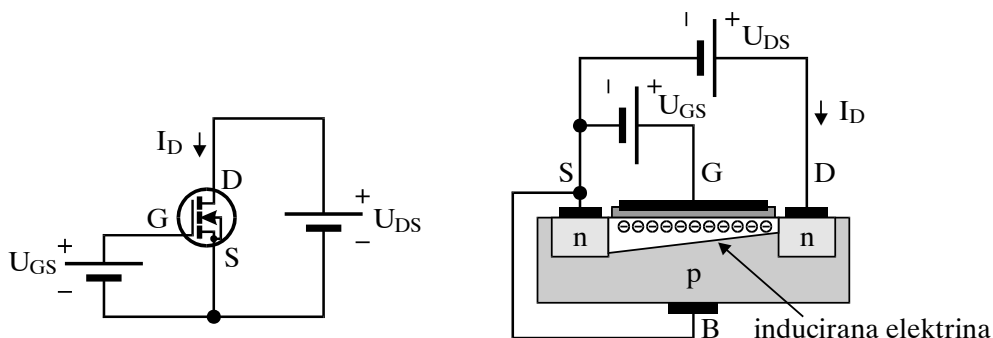
Slika 5.1. Simboli unipolarnih tranzistorjev.

5.1. JFET

Tranzistor sestavlja kanal (na sliki 5.2 *n*-tipa), vmeščen v nasprotni tip polprevodnika (*p*-tip). Na ta polprevodnik, ki oklepa kanal, je spojen vhodni priključek – vrata. Poleg tranzistorjev z *n*-kanalom poznamo tudi tranzistorje s *p*-kanalom.

Ko na kanal priključimo električno napetost U_{DS} , stečejo skozi kanal večinski nosilci (v našem primeru elektroni). Le-ti pritekajo skozi izvor in odtekaajo skozi ponor. Za pravilno delovanje tranzistorja moramo na vhod priključiti napetost tako, da je *pn* spoj med vrati in kanalom polariziran v zaporno smer. Zaradi tega nastane med kanalom in oklepajočim polprevodnikom zaporna plast. Pri tranzistorju z *n*-kanalom mora biti napetost na vratih (U_{GS}) negativnejša, kot je na izvoru.

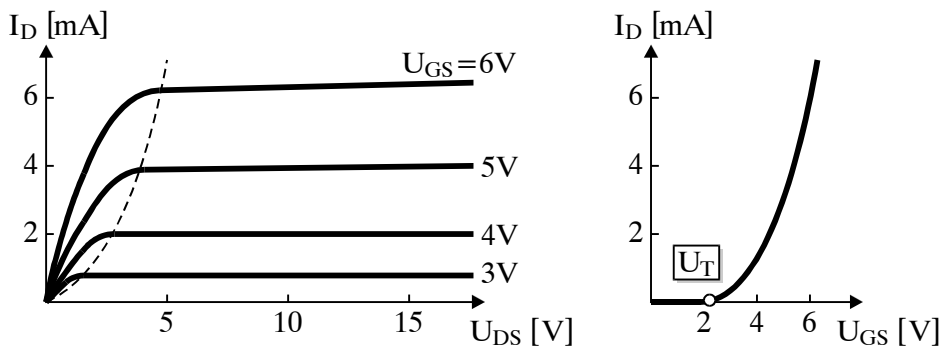
Ko med izvor S in ponor D priključimo električno napetost, bo eden od pn spojev zaporno polariziran (na spodnji sliki to velja za pn spoj ob ponoru). Brez priključene vhodne napetosti teče skozi kanal zanemarljivo majhen tok. Ko med vrati G in izvorom S priključimo napetost, kot kaže slika 5.17, se na elektrodi vrat nabere pozitivna elektrina, v polprevodniku tik pod dielektrikom pa negativna. Če je vhodna napetost dovolj velika, se v kanalu nabere dovolj veliko število negativne elektrine, da začne kanal prevajati. Čim večja je vhodna napetost, tem več elektrine se nabere v kanalu in kanal boljše prevaja.



Slika 5.17. Priključitev MOSFET z induciranim kanalom.

Napetosti na vhodu, pri kateri začne kanal prevajati, pravimo pragovna napetost U_T (angl. threshold voltage). Ko na vhodu dosežemo pragovno napetost, se v kanalu nabere dovolj elektrin, da skozenj steče ponorski tok.

Količina v kanalu induciranih elektrin je odvisna od napetosti med vhodno elektrodo G in kanalom. Ko med izvor S in ponor D priključimo napetost U_{DS} , se v kanalu inducirana elektrina neenakomerno porazdeli. Poglejmo, kaj se dogaja, ko je napetost med vrati in izvorom U_{GS} večja od napetosti med izvorom in ponorom U_{DS} . Napetostna razlika med kanalom in elektrodo vrat G ni povsod enaka (zaradi priključene U_{DS}) in je najmanjša v tistem delu kanala, ki je na višjem potencialu, torej ob ponoru D. V tem delu je zato manj inducirane elektrine. Če napetost U_{DS} sedaj povečujemo, se število elektrin ob ponoru D zmanjšuje. Ko dosežemo določeno vrednost, ki ji pravimo napetost nasičenja U_{DSsat} , je induciranih elektrin pri ponoru D premalo in kanal se tu preščiipne. Če napetost U_{DS} še povečujemo, ponorski tok I_D ne narašča več, temveč ostaja skoraj konstanten.

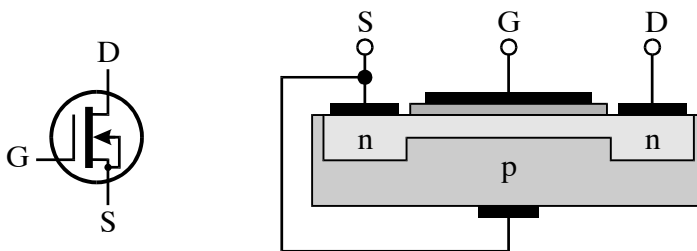


Slika 5.18. Karakteristika MOSFET z induciranim kanalom.

Ko je vhodna napetost dovolj velika, se v kanalu inducira dovolj veliko število elektronov in kanal začne prevajati. Pri napetosti nasičenja med izvorom in ponorom pa se kanal preščiipne. Tu postane ponorski tok skoraj konstanten, odvisen le od vhodne napetosti.

5.2.2. MOSFET z vgrajenim kanalom

MOSFET z vgrajenim kanalom ima med izvorom S in ponorom D vgrajen kanal iz n -tipa polprevodnika. Zaradi tega kanal prevaja tudi, če na vhodu ni napetosti. Pozitivna vhodna napetost na vratih G obogati kanal z negativno elektrino, zato kanal bolje prevaja. Nasprotno pa negativna napetost na vhodnem priključku povzroči osiromašenje kanala (število negativnih elektronov se zmanjša), zato kanal slabše prevaja.



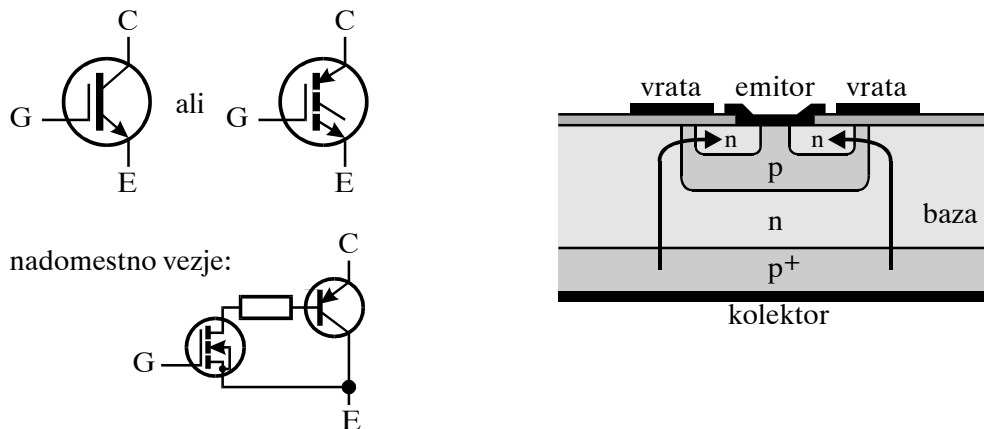
Slika 5.19. MOSFET z vgrajenim kanalom.

Prednost teh vezij je, da se podatki, ko jih vpišemo, ohranijo tudi po izklopu napajalne napetosti. Oznaka ROM (angl. read-only memory) pomeni, da iz njih lahko podatke le beremo, ne moremo pa jih poljubno spreminjati. Kljub temu pa EPROM lahko zberemo, če ga izpostavimo ultravijolični svetlobi. Zato imajo integrirana vezja na površini prozorno odprtino.

FAMOS tranzistor ima izolirana polprevodniška vrata. Ko med izvor in ponor priključimo dovolj visoko napetost, povzročimo plazoviti preboj pn spoja med kanalom in ponorom (slika 5.24). Elektroni, ki prodrejo skozi pn spoj, imajo zaradi velike električne poljske jakosti tolikšno energijo, da zlahka prodrejo tudi skozi tanko izolacijsko plast v izolirana vrata. Zaradi tega se v izolirani elektrodi vrat nabere veliko prostega naboja, ki povzroči, da kanal tranzistorja prevaja. Ker so vrata izolirana, ostanejo elektrine v njej ujete tudi potem, ko izključimo napajalno napetost. S tem, ko v nekatera vrata vnesemo naboj, v druga pa ne, vpišemo v pomnilniško vezje dvojiške podatke. Podatki ostanejo, seveda če jih prej ne zberemo z UV svetlobo, v vezju zapisani za daljši čas.

5.2.8. Tranzistor z izoliranimi vrati ali IGBT

IGBT (angl. insulated-gate bipolar transistor) je tranzistor, sestavljen iz dveh: MOSFET in bipolarnega tranzistorja. Tako združimo prednosti obeh tranzistorjev. IGBT se na vходу obnaša kot MOS tranzistor, na izhodu pa kot bipolarni tranzistor z zelo široko bazo.



Slika 5.27. Simbola in zgradba IGBT.

Ker je vhodna elektroda izolirana kot pri MOSFET, je vhodna upornost tranzistorja zelo velika. Na izhodu, kjer ima IGBT zgradbo bipolarnega tranzistorja, je upornost odprtega tranzistorja zelo majhna. Zaradi tega je majhna tudi izgubna moč tranzistorja.

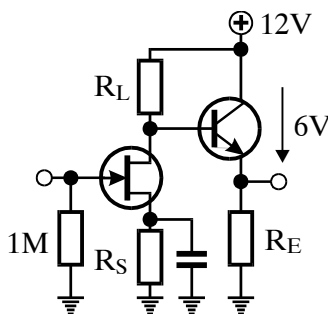
Na sliki 5.27 je tranzistor z n -kanalom. IGBT ima visoke prebojne napetosti ($>500\text{V}$) in omogoča velike gostote toka ($>20\text{A}$). Uporaben je za napetostne pretvornike, močnostne krmilnike ter ojačevalnike. Po času preklopa poznamo počasne in hitre IGBT. Zaradi tanke oksidne plasti zelo visoke vhodne upornosti obstaja nevarnost, da jih uničimo s statično elektriko.

VPRAŠANJA

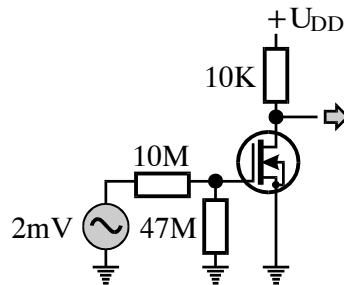
1. V čem se razlikujejo unipolarni tranzistorji od bipolarnih?
2. Kakšna je zgradba JFET? Kako krmilimo ponorski tok pri JFET?
3. Opiši dogajanje v JFET pred zadrgnitvijo kanala in po njej!
4. Kaj je transkonduktanca tranzistorja?
5. Kaj je tok nasičenja JFET I_{DSS} ?
6. Kako lahko uporabimo JFET kot izvor konstantnega toka?
7. Kako stabiliziramo delovno točko pri JFET?
8. Kaj pomeni kratica MOSFET? Kako so MOSFET zgrajeni?
9. Kakšne so lastnosti MOSFET v primerjavi z JFET?
10. Kaj je pragovna napetost?
11. Zakaj moramo biti pazljivi, ko delamo z MOSFET?
12. Kakšna je razlika med MOSFET z induciranim kanalom in MOSFET z vgrajenim kanalom?
13. Kakšno lastnost ima MOSFET z dvoje vrati?
14. Kaj je CMOS, kje ga uporabljamo? Od česa je odvisna potrošnja moči tega vezja?
15. Kaj je IGBT in kakšne lastnosti ima?

NALOGE

1. Izračunaj upornosti uporov R_G , R_D in R_S na sliki 5.8 a) tako, da bo delovna točka tranzistorja na sredini delovne premice ($U_{GS}=U_P/2$). Vrednosti so: $U_{DD}=16\text{V}$, $I_{DSS}=24\text{mA}$, $g_{mo}=12\text{mS}$, $I_D=5\text{mA}$ in $R_{VH}=1\text{M}\Omega$! (Odg.: $1\text{M}\Omega$, $1,2\text{k}\Omega$ in 400Ω)
2. Izračunaj upornosti uporov R_L , R_S in R_E vezja na sliki! Delovna točka bipolarnega tranzistorja naj bo na sredini delovne premice, podatki pa so: $I_D=2\text{mA}$, $U_{GS}=-2\text{V}$, $I_C=6\text{mA}$, $\beta=120$, $U_{CC}=12\text{V}$. (Odg.: $2,58\text{k}\Omega$, $1\text{k}\Omega$, $1\text{k}\Omega$)



3. Izračunaj ojačenje ojačevalnika iz predhodne naloge, če vemo, da ima unipolarni tranzistor $g_{mo}=15\text{mS}$ ter $U_P=-5\text{V}$! (Odg.: -23)
4. Izračunaj vhodno upornost, izhodno upornost in napetostno ojačenje ojačevalnika z JFET v orientaciji s skupnimi vrati, če so: $R_D=6,8\text{k}\Omega$, $R_S=470\Omega$, $I_D=5\text{mA}$, $g_{mo}=14\text{mS}$ in $U_P=-5\text{V}$! (Odg.: 605Ω , $6,8\text{k}\Omega$, 11,2)
5. Izračunaj velikost izhodne napetosti, če je napetost generatorja $U_G=2\text{mV}$ in transkonduktanca tranzistorja $g_m=5\text{mS}$! (Odg.: $82,45\text{mV}$)



KRMILNI POLPREVODNIŠKI ELEMENTI

Krmilni polprevodniški elementi, ki jih bomo opisali v tem poglavju, niso namenjeni ojačenju, temveč krmiljenju tokov v vezju. Narejeni so tako, da imajo dve stanji: vključeno in izključeno. Zato nas bo zanimalo predvsem dogajanje ob vklopu in izklopu elementa.

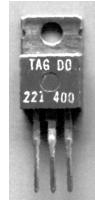
6.1. ENOSPOJNI TRANZISTOR ALI UJT

UJT (angl. unijunction transistor) sestavlja polprevodniški kanal, ki mu pravimo tudi baza, z dvema priključkoma: B_1 in B_2 . Edini pn spoj naredijo z majhnim vložkom p -tipa nekje blizu sredine kanala. Krmilna elektroda, ki je pritrjena na p vložek, se imenuje emitor.

Ko na bazna priključka priključimo napetostni vir U_{BB} , se baza obnaša kot upor. Delovanje v notranjosti UJT si lažje predstavimo na nadomestnem vezju (glej sliko 6.2), ki je sestavljeno iz dveh uporov in diode. Padec napetosti med

6.6. TIRISTOR

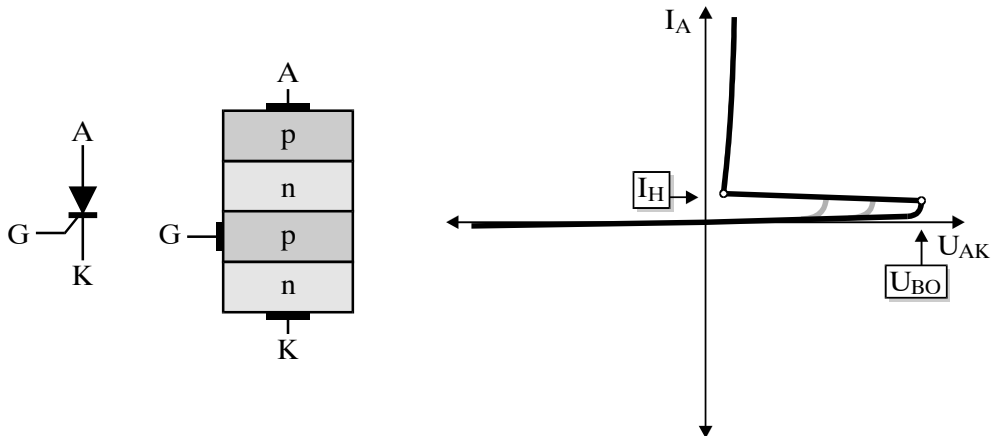
Tiristor ima vlogo krmiljenega stikala. Zaprt toka ne prevaja, lahko pa ga s pomočjo dodatne krmilne elektrode ali vrat G vžgemo in postane prevoden. S tiristorjem krmilimo tok skozi najrazličnejše porabnike, najdemo ga tudi v usmernikih. Tiristorjev je več vrst. Omenili bomo le nekaj najvažnejših.



Slika 6.11. Oblika dveh različnih tiristorjev.

6.6.1. Zaporno neprevodni tiristor ali SCR

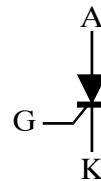
Zaporno neprevodni tiristor (angl. reverse blocking thyristor) ali SCR (angl. silicon-controlled rectifier) je zgrajen iz štirih plasti polprevodnika *pnpn*, na katerih sta priključka anoda A in katoda K. Na notranjem *p*-sloju je dodaten priključek, ki ga imenujemo vrata G.



Slika 6.12. Simbol, zgradba in karakteristika tiristorja.

6.6.4. Zaporno prevodni tiristor ali RCT

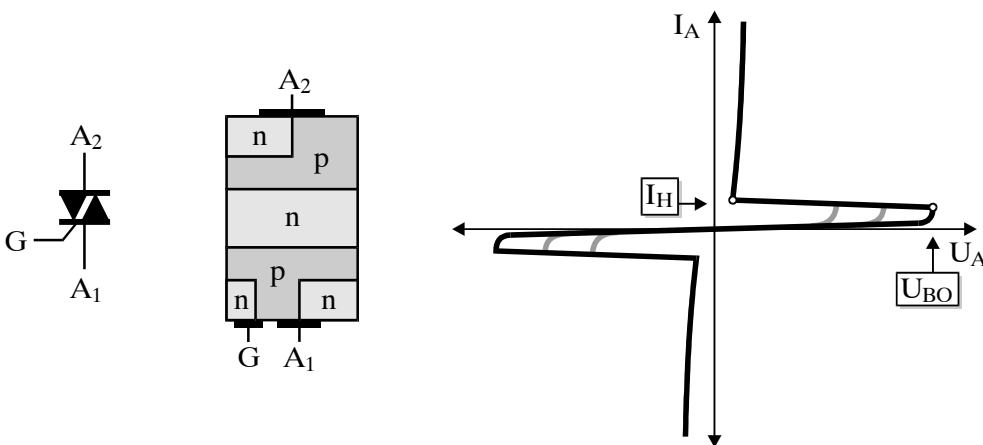
Pri RCT tiristorju (angl. reverse conducting thyristor) je vzporedno dodana dioda, tako da vezje v zaporni smeri sedaj prevaja. RCT največ uporabljamo v pretvornikih z nihajnimi krogi nižjih frekvenc, kjer želimo doseči večje moči.



Slika 6.16.
Simbol RCT.

6.7. TRIAC

Triac si lahko predstavljamo kot dva vzporedno vezana tiristorja, obrnjena vsak v svojo stran. Na ta način lahko triac vključimo (ali vžgemo) v obeh smereh. Osnovna priključka sta ponekod označena kot anoda A in katoda K, drugod kot prva anoda A_1 in druga anoda A_2 . Vhodni priključek je skupen in ga imenujemo vrata G. Vključimo ga lahko tako s pozitivnim kot z negativnim napetostnim impulzom na vhodnem priključku. Ugasnemo ga enako kot tiristor. Ko se anodni tok I_A spusti pod vrednost držalnega toka I_H , se triac sam izključi. Triacov je več vrst, med njimi npr. samoprožilni triac, ki ima na vratih vgrajen diac.

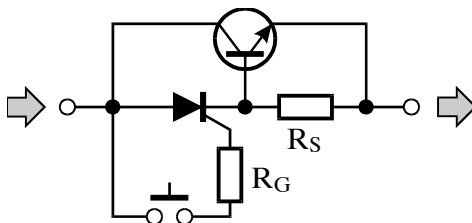


Slika 6.17. Simbol, zgradba in karakteristika triaca.

Triac je po delovanju enak tiristorju, le da prevaja električni tok v obeh smereh. Predstavljamo si ga lahko kot dva tiristorja, ki sta vezana vzporedno, obrnjena vsak v svojo smer.

6.8. NAČIN UPORABE TIRISTORJA IN TRIACA

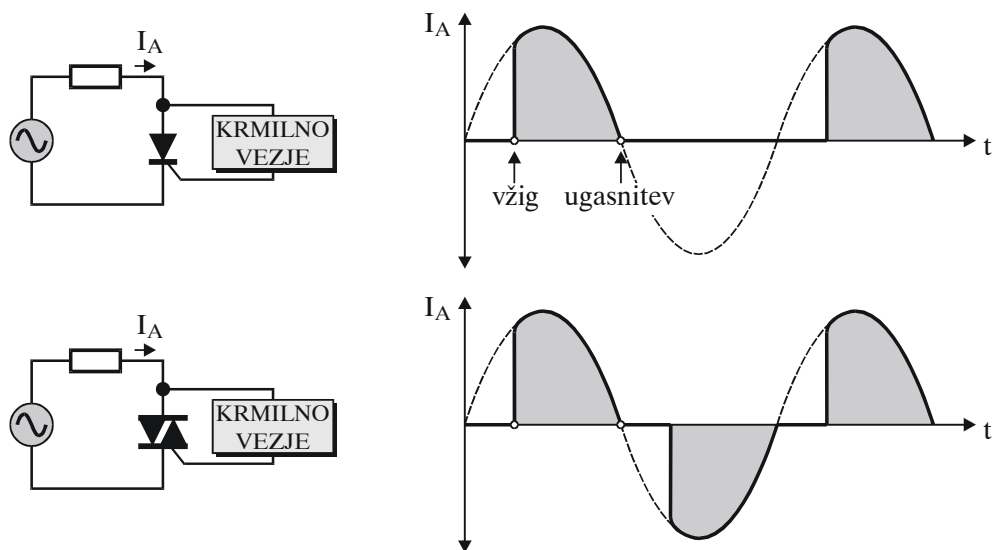
Tiristor in triac lahko v vezju uporabimo kot elektronsko stikalo. V vezju na sliki 6.18 uporabljamo tiristor kot tokovno varovalko. Ko pritisnemo na tipko, steče skozi upor R_G tok, ki vžge tiristor in tok steče skozi breme. Upornost upora R_S je zelo majhna. Ko padec napetosti na tem uporu doseže približno 0,7V, se bipolarni tranzistor odpre. Tok, ki je prej tekel skozi tiristor, steče sedaj skozi tranzistor in tiristor ugasne. Upor R_S izračunamo iz enačbe: $R_S = 0,7V/I_{MAX}$.



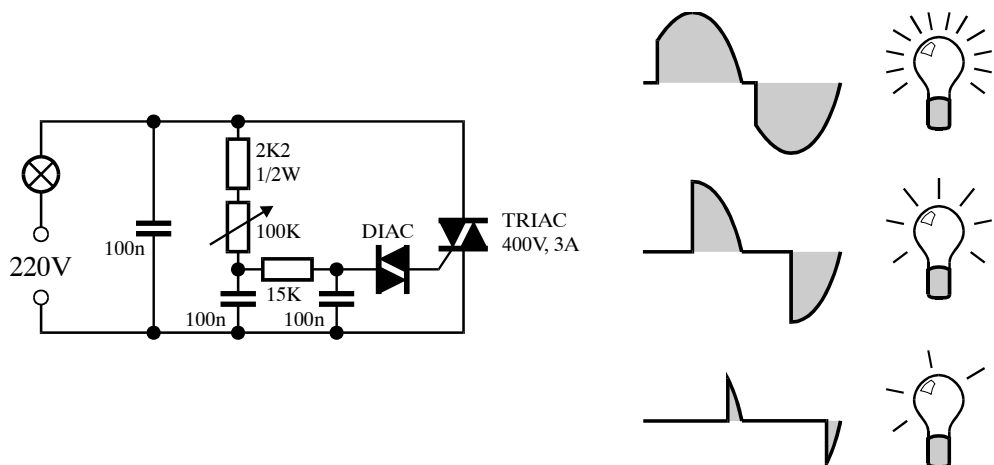
Slika 6.18. Tokovna varovalka.

V izmeničnih tokokrogih lahko potrošnjo moči na porabniku spreminjamo s pomočjo fazne regulacije, ki jo dosežemo s tiristorjem ali triacom. Pri tem spreminjamo čas vklopa vezja v posamezni polperiodi (slika 6.19). Krmilno vezje določa trenutek vklopa tiristorja ali triaca, medtem ko se ugasneta sama vsakokrat, ko izmenična napetost pade na 0.

Primer vezja za regulacije moči na žarnici s fazno regulacijo prikazuje slika 6.20. Triac lahko vžgemo le do polovice polperiode (do 90°), saj se vžge, ko tok na vhodnem priključku **naraste** na določeno vrednost. Regulacijo vklopa v drugi polovici polperiode (ko tok pada) pa dosežemo tako, da s pomočjo RC členov zakasimo napetost na prožilnem elementu. V našem primeru predstavlja vžigni element diac, ki poskrbi za tokovni impulz na vходу triaca.



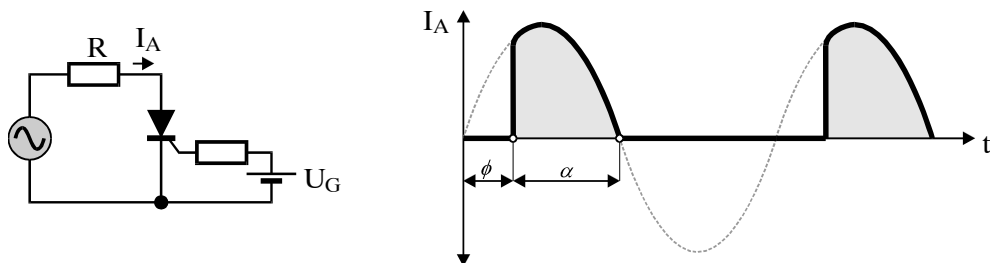
Slika 6.19. Krmiljenje moči na bremenu s pomočjo fazne regulacije.



Slika 6.20. Regulacija moči na žarnici.

Primer

S tiristorjem krmilimo tok skozi ohmsko breme. Napetost U_G na krmilni elektrodi je naravnana tako, da se tiristor vžge pri napetosti $U_{AK}=180\text{V}$. Izračunajmo velikost periode, v kateri teče tok skozi breme (iskano periodo podamo s kotom α). Napajalna napetost je sinusne oblike in znaša $U_{EF}=220\text{V}$.



Pred vžigom tiristorja je tok skozi breme R praktično nič, zato na bremenu ni padca napetost. Tako je v zanki generator-breme-tiristor praktično celoten padec napetosti med anodo in katodo. Tiristor vžge, ko je napajalna napetost enaka vžigni napetosti $U_{AK}=180\text{V}$.

$$U_M = U_{EF} \cdot \sqrt{2} = 220\text{V} \cdot \sqrt{2} = 311\text{V}$$

$$U_{AK} = U_M \cdot \sin(\omega \cdot t) = U_M \cdot \sin \phi$$

$$\sin \phi = \frac{U_{AK}}{U_M} = \frac{180\text{V}}{311\text{V}} = 0,5787$$

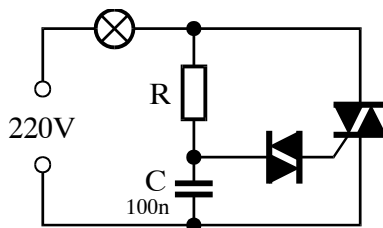
$$\phi = 35^\circ$$

Kot α se začne ob času vžiga in traja, dokler napetost vira ne pade na 0:

$$\alpha = 180^\circ - \phi = \underline{145^\circ}$$

Primer

Izračunajmo upornost upora R , da bo triac vžgal pri zasuku napetosti $\phi=45^\circ$ (diac ima vžigno napetost $U_D=\pm 32\text{V}$)!



Zasuk napetosti, ki jo povzroči RC člen, izračunamo po enačbi:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{R}{X_C} = \omega \cdot C \cdot R$$

Poleg zasuca RC člena je vžig zakasnjjen še zaradi vžigne napetosti diaca, ki znaša:

$$U_M = U_{EF} \cdot \sqrt{2} = 220\text{V} \cdot \sqrt{2} = 311\text{V}$$

$$\sin \alpha = \frac{U_D}{U_M} = \frac{32\text{V}}{311\text{V}} \Rightarrow \alpha = 5,9^\circ$$

Tako znaša zasuk, ki ga mora povzročiti RC člen:

$$\varphi = \phi - \alpha = 45^\circ - 5,9^\circ = 39,1^\circ$$

Sedaj lahko izračunamo upornost upora:

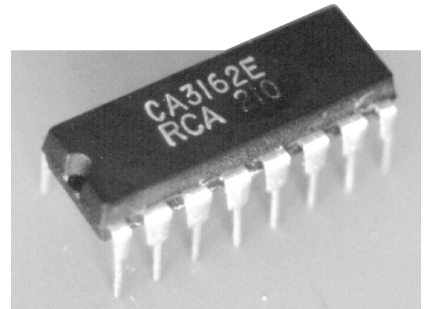
$$R = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\omega \cdot C} = \frac{\operatorname{tg} \varphi}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} = \frac{0,812}{2 \cdot \pi \cdot 50\text{Hz} \cdot 0,1\mu\text{F}} = \underline{25,8\text{k}\Omega}$$

VPRAŠANJA

1. Kakšen je namen krmilnih polprevodniških elementov?
2. Kako pri UJT določimo napetost, ko začne prevajati?
3. Zakaj se PUT imenuje »tranzistor z možnostjo programiranja«?
4. Kako vključimo in izključimo diodni tiristor? Kaj je držalni tok?
5. Kako vključimo in izključimo tiristor? Kakšna je bistvena razlika pri vklopu med diodnim tiristorjem in tiristorjem?
6. Kako je vžigna napetost odvisna od vhodnega toka tiristorja?
7. Kaj je sprostitveni čas pri tiristorju?
8. Kaj se lahko zgodi pri hitri spremembi napetosti med anodo in katodo tiristorja?
9. Zakaj proizvajalci podajajo največjo dovoljeno strmino naraščanja toka tiristorja?
10. Kako deluje tetrodni tiristor ali SCS?
11. Kakšna je razlika med tiristorjem in triacom?
12. Kaj je fazna regulacija moči?

LINEARNA INTEGRIRANA VEZJA

Integrirana vezja so vezja, sestavljena iz več elementov, ki so vsi izdelani na skupnem polprevodniku (substratu) ali na skupni izolacijski podlagi. Integrirano vezje je zaprto v ohišju s podnožjem. Izdelujejo jih z različnimi tehnološkimi postopki: tako ločimo monolitna, tankoplastna, debeloplastna in hibridna integrirana vezja.



Pri monolitnem integriranem vezju so vsi elementi izdelani na enem kosu polprevodnika. Med seboj so spojeni s tanko kovinsko plastjo na površini polprevodnika.

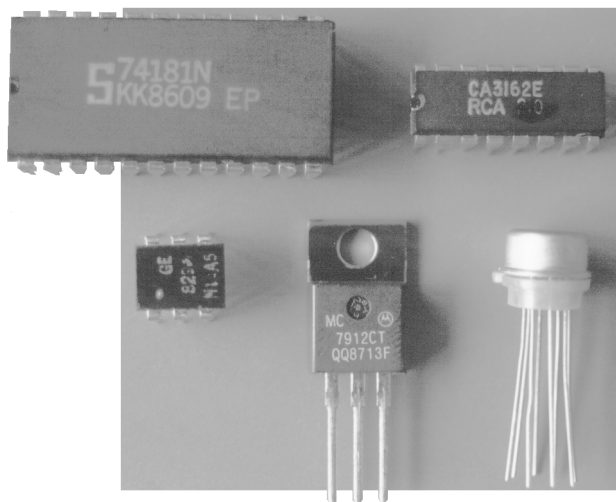
Pri tankoplastnem integriranem vezju (angl. thin-film) so pasivni elementi izdelani iz različnih uporabnih in prevodnih plasti, ki so nanešene na izolacijsko podlago. Posamezne elemente izdelajo s pomočjo selektivnega odstranjevanja z jedkanjem.

Debeloplastno integrirano vezje (angl. thick-film) se razlikuje od tankoplastnih po tem, da so elementi na podlago natiskani. S postopkom sitotiska nanašajo na osnovo paste, ki imajo določene prevodne lastnosti. Ko ploščico segrevajo, organske snovi v pasti zgorejo in pasta otrdi.

Hibridno integrirano vezje predstavlja kombinacijo med omenjenima tehnologijama. Ker s tankoplastno in debeloplastno tehnologijo ne moremo izdelati polprevodniških elementov (diod, tranzistorjev in ostalih), so le-ti izdelani z monolitno tehnologijo in dodani v vezje. Vse skupaj še zaprejo v skupno ohišje s podnožjem.

Poznamo monolitno, tankoplastno, debeloplastno in hibridno tehnologijo integriranih vezij. Z monolitno tehnologijo izdelujemo elemente v polprevodniku, s tankoplastno in debeloplastno pa pasivne elemente (predvsem upore) na ploščici iz izolanta.

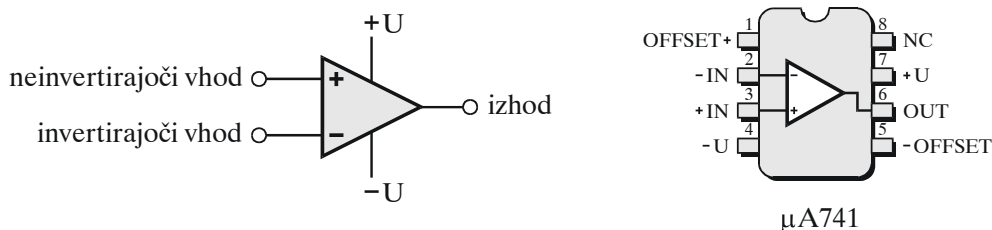
Linearna integrirana vezja služijo za obdelavo ali generiranje analognih signalov. Poznamo tudi digitalna integrirana vezja, ki služijo za obdelavo in generiranje digitalnih signalov. Tipičen predstavnik linearnih integriranih vezij, ki ga zelo pogosto srečujemo, je operacijski ojačevalnik, zato si ga bomo podrobneje ogledali.



Slika 7.1. Različne oblike ohišij monolitnih integriranih vezij.

7.1. OPERACIJSKI OJAČEVALNIK

Operacijski ojačevalniki so ojačevalniki v integrirani izvedbi. Tranzistorji operacijskega ojačevalnika so med seboj direktno vezani (ni sklopnih kondenzatorjev), kar pomeni, da lahko ojačajo tako enosmerne kot izmenične signale. Ojačevalniki imajo dva vhodna priključka, ki jima pravimo neinvertirajoči (angl. non inverted) in invertirajoči (angl. inverted) vhod. Kot že imeni povesta, bo signal, priključen na neinvertirajoči vhod, na izhodu v fazi, signal, priključen na invertirajoči vhod, pa v protifazi z vhodnim. Prvi vhod je zato označen s »+«, drugi pa z »-«.



Slika 7.2. Operacijski ojačevalnik.

Operacijski ojačevalnik ima poleg vhodov še en izhodni priključek ter priključka za napajanje. Poleg teh srečamo še priključke, ki služijo za napetostno izravnavo ter frekvenčno kompenzacijo.

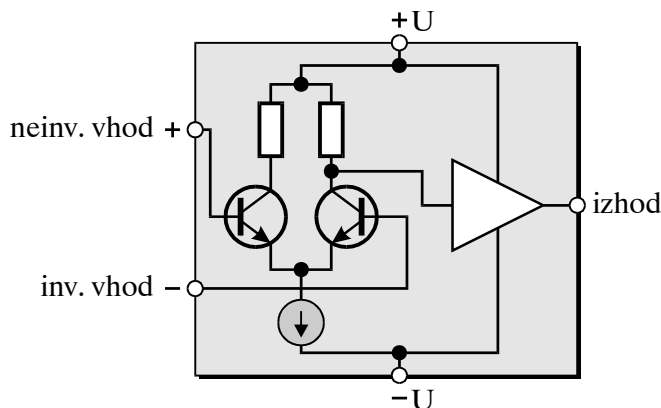
7.1.1. Lastnosti operacijskega ojačevalnika

Električne lastnosti operacijskega ojačevalnika so naslednje:

- zelo velika vhodna upornost,
- zelo nizka izhodna upornost,
- zelo veliko napetostno ojačenje (10^4 do 10^5),
- protifazne signale na obeh vhodih ojača, medtem ko sofazne slabi.

Na vhodu operacijskega ojačevalnika je diferencialni ojačevalnik (glej tudi str. 106), zato ojača le razliko napetosti na obeh vhodih. Sofazni signali so

oslabljeni, kar nam pove tudi zelo velik rejekcijski faktor CMRR, ki podaja razmerje med protifaznim in sofaznim ojačenjem v dB (decibelih).



Slika 7.3. Notranjost operacijskega ojačevalnika.

S pomočjo povratnih zank lahko lastnost ojačevalnika prilagodimo namenu uporabe: za ojačevalnike, primerjalnike, za izvajanje najrazličnejših linearnih funkcij (seštevanje, odštevanje, množenje, logaritmiranje, odvajanje, integriranje, itd.), za generiranje najrazličnejših signalov in podobno.

Operacijski ojačevalnik je ojačevalnik v integriranem vezju. Ima dva vhoda: če priključimo vhodni signal na prvega, ki mu pravimo neinverzirajoči vhod, dobimo na izhodu ojačan signal v fazi z vhodnim. Če priključimo vhodni signal na drugega, ki mu pravimo invertirajoči vhod, dobimo prav tako ojačan signal, toda v protifazi z vhodnim. Operacijski ojačevalnik ima zelo veliko ojačenje, veliko vhodno upornost in zelo majhno izhodno upornost.

7.1.2. Invertirajoči ojačevalnik

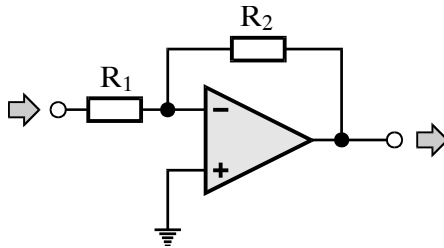
Če je operacijski ojačevalnik vezan kot invertirajoči ojačevalnik, je vhod na invertirajočem priključku. To pomeni, da bo izhodni signal v protifazi z vhodnim. Povratno zanko izvedemo s pomočjo dveh uporov, ki znižata ojačenje ojačevalnika. Taki vezavi pravimo negativna povratna vezava.

Predpostavimo, da je napetostno ojačenje operacijskega ojačevalnika neskončno veliko, ravno tako tudi vhodna upornost. Potem je napetost na invertirajočem priključku enaka:

$$U_{INV} = \frac{U_{IZH}}{A_U} = \frac{U_{IZH}}{\infty} = 0$$

Zaradi tega je tok, ki priteka iz vhoda skozi upor R_1 , enak ali nasproten toku, ki priteka iz izhoda skozi upor R_2 :

$$I_{VH} = -I_{R2} \quad \text{ali} \quad \frac{U_{VH}}{R_1} = -\frac{U_{IZH}}{R_2}$$



Slika 7.4. Vezje invertirajočega ojačevalnika.

Ker je ojačenje razmerje med izhodno in vhodno napetostjo, dobimo rešitev:

$$A_U = -\frac{R_2}{R_1}$$

Negativen predznak pomeni, da je izhodni signal v protifazi z vhodnim. Če pa želimo upoštevati še dejansko napetostno ojačenje operacijskega ojačevalnika, ki ima končno vrednost, se enačba glasi:

$$A_U = \frac{A_{OP}}{1 + A_{OP} \cdot \frac{R_1}{R_2}}$$

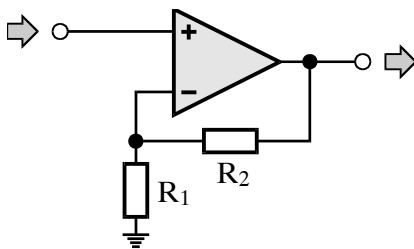
7.1.3. Neinvertirajoči ojačevalnik

Ko je vhod vezan na neinvertirajoči priključek, je izhodni signal v fazi z vhodnim. Negativna povratna vezava je ponovno narejena iz dveh uporov R_1 in R_2 . Ker želimo negativno povratno vezavo, mora izhodni signal pritekati na invertirajoči vhod.

Če spet predpostavimo idealne razmere, je napetost med vhodnima priključkoma enaka 0. Zato je vhodna napetost enaka padcu napetosti na upor R_1 . Izhodna napetost pa je enaka padcu napetosti na obeh uporih R_1 in R_2 :

$$U_{VH} = I \cdot R_1$$

$$U_{IZH} = I \cdot (R_1 + R_2)$$



Slika 7.5. Vezje neinvertirajočega ojačevalnika.

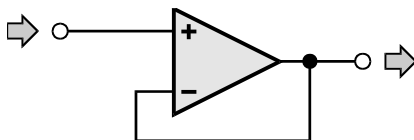
Napetostno ojačenje je sedaj:

$$A_U = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Če želimo upoštevati še končno ojačenje operacijskega ojačevalnika, uporabimo enačbo:

$$A_U = \frac{A_{OP}}{1 + A_{OP} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}}$$

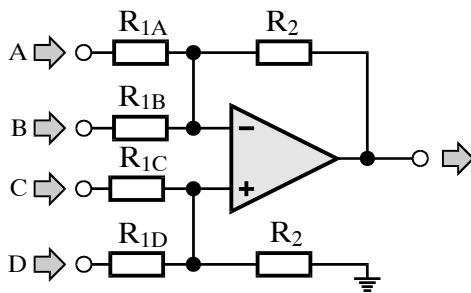
Če upor R_1 odvezamemo, namesto upora R_2 pa naredimo kratek spoj, potem dobimo ojačevalnik, ki ima ojačenje 1. Rečemo mu napetostni sledilnik (angl. voltage follower). Izhodna napetost je popolnoma enaka vhodni; vhodna upornost je zelo velika, izhodna pa zelo majhna.



Slika 7.6. Vezje napetostnega sledilnika.

7.1.4. Seštevalnik in odštevalnik

Ko priključimo napetosti na oba vhoda operacijskega ojačevalnika, dobimo na izhodu napetost, ki je za napetostno ojačenje večja od razlike obeh napetosti na vhodu. Na ta način lahko naredimo vezje, ki seštevja in odšteva napetosti na vhodu. Primer takega vezja vidimo na sliki 7.7. Izhodna napetost je sorazmerna seštevku vhodnih napetosti U_A in U_B in razliki vhodnih napetosti U_C in U_D .



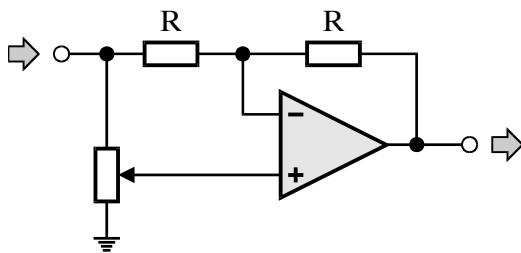
Slika 7.7. Vezje seštevalnika in odštevalnika napetosti.

Napetost na izhodu tega vezja je enaka:

$$U_{IZH} = -R_2 \cdot \left(\frac{U_A}{R_{1A}} + \frac{U_B}{R_{1B}} - \frac{U_C}{R_{1C}} - \frac{U_D}{R_{1D}} \right)$$

7.1.5. Sprememba koeficienta ojačenja

S pomočjo potenciometra v vezju na sliki 7.8 lahko poleg spremembe ojačenja spremenimo tudi polariteto izhodnega signala.



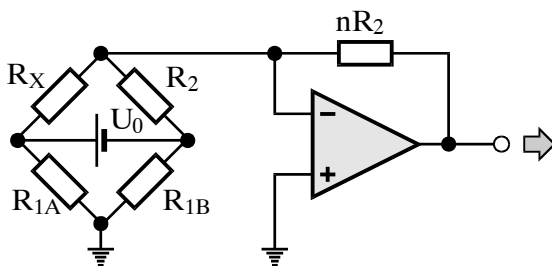
Slika 7.8. Vezje za spremembo koeficienta ojačenja.

Ko je drsnik potenciometra na skrajni spodnji točki ($n=0$), se ojačevalnik obnaša kot invertirajoči ojačevalnik z ojačenjem 1. Ko pa drsnik pomaknemo v skrajno zgornjo lego ($n=1$), se ojačevalnik obnaša kot neinvertirajoči ojačevalnik z ojačenjem 1. Enačba izhodne napetosti je:

$$U_{IZH} = (2 \cdot n - 1) \cdot U_{VH}$$

7.1.6. Mostični ojačevalnik

Operacijski ojačevalnik lahko uporabimo za ojačevanje napetostne razlike, ki se pojavi v mostičnem vezju. Mostično vezje, sestavljeno iz štirih uporov, je v ravnotežju, ko velja: $R_X/R_2 = R_{1A}/R_{1B} = 1$. Takrat sta oba vhoda operacijskega ojačevalnika na enakem potencialu in izhodna napetost je 0.



Slika 7.9. Vezje z mostičnim ojačevalnikom.

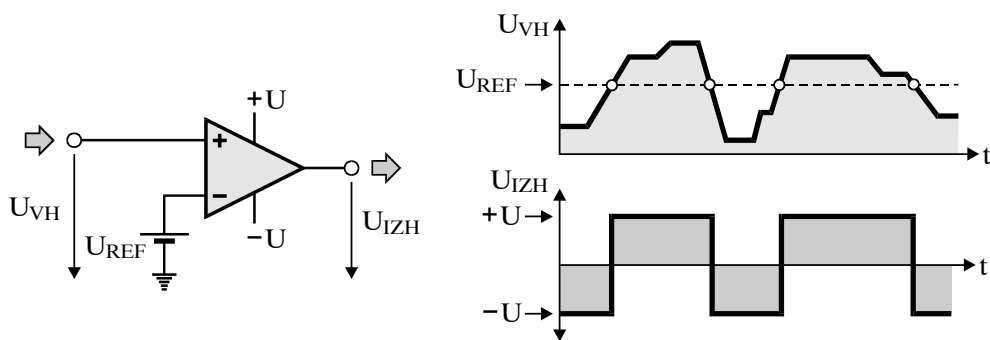
Enačba za izhodno napetost je v tem primeru:

$$U_{IZH} = U_0 \cdot \frac{n}{2} \cdot \frac{R_X - R_2}{R_X + R_2},$$

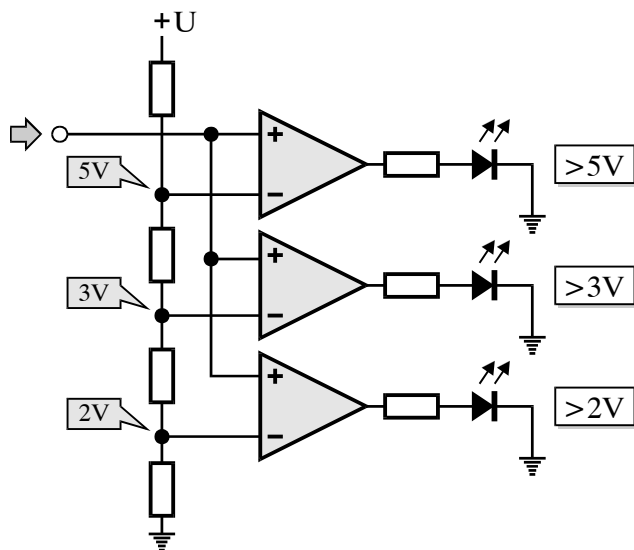
kjer nam n pove, kolikokrat je upornost upora v povratni zanki (nR_2) večja od upornosti upora R_2 v mostičku.

7.1.7. Primerjalnik

Operacijski ojačevalnik ima zelo veliko napetostno ojačenje. Če ojačenja ne znižamo s pomočjo negativne povratne zanke, je izhodna napetost vedno maksimalna in sicer pozitivna, če je napetost na neinvertirajočem vhodu večja od napetosti na invertirajočem, in negativna, če je napetost na neinvertirajočem vhodu manjša od napetosti na invertirajočem. Zaradi tega ojačevalnik uporabljamo kot primerjalnik (angl. comparator). Na izhodu operacijskega ojačevalnika brez povratne vezave dobimo lahko le dve vrednosti napetosti.



Slika 7.10. Vezje napetostnega primerjalnika.

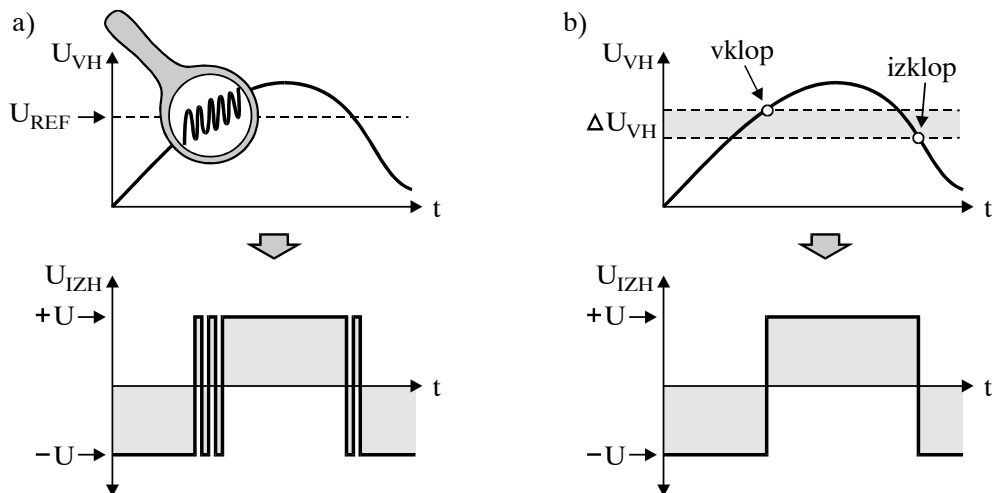


Slika 7.11. Vezje za detektiranje različnih nivojev napetosti tremi LED.

Praktičen primer uporabe primerjalnikov je na sliki 7.11. Trije primerjalniki z operacijskim ojačevalnikom krmilijo LED, ki zasvetijo, ko vhodna napetost preseže napetost na neinvertirajočem vhodu. Delilnik napetosti, sestavljen iz uporov, omogoči primerjalne napetosti (2, 3 in 5V). Prva (spodnja) zasveti, ko vhodna napetost preseže 2V, prva in druga pri 3V in vse tri, ko vhodna napetost preseže 5V.

7.1.8. Primerjalnik s histerezo

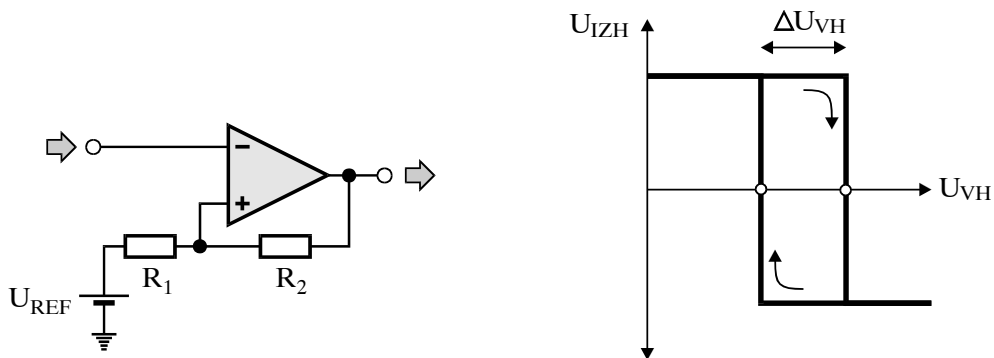
Če vsebuje vhodni signal motnje (slika 7.12 a), lahko to pripelje do nezaželenih preklopov. Ko motnje povzročijo nihanje napetosti okrog primerjalne (ali referenčne) napetosti v trenutku preklopa, se namesto enega preklopa zgodi veliko število preklopov.



Slika 7.12. Posledica motenega vhodnega signala na primerjalniku a) ter odprava motenj s pomočjo različnih napetostnih nivojev b).

Nevšečnosti se izognemo tako, da ločimo napetostni nivo vklopa od napetostnega nivoja izklopa, kot vidimo na sliki 7.12 b). Vklon primerjalnika se zgodi pri nekoliko višji vhodni napetosti kot izklop. Takemu vezju pravimo tudi Schmittov prožilnik (angl. Schmitt trigger).

Razlika v nivoju preklopnih napetostih nastane zaradi pozitivne povratne zanke z uporoma R_1 in R_2 . Ko je na izhodu pozitivna napetost (visok izhodni nivo), je zaradi uporov višja napetost tudi na neinvertirajočem vhodu. Primerjalnik preklopi v nizek izhodni nivo šele, ko vhodna napetost na invertirajočem vhodu preseže napetost na neinvertirajočem.



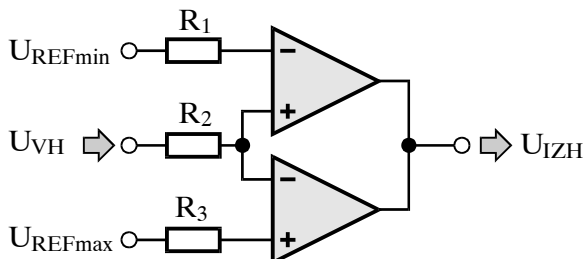
Slika 7.13. Vezje primerjalnika s histerezo.

Ko je na izhodu negativna napetost (nizek izhodni nivo), napetost na neinvertirajočem vhodu zaradi padcev napetosti na uporih pade. Primerjalnik preklopi spet v visok izhodni nivo šele, ko vhodna napetost pade pod napetost na neinvertirajočem vhodu. Razlika v preklopnih nivojih preprečuje nezaželjene preklope zaradi motenj. V diagramu na sliki 7.13 vidimo razliko v napetostnih nivojih v obliki histerezne zanke, ki je podana z enačbo:

$$\Delta U_{VH} = \Delta U_{IZH} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

7.1.12. Okski diskriminator

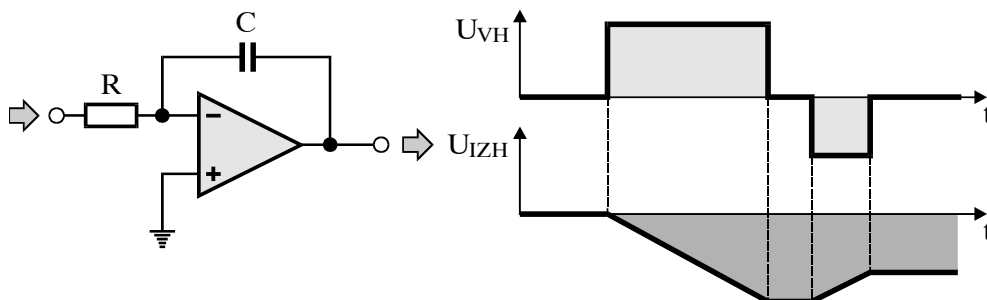
Diskriminator deluje tako, da je izhodni nivo nizek takrat, ko je vhodna napetost med vrednostima $U_{REFmin} < U_{VH} < U_{REFmax}$; če pa vhodna napetost ne pade v to področje (»okno«), je na izhodu visok nivo. Vezje sestavljata dva operacijska ojačevalnika. Prvi primerja z nižjo referenčno vrednostjo, drugi pa z višjo. Prvi mora imeti vhod na neinvertirajočem vhodu, drugi pa na invertirajočem.



Slika 7.17. Vezje okskega diskriminatorja.

7.1.13. Integrator

Integriranje je matematična operacija, s pomočjo katere izračunamo ploščino tiste površine, ki jo oklepata funkcija in abscisa (x-os). Oglejmo si funkcijo, ki je odvisna od časa (npr. odvisnost U_{VH} od časa, slika 7.18). Kjer ima krivulja pozitivne vrednosti (nad absciso), tam ploščina s časom narašča, pri negativnih vrednostih (pod absciso) pa ploščina pada. Kjer ima funkcija vrednost 0, se ploščina ne spreminja. V določenem časovnem intervalu je torej integral te funkcije sorazmeren ploščini, ki jo funkcija v intervalu oklepa z absciso.



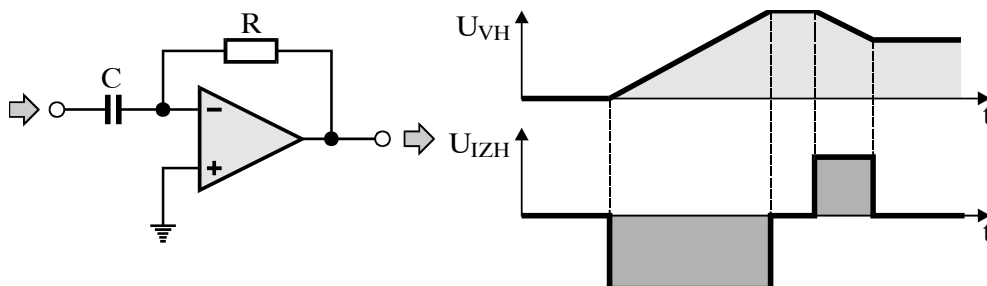
Slika 7.18. Vezje integratorja.

Konstantna pozitivna napetost na vhodu povzroči konstanten polnilni tok skozi kondenzator, ki se enakomerno polni, zato se napetost na izhodu vezja

enakomerno viša. Podobno se kondenzator prazni, če je na vhodu negativna napetost. Ker je vhod vezan na invertirajočem sponko je izhodni signal obrnjen – kjer bi matematično izračunali pozitivno ploščino, dobimo pri danem vezju negativno napetost (torej negativno ploščino), in obratno.

7.1.14. Diferenciator

Diferenciranje (ali odvajanje) je matematična operacija, s pomočjo katere ugotovimo hitrost spreminjanja določene funkcije. Če vrednost funkcije narašča, je odvod pozitiven in po velikosti enak hitrosti spremembe. Odvod je po predznaku negativen, če vrednost funkcije pada. Ko pa se vrednost funkcije ne spreminja, je odvod enak 0.



Slika 7.19. Vezje diferenciatorja.

Hitrejša sprememba vhodne napetosti požene skozi kondenzator večji tok, ta pa povzroči višjo napetost na izhodu vezja. Ker je signal pripeljan na invertirajoči vhod, je izhodni signal, podobno kot pri integratorju, obrnjen.

7.1.15. Značilni podatki operacijskega ojačevalnika

Proizvajalci navajajo poleg splošnih omejitev (toka, napetosti, izgubne moči, delovne temperature in podobno) še naslednje podatke, ki so značilni za operacijske ojačevalnike:

$$R_3 = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 9,8 \text{ k}\Omega$$

Kondenzatorja C_1 in C_2 vplivata na spodnjo mejno frekvenco:

$$f_L = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot C \cdot R},$$

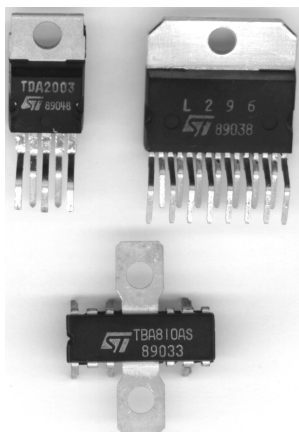
zato sta kapacitivnosti kondenzatorjev enaki:

$$C_1 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_L \cdot R_1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 60 \text{ Hz} \cdot 10 \text{ k}\Omega} = 265 \text{ nF}$$

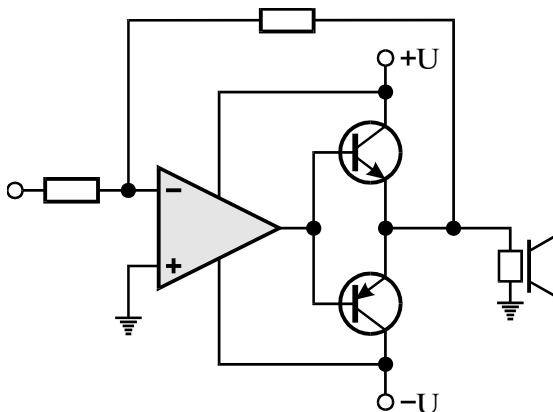
$$C_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_L \cdot R_L} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 60 \text{ Hz} \cdot 1 \text{ k}\Omega} = 2,65 \mu\text{F}$$

7.2. MOČNOSTNI INTEGRIRANI OJAČEVALNIKI

Močnostni operacijski ojačevalniki imajo na izhodu močnostne tranzistorje ter boljši sistem za odvajanje toplote. Nekateri imajo že vgrajeno hladilno kovinsko ploščico, da jih lažje pritrdimo na hladilno rebro. Zaradi nevarnosti preobremenitve imajo notranjo zaščito pred kratkim stikom in pred toplotno preobremenitvijo.

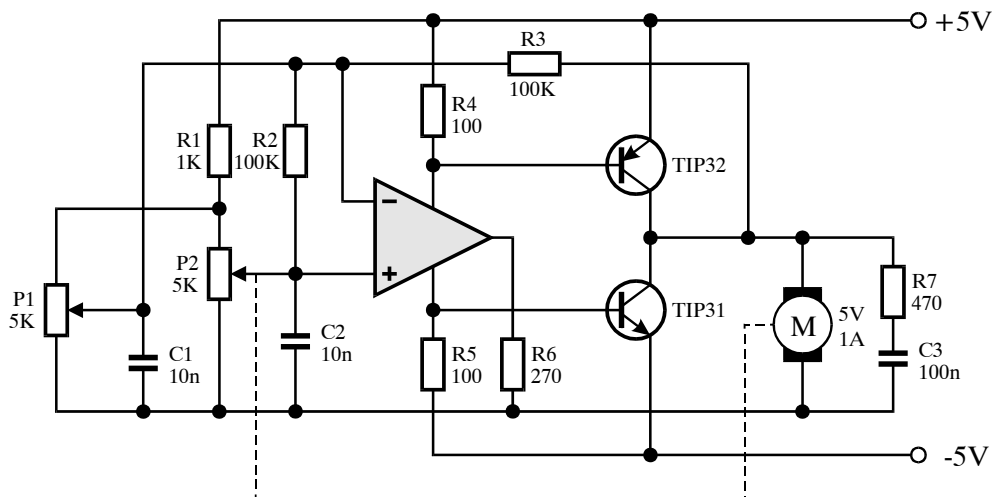


Slika 7.25. Ohišja močnostnih integriranih ojačevalnikov so narejena tako, da jih lažje pritrdimo na hladilno telo.



Slika 7.29. Močnostni ojačevalnik s končnima tranzistorjema.

S pomočjo vezja na sliki 7.30 krmilimo elektromotor, s katerim lahko natančno nastavljamo položaj (obračamo npr. anteno). Elektromotor in potenciometer P_2 sta zato mehansko povezana. Ko premaknemo potenciometer P_1 , se premakne elektromotor toliko, da se položaja obeh potenciometrov izenačita.



Slika 7.30. Vezje za pogon elektromotorja.

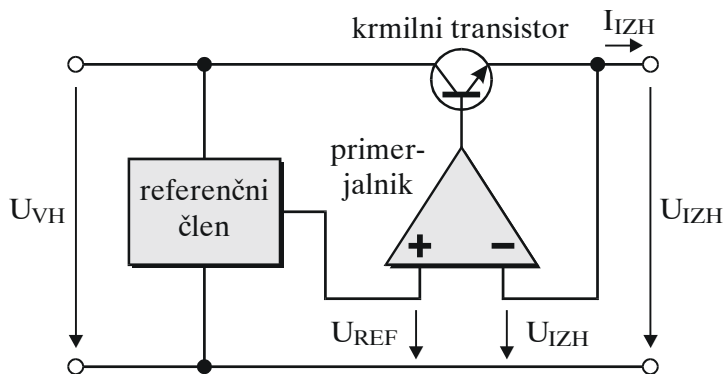
Če vezje bolje pogledamo, vidimo, da sta izhodna tranzistorja vezana na napajalne sponke operacijskega ojačevalnika. V samem operacijskem ojačevalniku imamo na izhodu dva komplementarna tranzistorja (glej npr. sliko 4.58), ki sta

povezana na pozitivno in negativno napajanje. Dejansko je torej upor R_4 vezan na kolektor prvega od teh (notranjih) tranzistorjev, upor R_5 pa na drugega. Če prevaja prvi, se na R_4 pojavi padec napetosti in prevajati začne tudi tranzistor TIP32. Podobno se zgodi s tranzistorjem TIP31, če teče tok skozi R_5 . Upora R_4 in R_5 izberemo tako, da sta tranzistorja TIP31 in TIP32 pri mirovnem toku operacijskega ojačevalnika še zaprta. Pri opisani vezavi pa moramo biti pozorni, da ne uporabimo take izvedbe operacijskega ojačevalnika, ki ima v istem ohišju več operacijskih ojačevalnikov (ki so vsi vezani na isto napajanje). Če bi sedaj uporabili enega od teh ojačevalnikov za vezje s slike 7.30, drugega pa v nekem drugem vezju, bi prišlo takoj, ko bi npr. stekel tok skozi upor R_4 , v drugem operacijskem ojačevalniku do nedopustnega padca napajalne napetosti.

7.3. NAPETOSTNI REGULATORJI

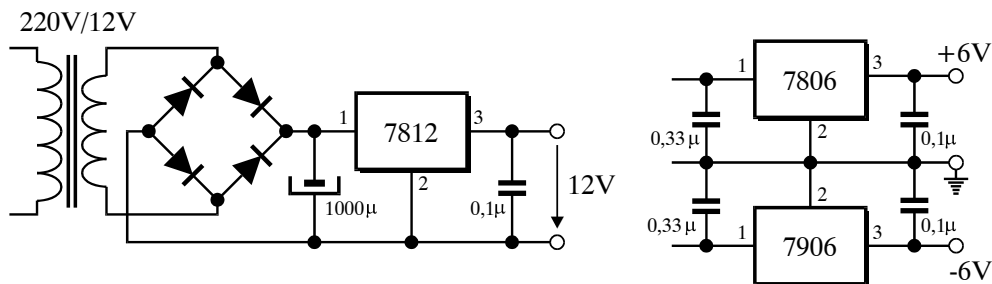
Monolitni napetostni regulatorji služijo za stabilizacijo napetosti napajalnega vira. Narejeni so lahko za točno določene napetosti, pri nekaterih pa izhodno napetost spreminjamo s pomočjo zunanjih elementov. V grobem vsebujejo referenčni napetostni vir z zelo stabilno napetostjo, primerjalnik in krmilni tranzistor. Poleg tega imajo običajno še tokovno in toplotno zaščito.

Primerjalnik primerja referenčno napetost z napetostjo na izhodu. Če je izhodna napetost manjša, potem primerjalnik odpira krmilni tranzistor, ki se mu zato poveča kolektorski in emitorski tok. Nasprotno pa pri večji napetosti na izhodu primerjalnik zapira krmilni tranzistor.



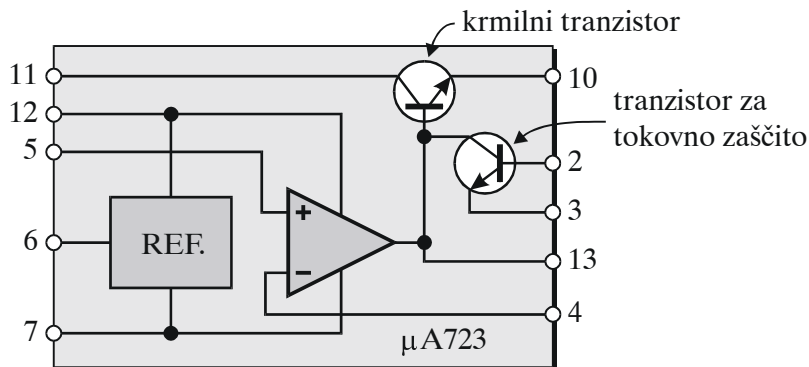
Slika 7.31. Shema splošnega napetostnega regulatorja.

Integrirana vezja 78XX in 79XX so napetostni regulatorji s tremi priključki. Regulatorje z oznako 78 priključimo na pozitivno vejo, z oznako 79 pa na negativno vejo usmernika. Dodatna številka XX pomeni velikost izhodne napetosti (npr. 7812 poskrbi za izhodno napetost 12V).



Slika 7.32. Napetostni regulatorji s tremi priključki.

Integrirano vezje $\mu A723$ je napetostni regulator, ki ima dostop do vseh notranjih členov. Vezje zato lahko prilagajamo uporabi. Sestavljajo ga referenčni člen konstantne napetosti (7,15V), primerjalnik, krmilni tranzistor in tranzistor za tokovno zaščito.



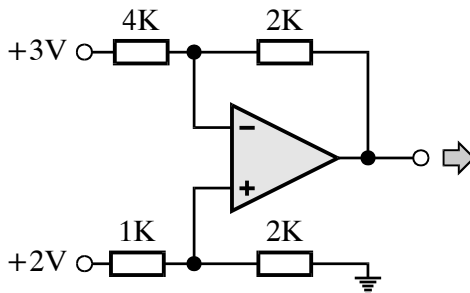
Slika 7.33. Shema integriranega vezja $\mu A723$.

VPRAŠANJA

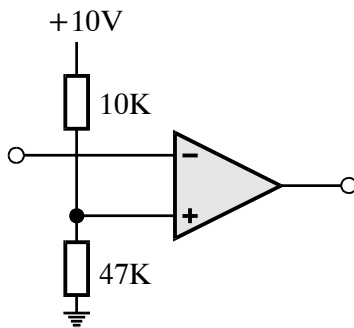
1. Kako delimo integrirana vezja glede na tehnologijo?
2. Kaj je monolitno integrirano vezje?
3. Ali lahko s tankoplastno tehnologijo izdelamo ojačevalnik? Obrazloži?
4. Kakšne so osnovne lastnosti operacijskega ojačevalnika?
5. Zakaj ima operacijski ojačevalnik dva vhoda?
6. Poleg dveh vhodnih, izhodnega in dveh napajalnih priključkov ima operacijski ojačevalnik lahko še nekaj dodatnih priključkov. Čemu služijo?
7. Kaj je napetostni sledilnik?
8. Kakšna je prednost primerjalnika s histerezo v primerjavi z navadnim primerjalnikom?
9. Kaj je izravnalni tok in kaj je izravnalna napetost?
10. Čemu je enak CMRR?
11. Zakaj moramo kompenzirati vhodni tok operacijskega ojačevalnika?
12. Kako deluje mostični ojačevalnik?
13. Kako deluje (zaporedni) napetostni regulator? Kaj pomeni oznaka 7905?
14. Kaj je referenčni člen in čemu služi?
15. Kaj je VLSI?
16. Kaj dosežemo z difuzijo primesi?
17. Kakšno vlogo ima oksidacija površine polprevodnika?
18. Kako poteka metalizacija površine polprevodnika? Čemu služi?

NALOGE

1. Nariši in izračunaj R_I , R_2 , R_K , C_{VH} in C_{IZH} invertirajočega ojačevalnika. Podatki: $R_{VH}=1\text{k}\Omega$, $A_U=-100$, $f_L=25\text{Hz}$ ter breme $R_L=1\text{k}\Omega$! (Odg.: $1\text{k}\Omega$, $100\text{k}\Omega$, 990Ω , $6,3\mu\text{F}$, $6,3\mu\text{F}$)
2. Na sliki je vezje odštevalnika z vhodnima napetostima $+3\text{V}$ in $+2\text{V}$. Izračunaj, kolikšna je izhodna napetost! (Odg.: $+2,5\text{V}$)



3. Kolikšna mora biti napetost referenčnega vira in upornost upora R_2 primerjalnika s histerezo, da bo nivo vklopa pri vhodni napetosti $2,4\text{V}$ in nivo izklopa pri $2,0\text{V}$ (glej sliko 7.13)? Izhodna napetost niha med $+6$ in -6V , upornost $R_I=1\text{k}\Omega$. (Odg.: $2,2\text{V}$, $29\text{k}\Omega$)
4. Ugotovi, pri kateri vhodni napetosti primerjalnik na sliki preklopi! V katerem primeru je na izhodu visok nivo (pozitivna napetost): ko je vhodna napetost večja ali manjša od primerjalne? (Odg.: $8,24\text{V}$, manjša)



DODATEK

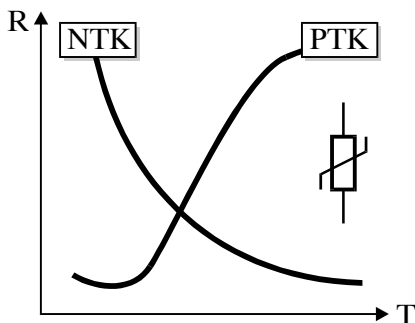
V tem poglavju bomo spoznali nekatere elemente, ki jih pogosto srečujemo in so zato vredni omembe. Predvsem bomo omenili električne pretvornike, ki jih uporabljamo tam, kjer želimo najrazličnejše veličine pretvoriti v električno. Tako lahko spremljamo spremembo temperature, jakosti svetlobe, mehanske spremembe, spremembe tlaka, jakost in smer magnetnega polja, razdalje, pretoke, sevanje in podobno.

9.1. TERMoeLEKTRIČNI PRETVORNIKI

S pomočjo termoelektričnih pretvornikov pretvarjamo velikost in spremembo temperature v električni signal. Uporabljamo jih za meritev temperature, nadzor, zaščito drugih elementov v vezju in podobno.

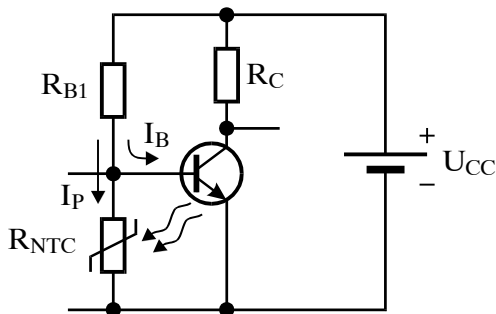
9.1.1. Termistorji

Termistorji so upori, ki se jim upornost spreminja s temperaturo. Poznamo dve vrsti termistorjev: NTK in PTK. NTK termistorji imajo negativni temperaturni koeficient. To pomeni, da jim upornost s temperaturo pada. Nasprotno pa imajo PTK termistorji pozitiven temperaturni koeficient.



Slika 9.1. Karakteristika NTK in PTK termistorjev.

Termistorje lahko uporabimo za temperaturno stabilizacijo delovne točke in kot zaščitni element pri ojačevalnikih. V vezju na sliki 9.2 smo enega od baznih uporov nadomestili z NTK termistorjem. Ta mora biti termično povezan s tranzistorjem. Ko se tranzistor segreva, se povečuje tok nasičenja in s tem kolektorski tok. Ker pa se segreva tudi termistor, mu upornost pada, kar pomeni manjši padeč napetosti in znižan bazni tok v tranzistor. Vrednosti elementov morajo biti izbrane tako, da je tok I_P nekajkrat večji od baznega toka I_B .



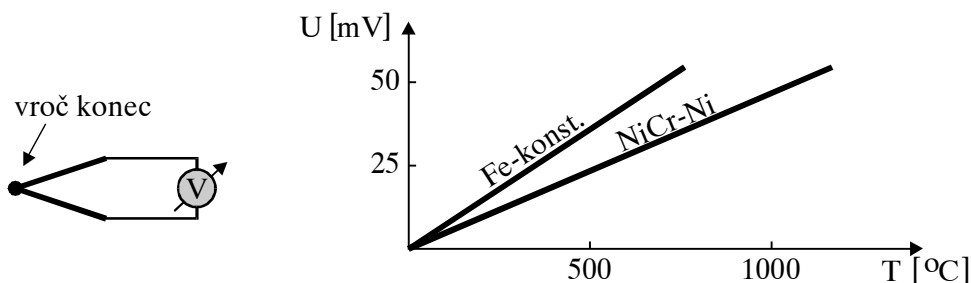
Slika 9.2. Temperaturna stabilizacija delovne točke tranzistorja s termistorjem.

9.1.2. Polprevodniška dioda in tranzistor

Ker se polprevodniški diodi zaporni tok nasičenja spreminja s temperaturo, jo lahko uporabimo kot termoelektrični pretvornik. Z višanjem temperature se v diodi poveča število ioniziranih atomov, ki povečajo zaporni tok. Ta tok je od priključene napetosti skoraj neodvisen.

9.1.3. Termočlen

Termočlen je sestavljen iz dveh kovin, ki sta na enem koncu spojeni. Ko spoj segrevamo, se na priključkih pojavi električna napetost, ki je odvisna od uporabljenih kovin in temperature. Termočlen meri temperaturno razliko med vročim (spojenim) in hladnim (nespojenim) koncem. Pogosto je zaporedno za prvim termočlenom dodan še drugi, ki ima vlogo, da izniči vpliv temperature okolice.



Slika 9.3. Termočlen in karakteristika.

9.1.4. Monolitni termoelektrični pretvorniki

Dokaj natančne temperaturne pretvornike najdemo v monolitni integrirani izvedbi. LM334 je nastavljeni tokovni vir, ki ima izhodni tok sorazmeren s temperaturo. LM335 pa deluje kot nastavljiva prebojna dioda, kjer prebojna napetost narašča sorazmerno s temperaturo (+10mV/K). Obe integrirani vezji imata obliko klasičnega tranzistorja s tremi priključki.

9.2. OPTOELEKTRIČNI PRETVORNIKI

Optoelektrične pretvornike zelo pogosto srečamo pri prenosu signalov. Oddajnik je v tem primeru svetlobni vir – najpogosteje LED ali laserska dioda, sprejemnik pa svetlobno občutljiv element, najpogosteje fotodioda ali fototranzistor. Poznamo pa tudi fototiristor, fototriak ter vakuumsko fotocelico. Prenos svetlobe poteka po zraku (daljinski upravljalec), po optičnih kablilih ali v majhnem, zaprtem prostoru (optični spojniki).

Optoelektrične pretvornike srečamo tudi pri alarmnih ali kontrolnih napravah in števcih, kjer svetlobo, ki prihaja do pretvornika, prekinja kakšen gibljiv predmet (tako izvedbo najdemo v računalniški miški).

9.2.1. Fotoupor

Fotoupor je zgrajen iz polprevodniškega materiala CdS ali CdSe. Ko ga osvetlimo, se v polprevodnem materialu rojevajo proste elektrine, zato mu upornost z osvetlitvijo pada. Slabost fotoupora je v temperaturni občutljivosti, prednost pa v nizki ceni in enostavnosti uporabe.

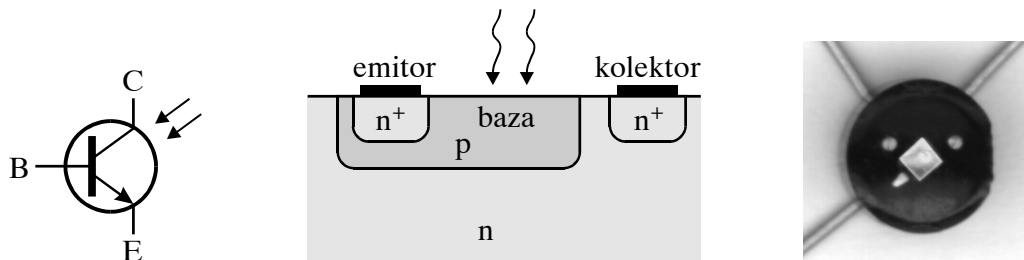
9.2.2. Fotodioda

Fotodioda je po zgradbi podobna običajni diodi, le da mora biti pri fotodiodi pn-spoj kar najbližje površini diode (substrata). Ko fotodiodo osvetlimo, se namreč v prehodnem področju zaradi ionizacij rojevajo novi elektroni in vrzeli. Zaradi tega se poveča zaporni tok, ki je sorazmeren s svetlobnim tokom. Poznamo tudi prebojne fotodiode (angl. avalanche fotodiode), kjer svetloba sproži preboj v zaporni smeri. Njihova dobra lastnost je predvsem v visoki občutljivosti, vendar povzročajo veliko šuma. To pa zato, ker je plazoviti preboj neurejen.

9.2.3. Fototranzistor

Občutno boljšo občutljivost kot fotodioda ima fototranzistor. Svetlobno občutljiv je kolektorski spoj. Ko tranzistor osvetlimo, se zaradi nastalih prostih elektronov in vrzeli poveča tok nasičenja. Kolektorski tok se zaradi tega poveča za kratkostični tokovni ojačevalni faktor β , zato je fototranzistor občutljivejši od fotodiode. Tok, ki teče skozi fototranzistor v temi, je večji kot

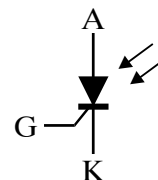
pri fotodiodi in enak toku nasičnja I_{CE0} . Tranzistor je lahko v izvedbi z baznim priključkom ali brez njega. Na vrhu ohišja je prozorna odprtina, skozi katero pronica svetloba. Poznamo tudi Darlington-fototranzistor, pri katerem je občutljivost še večja.



Slika 9.4. Simbol, zgradba in slika fototranzistorja.

9.2.4. Fototiristor ali LASCR

Fototiristor (angl. light actuated silicon controlled rectifier) je tiristor, ki ga lahko vključimo s pomočjo svetlobe. Osvetlitev prehodnega področja v srednjem, zapornem spoju generira dodatne proste elektrone in vrzeli. Ti povečajo tok skozi srednji spoj, ki pri določeni vrednosti prebije. Ko se tiristor enkrat vključi, svetloba na njegovo delovanje več ne vpliva. Izključimo ga kot klasičen tiristor: anodni tok spustimo pod držalno vrednost.

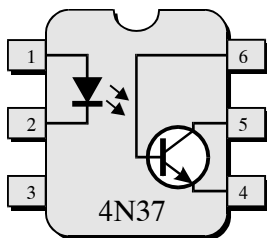


Slika 9.5.
Fototiristor.

9.2.5. Optični spojniki

Optični spojniki (angl. optocoupler) so sestavljeni iz svetlobnega vira in optoelektričnega elementa. Svetlobni vir je navadno svetleča dioda (LED), medtem ko je optoelektrični element lahko fotodioda, fototranzistor, fotodarlington, fototiristor, fototriac in podobno. Vezje lahko vključuje še digitalna vrata ali operacijski ojačevalnik. Najpogostejše ga srečamo kot integrirano vezje s šetimi priključki.

Električni signal se najprej pretvori v svetlobnega, nato spet v električnega. Prednost optičnih spojnikov je v zelo dobri dielektrični izolaciji med vhodnimi in izhodnimi priključki. Zato jih najpogosteje uporabimo tam, kjer želimo galvansko ločitev dveh vej vezja. Če pride do napetostne preobremenitve na eni strani, ostane vezje na drugi strani zaščiteno, če le ne prekoračimo temenske vrednosti optičnega spojnika (1 do 25KV).

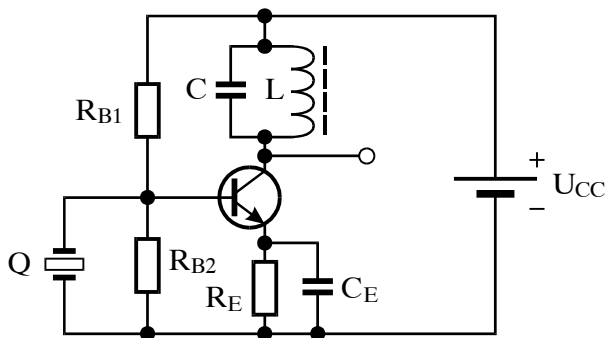


Slika 9.6. Optični spojnik: kombinacija med LED in fototranzistorjem.

9.3. PIEZOELEKTRIČNI PRETVORNIK

Določeni kristali imajo posebne električne lastnosti. Ko jih mehansko obremenimo, se na površini kristala pojavi električna napetost. S pomočjo dveh elektrod naredimo iz piezoelektričnega kristala pretvornik, s pomočjo katerega pretvarjamo mehanska nihanja v električni signal. Najdemo ga v mikrofoni, gramofonskih glavah, senzorjih tlaka in podobnih napravah.

Pojav je tudi nasproten. Ko na elektrodi piezoelektričnega kristala priključimo električno napetost, kristal zaniha. V ta namen ga uporabljajo v zvočnikih, ultrazvočnih oddajnikih in podobno.

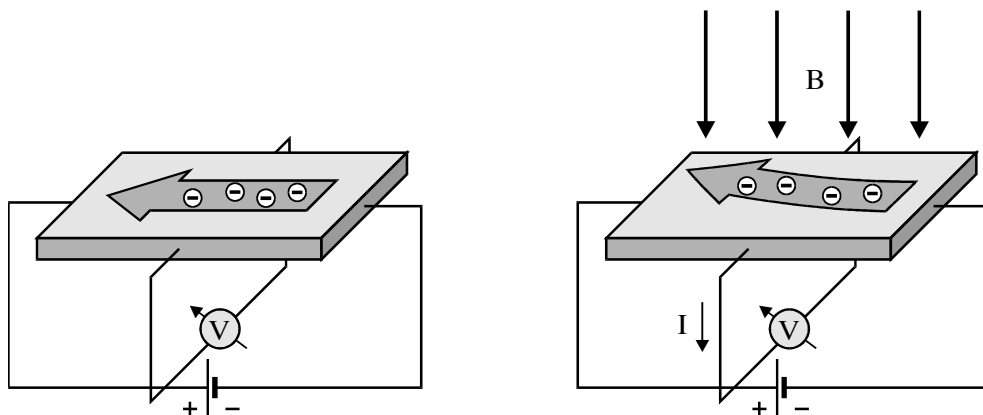


Slika 9.7. Oscilator s kremenčevim kristalom.

Zelo razširjen piezoelektrični pretvornik je kremenčev kristal (angl. quartz), ki ga uporabljamo v oscilatorjih (npr. v raznih sprejemnikih in oddajnikih, digitalnih urah, računalnikih...). Običajno je zaprt v majhno kovinsko ohišje z dvema priključkoma. Če kristal vzbujaemo z napetostjo, bo mehansko zanihal. To nihanje spet povzroči majhen napetostni signal. Kristal bo najmočneje nihal ravno tedaj, če ga vzbujaemo z lastno resonančno frekvenco. Ta je odvisna le od vrste kristala in njegovih dimenzij, nič pa od električnih veličin. Zaradi tega ima oscilator, ki uporablja kremenčev kristal, zelo stabilno frekvenco, ki se s časom ne spreminja. Kremenčev kristal ima zelo visok faktor kvalitete Q .

9.4. HALLOVA SONDA

Hallova sonda je ploščica polprevodnika, ki dobi v magnetnem polju posebne električne lastnosti. Ko teče skozi ploščico električni tok in ploščico prebadajo silnice magnetnega polja, deluje na gibajoče elektrone dodatna sila. Ta je usmerjena pravokotno na smer toka in magnetnega polja, zato zanaša elektrone iz prvotne smeri. Tako se na enem robu ploščice nabere več elektronov kot na drugem. Pojavi pravimo Hallov efekt, nastali potencialni razliki pa Hallova napetost. S pomočjo dodatnega para sponk, ki je nameščen pravokotno na smer toka, lahko s sondo merimo magnetno poljsko jakost. Hallovi sondi je običajno dodano integrirano vezje z ojačevalnikom, vse skupaj pa je zaprto v ohišje, ki je podobno kot pri tranzistorju.

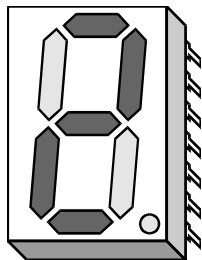


Slika 9.8. Hallova sonda.

9.5. PRIKAZOVALNIKI

9.5.1. LED prikazovalniki

Svetleče diode ali LED (angl. light emission diode) smo že spoznali. Spomni-mo se, da diode svetijo, ko skozi njih teče tok v prevodni smeri. Pri tem se prosti elektroni in vrzeli, ki prehajajo preko spoja, rekombinirajo. Elektroni se tedaj spustijo iz prevodnega v valenčni energetske pas in oddajo presežek energije v obliki elektromagnetnega valovanja – svetlobe.



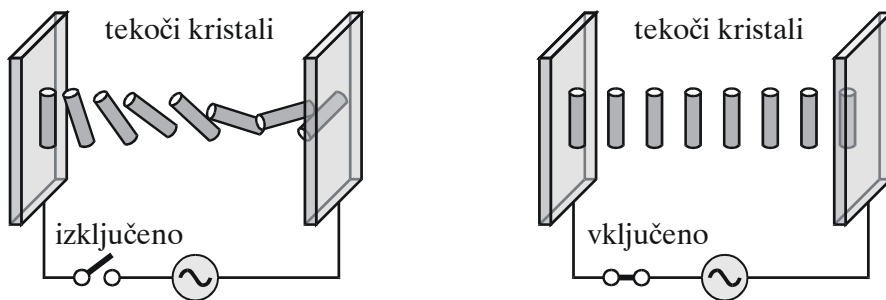
Slika 9.9. Razpored segmentov LED prikazovalnika.

LED prikazovalnike izdelujejo kot skupek svetlečih diod (npr. za table s potujočimi napisi) ali kot posamezne enote, podobne integriranim vezjem, z več segmenti. Z vsako tako enoto, ki ima najpogosteje 7 segmentov (svetlečih diod, postavljenih v obliki številke 8), lahko prikažemo eno izmed števil.

9.5.2. Prikazovalniki s tekočimi kristali ali LCD

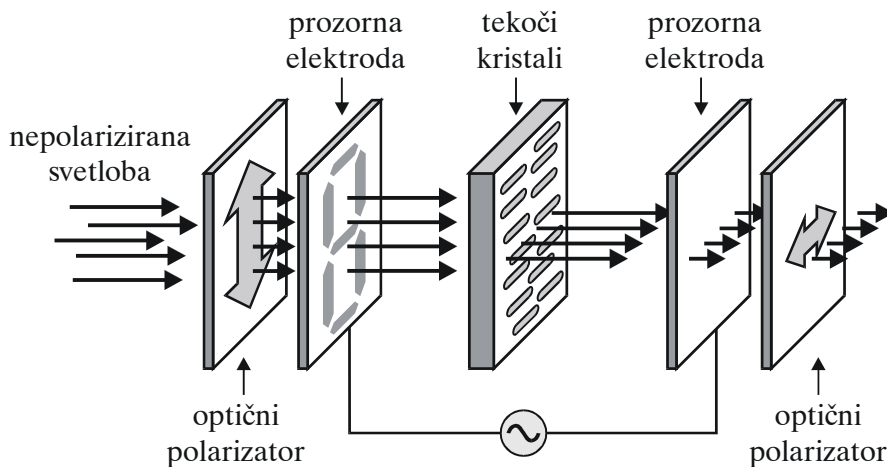
Tekoči kristali so organske snovi z zelo dolgimi molekulami, ki imajo v električnem polju posebne lastnosti. Molekule so sicer gibljive kot v tekočini, vendar razporejene po določenih pravilih, ki veljajo za kristalne strukture. Od tod ime tekoči kristali.

Prikazovalnik s tekočimi kristali (angl. liquid crystal display) je zgrajen iz dveh optičnih polarizatorjev, prevodnih prosojnih elektrod ter vmesne celice, kjer so zaprti tekoči kristali. Vmesna celica s tekočimi kristali je zelo tanka in meri nekaj 10 μm . Razporeditev molekul lahko vsilimo s posebnimi dodatki, ki so v kontaktu s tekočimi kristali. Molekule razporedimo tako, da so na površini vse orientirane navpično, z globino pa se postopoma orientirajo vodoravno.



Slika 9.10. Princip delovanja nematičnih tekočih kristalov.

Tekoči kristali prepuščajo le svetlobo, ki je enako polarizirana kot so usmerjene molekule tekočih kristalov. Če so torej molekule orientirane navpično, bodo prepuščale le navpično polarizirano svetlobo. Ker se molekule z globino postopoma zasučejo za 90° , se isto zgodi tudi s svetlobo – postane vodoravno polarizirana. Ko pa med elektrodama priključimo električno napetost, se vse molekule tekočega kristala razporedijo v eno smer in sukanja svetlobe ni več. Opisan način delovanja velja za t.i. nematične tekoče kristale.



Slika 9.11. Zgradba prikazovalnika s tekočimi kristali.

Tekoče kristale sedaj postavimo med dva optična polarizatorja – s prvim poskrbimo, da pada na tekoče kristale le navpično polarizirana svetloba, drugi pa naj prepušča le vodoravno polarizirano svetlobo. Če na kristalih ni napetosti,

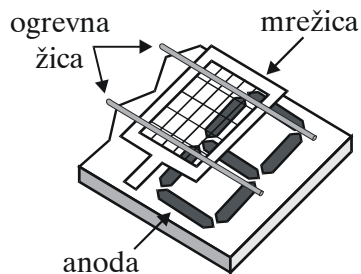
bo izhodna svetloba polarizirana vodoravno in jo bo zato vodoravni optični polarizator prepuščal; če pa na kristale pritismo napetost, zasuka svetlobe na kristalih ne bo, zato (navpično polarizirana) svetloba ne bo mogla skozi vodoravni optični polarizator – površina bo postala črna.

Poznamo transmissijske in refleksijske prikazovalnike. Pri prvih je vir svetlobe postavljen za prikazovalnikom, pri drugih pa se svetloba, ki prehaja skozi prikazovalnik, odbija nazaj s pomočjo ogledala.

Prikazovalnike krmilimo z izmenično napetostjo, saj bi pri enosmerni napetosti prihajalo do nezaželenih elektrolitskih pojavov. Prikazovalniki s tekočimi kristali imajo zelo majhno porabo električne moči, njihova slabost pa je v dolgem odzivnem času.

9.5.3. Vakuumski fluorescenčni prikazovalniki

Ti so narejeni podobno kot direktno ogrevana trioda. Anoda je oblikovana v obliki osmice (za prikaz števil) ter prevlečena s fosforescenčno snovjo, ki zaradi naleta elektronov sveti v različnih barvah (odvisno od materiala). Za katodo je uporabljena žarilna nitka, ki omogoča termično emisijo elektronov. Med anodo in katodo je krmilna mrežica, s katero krmilimo posamezne prikazne elemente.



Slika 9.12. Primer prikaznega elementa pri vakuumskem fluorescenčnem prikazovalniku.

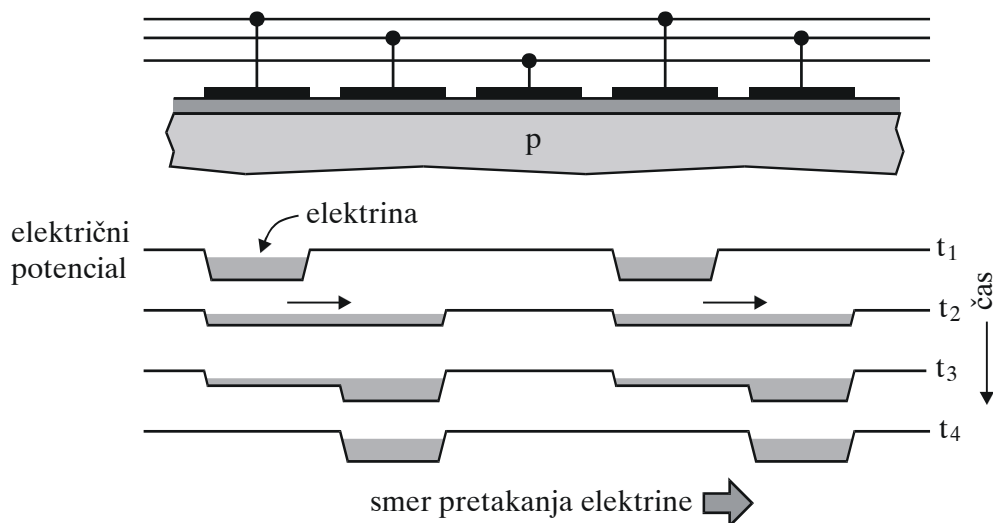
9.5.4. Plazma prikazovalniki

Plazma prikazovalniki delujejo na principu prevajanja električnega toka v plinih. Posamezno točko prikazovalnika prižgemo s pomočjo križno nameščenih elektrod. Pred prikazovalnikom so prevodne elektrode nameščene navpično, za njim pa vodoravno. Ko priključimo napetost na eno navpično in eno

vodoravno elektrodo, pride na mestu, kjer se obe dve križata, do tlenja plina in prikaže se svetla točka plazme.

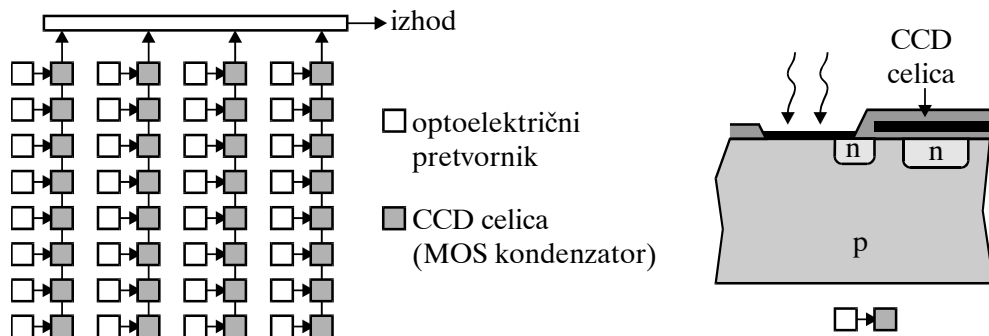
9.6. CCD

CCD (angl. charge-coupled device) je skupek MOS kondenzatorjev. Ko postavimo več MOS kondenzatorjev enega poleg drugega, lahko elektrina prehaja od enega do drugega. Na ta način lahko naredimo pomikalni register (angl. shift register), ki prenaša elektrino.



Slika 9.13. Primer delovanja 3-faznega CCD.

Na sliki vidimo osnovni princip delovanja pomikalnega registra za elektrino. Ko priključimo električno napetosti na prva vrata, se elektrina nabere pod prvim kondenzatorjem (z leve). Če se nato električna napetost pojavi na drugih vratih, bo tja odtekla tudi elektrina. Ko električne napetosti na prvih vratih ni več, je vsa elektrina pod drugimi vrati oz. kondenzatorjem. Enako ponovimo še s tretjimi vrati in elektrino smo premaknili z leve proti desni za razdaljo treh kondenzatorjev. CCD enote zelo pogosto uporabljamo pri pretvornikih slike v električni signal (pri video kamerah) ter za zakasnilne člene, kjer lahko zakasnimo signal tudi do ene sekunde.



Slika 9.14. CCD sklop pri pretvornikih za video kamere in prerez enega od segmentov s Schottkyjevo fotodiodo.

Pri pretvorbi slike ima vsak od MOS kondenzatorjev še optoelektrični pretvornik. Tako enoto označimo s CCIS (angl. charge-coupled image sensor). V času osvetlitve se s pomočjo optoelektričnega pretvornika generirajo prosti nosilci elektrine. Slika se shrani kot količina elektrine, ki jo nato s pomočjo CCD-ja zaporedno prenesemo v elektronsko vezje.

VPRAŠANJA

1. Kakšne termistorje poznamo?
2. Kako deluje temperaturna stabilizacija tranzistorja v vezju na sliki 9.2?
3. Kako je zgrajen in kako deluje termočlen?
4. Kaj se zgodi, ko osvetlimo fototranzistor?
5. Kaj so optični spojniki? Čemu služijo?
6. Kako deluje kremenčev kristal, ki ga uporabljamo v oscilatorjih?
7. Kaj je Hallova sonda?
8. Kako deluje prikazovalnik s tekočimi kristali? Kakšno vlogo imata optična polarizatorja?
9. Kaj je CCD in kako deluje?