

## 6. ELEKTRONIKA

Elektronika je oblast elektrotehnike u kojoj se proučavaju zakonitosti i efekti proticanja nosilaca elektriciteta kroz provodnike, poluprovodnike, gasove ili vakum. U elektronskim kolima nosioci elektriciteta mogu da se kreću unilateralno – u jednom smjeru. Pri tome, ne važi linearna relacija između napona i struje, kao što je važio Omov zakon u R, L, C kolima, pri bilateralnom kretanju elektrona kroz metalne provodnike.

Elektronika je danas najpropulzivnija grana, ne samo elektrotehnike, već tehnike uopšte. Ona je široko prodrla u tehnologiju, oplodila je i transformisala. Sa mikroelektronikom se tek uvidjelo, kolika je dubina i kakav prevratnički karakter ima treća tehnološka revolucija. Kompjuteri, "vještačka inteligencija", optoelektronika, senzorska tehnika, robotika i sl., danas su već uobičajeni primjeri elektronske svakodnevice u mnogim oblastima ljudske djelatnosti. Sve ovo ukazuje na nužnost, da se i inženjer neelektrotehničke struke upozna sa osnovama elektronike.

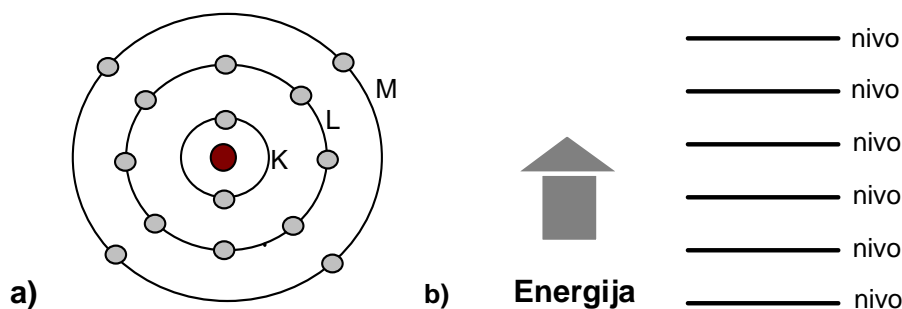
U prvom periodu razvoja elektronike osnovni elementi u elektronskim kolima bile su vakumske ili gasne *elektronske cijevi*, koje su danas, zahvaljujući razvoju tehnologije, skoro potpuno ustupile mjesto *poluprovodničkim elektronskim elementima i sklopovima*, koji imaju više prednosti i pružaju više mogućnosti različitih tehničkih primjena.

### 6.1 Osnovi fizike poluprovodnika

Poluprovodnici su čvrsti materijali, čija se vrijednost specifične električne otpornosti nalazi između otpornosti provodnika i dielektrika, i reda je od  $10^3 \Omega\text{m}$  do  $10^{-2} \Omega\text{m}$ . Od niza poluprovodničkih materijala u elektrotehničkoj primjeni su tipični silicijum i germanijum. Poluprovodnički materijali imaju značajnu ulogu u elektronici. Stoga ćemo ovdje posvetiti određenu pažnju razumijevanju strukture i osnovnih osobina ovih materijala.

#### 6.1.1 Energetski nivoi elektrona

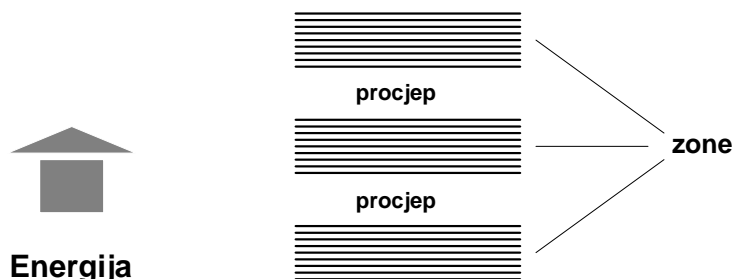
Da bi shvatili suštinsku razliku između pojedinih materijala (provodnika, dielektrika i poluprovodnika), pozvaćemo se na osnovne pojmove iz atomske fizike. Kao što je poznato, atom se sastoji od pozitivno naelektrisanog jezgra i negativno naelektrisanih elektrona, koji kruže po orbitama oko jezgra (slika 6.1).



Slika 6.1 a) Jedan model atoma; b) Energetski nivoi usamljenog atoma.

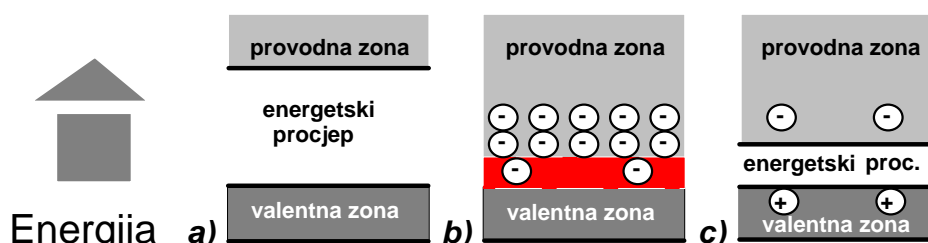
Elektroni na orbitama imaju tačno određene energije. Da bi elektron prešao iz jedne u drugu orbitu neophodno mu je saopštiti energiju, koja je jednaka razlici energija elektrona na tim orbitama (energetski procjepi). Orbite se obilježavaju slovima: K, L, M, N, O, P i Q, i u svakoj od njih je tačno definisan maksimalni mogući broj elektrona. Idući od jezgra ka posljednjoj orbiti, elektroni su sve slabije vezani, tako da je elektronima iz zadnje orbite potrebno najmanje energije za napuštanje atoma. Ovi elektroni, koji najlakše mogu napustiti atom, nazivaju se *valentni elektroni*. Posmatrajmo sada šta se dešava ako se više atoma približi jedan drugom. Elektroni koji

su imali iste energetske nivoe u različitim atomima, zbog efekata koji se objašnjavaju u kvantnoj mehanici, ne mogu zadržati iste vrijednosti energija, već se svaki energetske nivo cijepa na po više, veoma bliskih, energetskih podnivoa, formirajući tzv. energetske zone (slika 6.2). Unutar zone, elektroni imaju tačno definisane diskretne vrijednosti energije. Ukupna energetska razlika jedne zone je manja od termičke energije koju elektron ima na sobnoj temperaturi, te se, stoga, elektron lako kreće unutar zone. Razlika energija pojedinih energetskih zona naziva se energetske procjep.



Slika 6.2 Ilustracija energetskih zona i energetskih procjepa.

Veličinom energetskog procjepa definisani su različiti materijali. Naime, kod izolatora, energetske procjep je toliki da je valentnom elektronu, koji se nalazi u tzv. valentnoj zoni, potrebno saopštiti veliku energiju da bi prešao iz valentne zone u zonu slobodnog kretanja - provodnu zonu. Stoga, izolatori imaju veoma mali broj slobodnih nosilaca naelektrisanja (elektrona), a time i nisku električnu provodnost. Za razliku od izolatora, kod provodnika se valentna i provodna zona preklapaju, pa postoji veliki broj slobodnih nosilaca naelektrisanja, koji bi, pod dejstvom električnog polja, mogli obrazovati usmjereno kretanje (struju). Poluprovodnici se odlikuju procjepom čija je vrijednost, pri normalnoj temperaturi, negdje između one kod provodnika i izolatora. Ilustracija valentnih i provodnih zona, kod svakog od pomenutih materijala, data je na slici 6.3.



Slika 6.3 Šematski prikaz energetskih zona: a) Dielektrika; b) Provodnika; c) Poluprovodnika.

### 6.1.2 Sopstvene i primjesna provodnost poluprovodnika

Kod čistih poluprovodnika, pri temperaturi apsolutne nule, elektroni u valentnoj zoni nemaju dovoljnu energiju da pređu u provodnu zonu. Međutim, dovodenjem energije spolja (toplota, svjetlost,...), neki valentni elektroni bivaju sposobni da pređu u provodnu zonu. Napuštajući valentnu zonu, ovi elektroni za sobom ostavljaju nepopunjenu vezu - **šupljinu**, koja se može tretirati kao elementarno pozitivno naelektrisanje. Nastajanje para elektrona i šupljina naziva se **generacija**. Neki drugi elektron, koji je takođe napustio atom, sada može da popuni ovu šupljinu. Šupljinu može popuniti i neki od susjednih valentnih elektrona, ostavljajući za sobom opet novo mjesto, odnosno novu šupljinu. Proces popunjavanja šupljina naziva se **rekombinacija**. Iz samog mehanizma generisanja i rekombinovanja elektrona i šupljina, jasno je da su smjerovi kretanja elektrona i šupljina suprotni jedan drugom. Takođe, sasvim logično slijedi, da je broj generisanih elektrona, ili šupljina ( $n_i$  odnosno  $p_i$ ), u čistom poluprovodniku, uvijek jednak, i

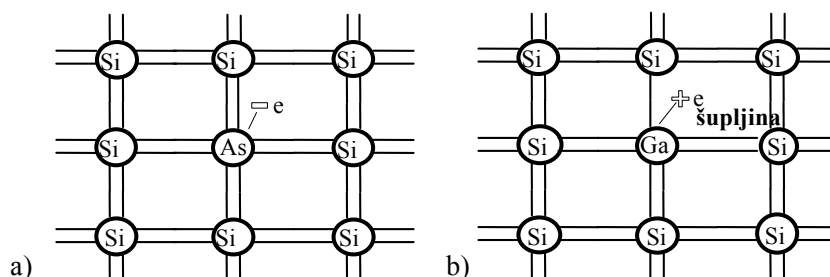
naziva se sopstvena koncentracija elektrona, odnosno šupljina. Sopstvena koncentracija, u nekom čistom poluprovodniku, može biti tačno određena za date uslove.

Na kraju, napomenimo da je električna provodnost čistih poluprovodnika jako mala. Zbog toga se, u praktičnim primjenama, koriste, ne kao čisti, već sa dodatkom drugih elemenata, koji se nazivaju **primjese**, i koji poluprovodnicima daju drugačije osobine.

### ***n-tip i p-tip poluprovodnika***

Povećanje električne provodnosti u praksi se postiže dodavanjem određene primjese (nečistoće) poluprovodniku visoke čistoće. Dodavanjem hemijskih primjesa čak i u tragovima  $1:10^6$ , postiže se znatno povećanje provodnosti. Ovakva provodnost se naziva **primjesna provodnost** poluprovodnika.

Čisti poluprovodnici, npr., germanium (Ge) i silicium (Si), su četorovalentni elementi, a primjese treba da budu petovalentni ili trovalentni elementi. Ako se čistom poluprovodniku doda petovalentni element (u tehničkoj primjeni to su najčešće astatan, antimon, arsen i fosfor), koji se sada nazivaju **donori**, tada će četiri elektrona iz zadnje ljuske, npr. silicijuma, ostvariti kovalentne veze sa četiri elektrona petovalentnog elementa, dok će peti elektron ostati nesparen i slabo vezan. Takav elektron je u stanju da lako napusti atom. Slično, dodavanjem trovalentnog elementa (u tehničkoj primjeni to su najčešće bor, galijum indijum), koji se sada nazivaju **akceptori**, tri elektrona obrazuju kovalentne veze, dok četvrta veza ostaje nepopunjena, i teži da se popuni nekim elektronom iz susjednog atoma, na čijem mjestu će ostati šupljina. Zavisno od vrste primjese (petovalentni ili trovalentni elementi), razlikuju se n-tip, odnosno p-tip poluprovodnika, respektivno.



Slika 6.4 Površinska šema obrazovanja primjesne provodnosti kod silicijuma: a) Sa primjesom astatana; b) Sa primjesom galijuma.

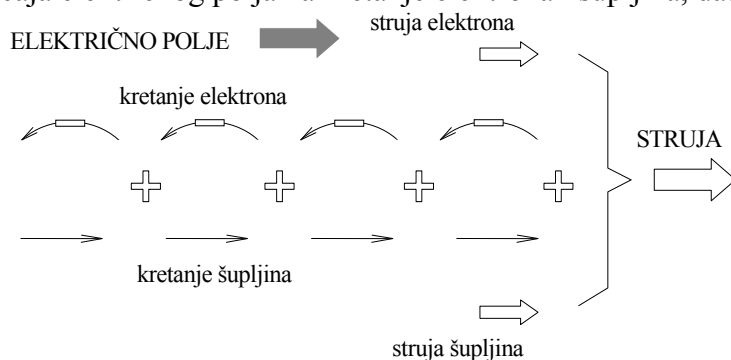
Sa slike 6.4 vidi se da su četiri elektrona astatana formirala kovalentne veze sa atomima silicijuma, dok je peti njegov elektron ostao izvan kovalentnih veza, i time veoma slabo vezan sa matičnim atomom. Takvom elektronu je potrebna izuzetno mala spoljašnja energija da napusti svoj atom i pređe u provodnu zonu. Na taj način dobijen je **poluprovodnik n-tipa**.

Posmatrajući sliku 6.4b, može se objasniti stvaranje šupljine i negativnog jona. Naime, dodavanjem trovalentnih elemenata čistom poluprovodniku, jedna veza ostaje nepopunjena. Ta veza, kao i šupljina kod čistog poluprovodnika, ima težnju da bude popunjena. Zbog toga je potrebna vrlo mala energija nekom od valentnih elektrona, iz susjednih veza, da je popuni, i time za sobom ostavi pozitivni nosilac naelektrisanja - šupljinu. Na taj način dobijen je **poluprovodnik p-tipa**.

Važno je napomenuti da se, i u n-tipu i u p-tipu poluprovodnika, u kojim su glavni nosioci naelektrisanja elektroni i šupljine, respektivno, javljaju i takozvani sporedni nosioci naelektrisanja. Sporedni nosioci su zapravo elektroni u p-tipu i šupljine u n-tipu. Takođe, napomenimo i to da je pokretljivost šupljina tri puta manja nego pokretljivost elektrona.

Pod dejstvom električnog polja, u poluprovodniku se uspostavlja kretanje elektrona u smjeru suprotnom od smjera polja, i "kretanje šupljina" u smjeru polja. Naravno, imajući u vidu različite znake naelektrisanja, struje, koje su posljedice ovih kretanja, se algebarski sabiraju.

Ilustracija uticaja električnog polja na kretanje elektrona i šupljina, data je na slici 6.5



Slika 6.5 Kretanje elektrona i šupljina pod uticajem električnog polja.

## 6.2 Poluprovodničke komponente

Poluprovodničkim komponentama nazivamo: diode, tranzistore, tiristore i druge elemente koji se proizvode na bazi poluprovodničkih materijala. One se mogu, sasvim generalno, podijeliti u dvije grupe; **aktivne i pasivne komponente**. Aktivne imaju osobinu da pojačavaju signale. Pojačanje se vrši na račun energije spoljnog izvora koji napaja komponentu i obezbjeđuje joj normalan rad. Pasivne komponente ne pojačavaju signale, ali imaju važnu ulogu u obradi vremenski promjenljivih signala.

Poluprovodničke komponente se proizvode kao diskretne i kao integrisane. Diskretna komponenta je element od određenog tipa osnovnog elementa kao što su dioda, tranzistor itd. Integrisana komponenta je jedinstveni kristal poluprovodnika u kome su, posebnom tehnologijom, zajedno napravljeni osnovni poluprovodnički elementi istog i različitog tipa zajedno sa otpornicima, kondenzatorima i njihovim zajedničkim vezama. Integrisana tehnologija omogućava, između ostalog, da se elektronska kola proizvode kao jedinstveni monolitni komad vrlo malih dimenzija. Osnovu većine poluprovodničkih komponenata čini spoj dva poluprovodnika različitog tipa: p-tipa i n-tipa. Komponente se proizvode u veoma širokom spektru i za različite namjene, pa je i objašnjenje njihovog rada različito. Mi ćemo se zadržati na osnovnim, koje su najčešće u upotrebi.

### 6.2.1 Dioda

Poluprovodničke diode su elementi sa dva poluprovodnička sloja (sloj p-tipa i sloj n-tipa). Ovdje će biti razmotreni osnovni principi funkcionisanja diode, kao i aproksimacije koje omogućavaju pojednostavljivanje analize kola sa diodama.

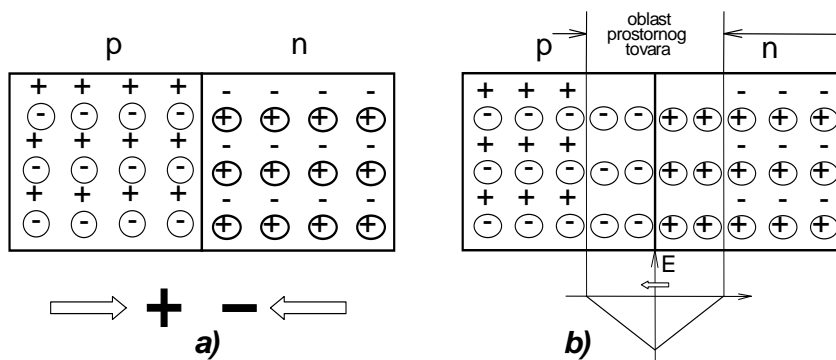
#### ***p-n spoj - dioda***

Ranije smo konstatovali da su kod n-tipa poluprovodnika glavni nosioci naelektrisanja elektroni, a kod p-tipa poluprovodnika glavni nosioci naelektrisanja su šupljine.

Posmatrajmo sada što se dešava prilikom spajanja p-tipa i n-tipa poluprovodnika (što se u praksi ostvaruje dosta složenijim tehnološkim postupkom od prostog spajanja). U tom slučaju, kako je koncentracija elektrona u n-tipu mnogo veća nego ovih u p-tipu, dolazi do difuzionog kretanja elektrona i šupljina, koje ima za cilj izjednačenje koncentracija u svim djelovima poluprovodničke strukture. Znači, elektroni počinju da se kreću od mjesta veće ka mjestima manje koncentracije, odnosno u smjeru od n-tipa ka p-tipu poluprovodnika. Slično važi i za šupljine, koje se kreću od p-tipa ka n-tipu poluprovodnika (slika 6.6a). Prilikom kretanja jednih ka drugim, na samoj granici spoja, dolazi do rekombinacije, odnosno do popunjavanja šupljina elektronima. Na taj način, oko same granice spoja, obrazuje se jedan sloj kojeg su napustili i elektroni i šupljine, i

koji sada predstavlja dijelom pozitivno, odnosno dijelom negativno naelektrisanje, respektivno. Kako se oko spoja formiralo, s jedne strane negativno, a s druge pozitivno naelektrisanje, u tom dijelu se uspostavlja električno polje, koje ima smjer od pozitivnog ka negativnom naelektrisanju. Odnosno, uspostavlja se polje, čiji smjer je takav da se protivi daljem kretanju elektrona, odnosno šupljina (smjer kretanja elektrona pod uticajem polja je suprotan od smjera polja). Kada intenzitet polja dovoljno poraste da spriječi kretanje elektrona i šupljina, prestaje difuziono kretanje. Tada se kaže da se unutar p-n spoja formirala oblast prostornog tovara. Razlika potencijala između krajnjih tačaka ove oblasti naziva se potencijalna barijera. Nju većinski nosioci naelektrisanja, sa jedne i druge strane spoja, nisu u stanju da pređu pri normalnim uslovima (odsustvo stranog polja). Ovo je ilustrovano na slici 6.6b.

Primijetimo, da je uspostavljeno električno polje, unutar oblasti prostornog tovara, najjače na samoj granici spoja, jer se, samo u tim tačkama, polja od svih dipola (pojedinačno) sabiraju (slika 6.6b).



Slika 6.6 p-n spoj. a) Trenutak stvaranja; b) Oblast prostornog tovara.

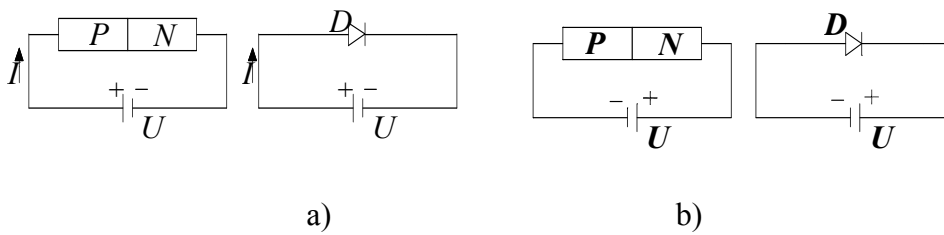
Na sobnoj temperaturi (uz uobičajenu koncentraciju primjesa), razlika potencijala ove barijere iznosi oko 0,2V za silicijumske, odnosno oko 0,6V za germanijumske diode.

Na kraju, napomenimo da je, u prethodnim ilustracijama, pretpostavljeno da su p-tip i n-tip poluprovodnika jednako (simetrično) dopirani.

### Direktna i inverzna polarizacija

Vidjeli smo da, po uspostavljanju potencijalne barijere, prestaje kretanje glavnih nosilaca naelektrisanja sa jedne na drugu stranu spoja, i obratno. Postavlja se pitanje, na koji način iskoristiti prisustvo velikog broja elektrona u n-tipu i šupljina u p-tipu poluprovodnika za uspostavljanje struje kroz diodu. Nameće se jedno veoma logično rješenje, a to je da treba otkloniti uzrok prestanka kretanja glavnih nosilaca naelektrisanja. Naime, da bi se obezbijedilo dalje kretanje glavnih nosilaca, neophodno je napon potencijalne barijere oboriti, odnosno smanjiti uspostavljeno polje, koje je uzrokovalo prekid kretanja naelektrisanja. Ovo se može ostvariti ako se dioda priključi na spoljašnji izvor, čije polje će biti suprotno od polja uspostavljenog unutar oblasti prostornog tovara (direktna polarizacija diode). Tada se smanjuje potencijal koji je bio barijera za kretanje glavnih nosilaca, pa se, na taj način, uspostavlja njihovo kretanje, čija posljedica je struja kroz diodu u smjeru suprotnom od smjera kretanja elektrona (prema konvenciji) u njoj. Postavlja se pitanje da li će se, prelaskom elektrona iz n-tipa, narušiti struktura u p-tipu. Ovo se ne dešava jer su elektroni u p-tipu sporedni nosioci, te se, praktično, u potpunosti rekombinuju uz samu oblast prostornog tovara. Ovo isto važi i za šupljine. Direktna polarizacija diode prikazana je na slici 6.7a. Struja koja se uspostavlja pri direktnoj polarizaciji naziva se često i direktna struja.

Inverzna polarizacija se ostvaruje kada se izvor veže na način kojim će se povećavati električno polje unutar oblasti prostornog tovara, odnosno kao na slici 6.7b.



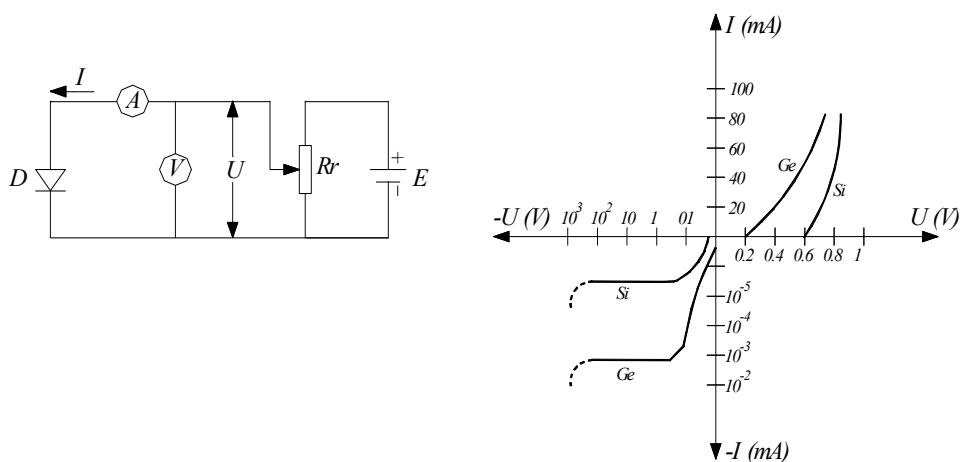
Slika 6.7 Polarisanje dioda: a) direktno, b) inverzno

U ovom slučaju, očigledno je da se onemogućava kretanje glavnih nosilaca kroz p-n spoj, jer se oblast prostornog tovara, odnosno potencijalna barijera, povećava. Međutim, primijetimo da ovakvo polje odgovara slobodnim manjinskim nosiocima naelektrisanja, elektronima u p-tipu i šupljinama u n-tipu poluprovodnika. Kako, iako u jako malom broju, ovi sporedni nosioci postoje, to se, pri inverzno polarisanom p-n spoju, ipak uspostavlja neka veoma mala struja, koja se, u skoro svim praktičnim analizama, zanemaruje.

### Strujno naponska karakteristika diode

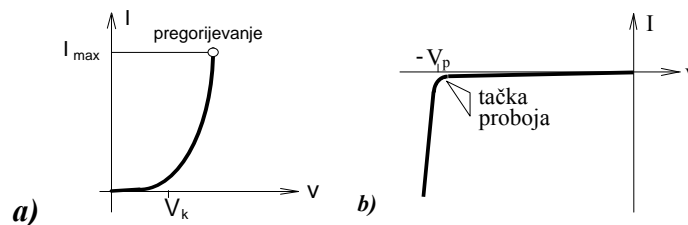
Prethodna analiza omogućila nam je da shvatimo postupke direktne i inverzne polarizacije. Međutim, na osnovu dosadašnje analize, ipak nismo u stanju da preciznije odredimo zavisnost struje kroz diodu od dovedenog napona direktne, ili inverzne, polarizacije. Postoje veoma složene matematičke analize koje opisuju ove zavisnosti. Sigurno najpouzdanija i najočiglednija je analiza koja se bazira na snimanju strujno-naponske (U-I) karakteristike. Ovo snimanje izvodi se prema šemi na sl. 6.8.

Otpornikom (potencijometrom)  $R_r$  (sl.6.8) mijenjamo napon  $U$ , čiju vrijednost mjerimo voltmetrom (V), a vrijednost jačine struje  $I$  kroz diodu (D) mjerimo ampermetrom (A). Na sl.6.8 prikazana je direktna polarizacija (direktni smjer ili provodni smjer), a inverzna polarizacija se postiže promjenom polarizacije izvora (E). Rezultati snimanja dati su takođe na sl.6.8, a za analizu koristimo sl. 6.9.



Slika 6.8 Šema mjerenja karakteristika i karakteristike diode

Uočimo sa slike 6.9a dvije karakteristične tačke - prvu koja predstavlja tzv. napon praga  $V_k$  (ili napon koljena) poslije koga struja kroz diodu počinje naglo da raste, i drugu tačku ("pregorijevanje"), koja predstavlja napon kojim bi se uništila dioda iz razloga što bi, pod njegovim uticajem, došlo do nepoželjnog povećanja temperature diode, do mjere pri kojoj poluprovodnici gube svoja svojstva.



Slika 6.9. Karakteristika diode: a) Direktna polarizacija;  
b) Inverzna polarizacija.

Pri naponima inverzne polarizacije, struja kroz diodu jednaka je struji inverzno polarisanog p-n spoja, i ona je veoma mala. Međutim, i pri ovakvoj polarizaciji, postoji ograničenje. Naime, ukoliko se inverzni napon isuviše poveća (u apsolutnom iznosu), dolazi do tzv. proboja diode. Proboj može nastati zbog tzv. lavinskog efekta koji ćemo opisati. Povećanjem napona inverzne polarizacije, povećava se inverzno polje unutar potencijalne barijere. Ovo polje ubrzava slobodne elektrone, i pri nekoj vrijednosti saopštava im dovoljnu energiju da oni, pri sudaru sa vezanim elektronima, oslobode novi par elektron - šupljina. Ako novooslobođeni elektroni imaju dovoljne energije da generišu nove parove elektron - šupljina, proces će se nastaviti poput lavine. Lavinski proces počinje na samoj granici p-n spoja (gdje je polje najjače). Visokim naponom inverzne polarizacije može se nepovratno razoriti struktura diode.

### Parametri diode

Parametri diode su veličine koje karakterišu ponašanje diode. Osnovni parametar diode je njena **inverzna struja zasićenja**, koja se kreće od  $10^{-8}$  do  $10^{-2}$  mA za germanijumske i od  $10^{-12}$  do  $10^{-6}$  mA za silicijum diode.

Drugi važan parametar diode je njena otpornost. Razlikujemo statičku i dinamičku otpornost diode. Statička se definiše kao odnos napona na diodi i struje koja protiče kroz diodu i nema neki tehnički značaj. **Dinamička ili unutrašnja otpornost diode** definiše se za tačku na karakteristici ( $U_0, I_0$ ) na sljedeći način:

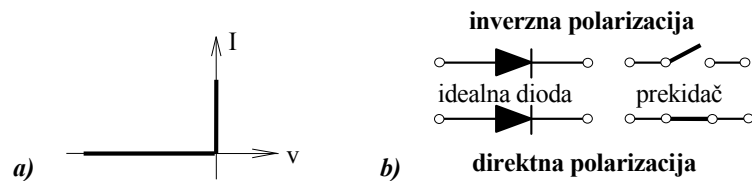
$$R_i = \frac{1}{\left. \frac{dI}{dU} \right|_{U = U_0}}$$

Sljedeći parametar je **maksimalni inverzni napon diode**, pri kome dolazi do proboja. Ako se pri proboju struja kroz diodu ne ograniči, npr. nekim spoljnim otporom, kumulativno povećanje struje imaće za posljedicu preveliko zagrijavanje spoja, tako da će se on razoriti. Silicijumske diode imaju veći inverzni napon od germanijumskih.

Karakteristike diode u značajnoj mjeri zavise od temperature spoja. Temperatura p-n spoja zavisi od disipacije na spoju koja je jednaka proizvodu struje kroz spoj i napona na njemu. Maksimalna temperatura spoja predstavlja osnovno ograničenje u radu poluprovodničkih dioda. Ukoliko je ova temperatura veća od maksimalne, nastaje termički proboj koji može da ima za posljedicu razaranje p-n spoja.

### Aproksimiranje diode

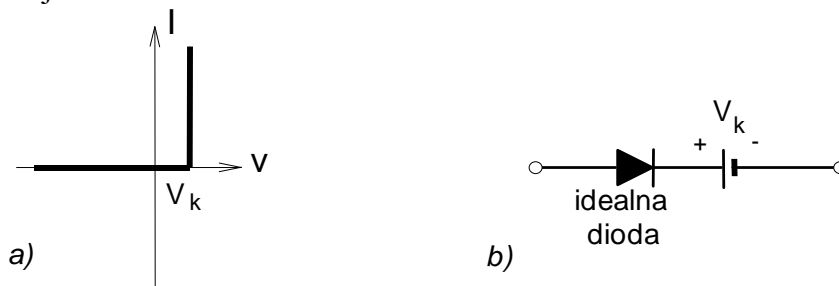
Razmatrajući diodu, ukazali smo da se, u njoj, odvijaju složeni procesi, koji, da bi se opisali, zahtijevaju dosta složen matematički aparat. Međutim, najčešće, prilikom analize kola sa diodama, potrebno je usvojiti neke aproksimacije. U tom smislu, zavisno od željene tačnosti, najčešće se upotrebljavaju tri aproksimacije karakteristika diode. Prva, i najgrublja, aproksimacija podrazumijeva diodu kao idealni prekidač (idealna dioda). Naime, kad je direktno polarisana, dioda se posmatra kao zatvoreni prekidač u kolu. U slučaju inverzne polarizacije, dioda se posmatra kao otvoreni prekidač. Karakteristika i ilustracija idealne diode dati su na slici 6.10.



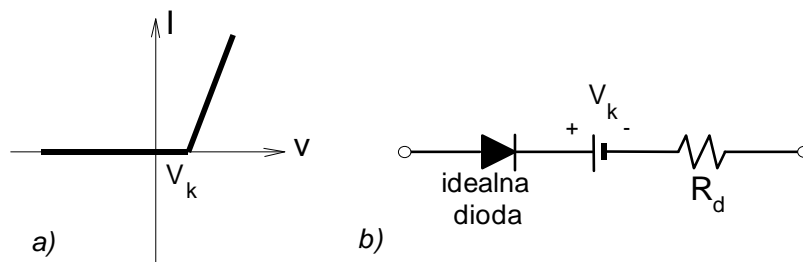
Slika 6.10. Idealna dioda. a) Karakteristika; b) Ilustracija.

Ukoliko napon izvora nije mnogo veći od napona praga diode, pribjegava se drugoj (manje gruboj) aproksimaciji diode. Ovako aproksimirana dioda prikazana je na slici 6.11. Izvor sa slike ekvivalentira djelovanje potencijalne barijere.

Za slučajeve kad otpornost diode ima red veličine isti kao i otpornosti priključene u kolu, koristi se treća aproksimacija, prikazana na slici 6.12, gdje  $R_d$  predstavlja otpornost diode pri direktnoj polarizaciji.



Slika 6.11. Druga aproksimacija. a) Karakteristika; b) Ekvivalentno kolo.



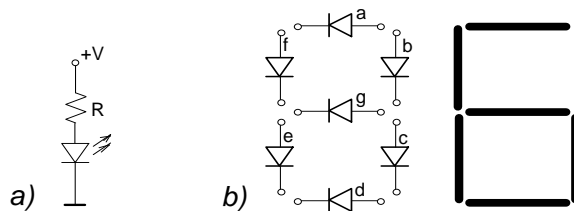
Slika 6.12. Treća aproksimacija. a) Karakteristika; b) Ekvivalentno kolo.

## Vrste dioda

Postoji više različitih dioda, sa različitim osobinama i za različite primjene. Mi ćemo se samo ukratko osvrnuti na neke od njih.

### Svjetleća dioda (LED)

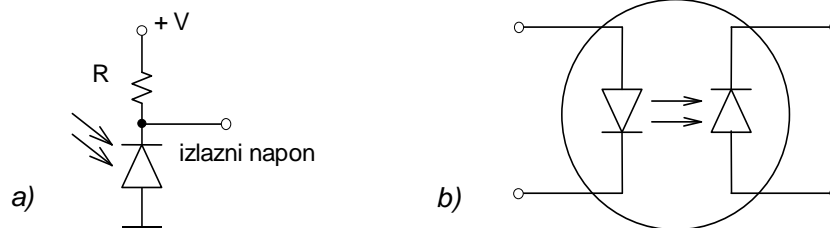
LED dioda (light emitting diodes), kao što joj samo ime kaže, ima osobinu da, pri direktnoj polarizaciji, emituje svjetlost. Emitovana svjetlost može biti (i najčešće je) iz vidljivog spektra (crvena, žuta,...), ili iz nevidljivog (infracrvena). LED diode se najčešće upotrebljavaju kao indikatori nekog stanja, i, praktično, srijeću se u skoro svim elektronskim uređajima. Polarizacija LED diode vrši se na način prikazan na slici 6.13a. Jedna od primjena (indikacija stanja) data je na slici 6.13b, na kojoj je prikazan jedan segmentni indikator za ispisivanje cifara, odnosno brojeva.



Slika 6.13 a) LED kao indikator; b) Sedmosegmentni indikator cifara.

Princip funkcionisanja indikatora sa slike 6.13b jednostavno je shvatiti, npr. iz primjera prikazivanja cifre 6, kad je neophodno da budu direktno polarisane diode: a, c, d, e f i g.

### Fotodiode i optoizolatori



Slika 6.14 a) Fotodioda; b) Optoizolator.

Kod fotodioda normalan režim rada je pri inverznoj polarizaciji. Fotodiode imaju osobinu da, pod uticajem svjetlosti, provode u inverznom smjeru. Način polarizacije fotodiode dat je na slici 6.14a. Napomenimo da, zavisno od intenziteta svjetlosti, zavisi struja kroz diodu (pri jačoj osvjetljenosti i struja je jača).

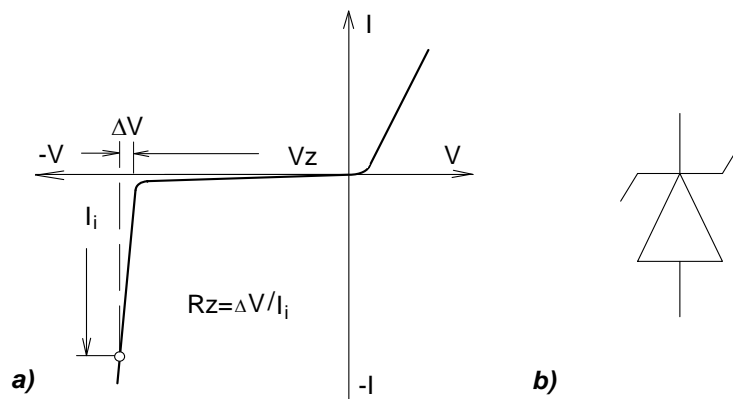
Moguće je, kombinacijom LED i fotodiode, da se dobije skoro idealan sklop za galvansko odvajanje, koji se naziva optoizolator.

### Varikap dioda

Kada je signal doveden na diodu brzopromjenljiv u vremenu, p-n spoj pokazuje odedene reaktivne osobine, u prvom redu kapacitivnost. Ova osobine koristi se kod varikap diode, kod kojih je inverzna polarizacije normalan režim rada. Promjenom napona inverzne polarizacije mijenja se kapacitet diode, što se koristi u električnim kolima gdje je potrebna naponski kontrolisana kapacitivnost.

### Zener dioda

Normalan režim rada Zenerove diode je inverzna polarizacija pri naponu proboja. Zenerov proboj nastaje pri relativno niskim naponima inverzne polarizacije (npr. 6V), to znači da se za male promjene napona na diodi dobiju vrlo velike promjene struje, odnosno da napon na diodi ostaje praktično konstantan i pri znatnim promjenama struje kroz diodu. Ova dioda se koristi za stabilizaciju napona i dobijanje referentnih jednosmjernih napona. Strujno naponska karakteristika Zener diode data je na slici 6.15a.



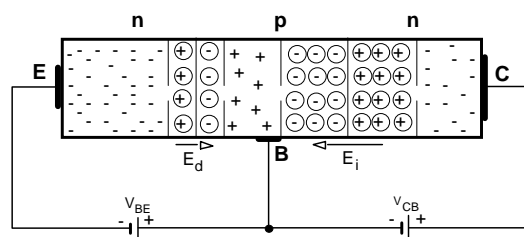
Slika 6.15 a) Karakteristika Zener diode; b) Simbol Zener diode.

## 6.2.2 Tranzistor

### Princip rada

Tranzistor se sastoji od dva p-n spoja, kod kojih je jedna oblast zajednička za oba spoja, i naziva se **baza**. Zavisno od toga kakvog je tipa zajednička oblast, razlikuju se n-p-n i p-n-p tranzistori. Oblasti s jedne i druge strane baze, iako od istog tipa poluprovodnika, nisu identične. Naime, jedna je jače dopirana od druge. Priključak na jače dopiranoj oblasti naziva se **emitor E**, a na drugoj oblasti **kolektor C**.

Razmotrimo sada tzv. aktivni režim rada n-p-n tranzistora, pri čemu se slična analiza može provesti i za p-n-p tranzistor. U aktivnom režimu, spoj baza emitor mora biti direktno polarisan, dok spoj baza kolektor treba inverzno polarisati, kao što je to pokazano na slici 6.16.



Slika 6.16 Tranzistor n-p-n tipa u aktivnom režimu rada - principna šema

U ovom slučaju, elektroni, koji su glavni nosioci u emitoru E, nesmetano prolaze potencijalnu barijeru spoja emitor baza i prelaze u oblast baze. Treba napomenuti da je, zbog velike dopiranosti emitora, broj slobodnih elektrona mnogo veći nego broj šupljina u njemu. Obzirom da je baza p tip poluprovodnika, za očekivati bi bilo, da se u njoj rekombinuje veliki broj elektrona iz emitora. Međutim, do toga neće doći, pošto je baza tehnološki izvedena tako da ima veoma malu širinu, takvu da samo neznatan broj elektrona uspije da se rekombinuje u njoj. Većinski dio elektrona, koji se nije rekombinovao u bazi, difuzijom dolazi do drugog spoja baza-kolektor, koji je, kao što je već rečeno, inverzno polarisan (njegovo polje ima smjer suprotan kretanju elektrona). Takvo polje pogoduje kretanju elektrona, odnosno, ono ih ubrzava i prosljeđuje kolektoru C. Kako je smjer struje suprotan smjeru kretanja elektrona, vidimo da se, na ovaj način, struja iz kolektora, uz male izmjene, prenosi do emitora.

Simboli n-p-n i p-n-p tranzistora dati su na slici 6.17.



Slika 6.17 Simbol bipolarnog tranzistora za tipove: a) n-p-n; b) p-n-p.

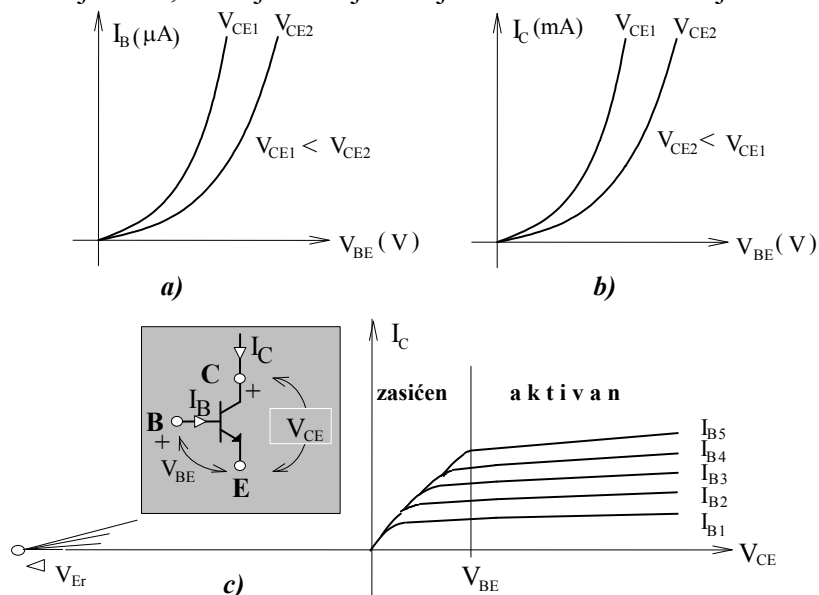
### Statičke karakteristike tranzistora

Za bolje razumijevanje rada tranzistora, veoma važne su njegove statičke karakteristike. One predstavljaju grafičke prikaze odnosa ulaznih, ili izlaznih struja, i ulaznih, ili izlaznih napona. Prije prelaska na samu analizu, potrebno je jednu od elektroda (priključaka) uzeti za zajedničku. Neka to bude, u ovom slučaju, emitor. Tada se kaže da je tranzistor u **spoju sa zajedničkim emitorom**. Spoj sa zajedničkim emitorom je za praksu najinteresantniji slučaj. Osim toga, postoje i spoj sa zajedničkom bazom i spoj sa zajedničkim kolektorom. Tipični izgledi familija: ulaznih, prenosnih i izlaznih karakteristika, za tranzistor u spoju sa zajedničkim emitorom, dati su na slici 6.18.

Sa familije ulaznih karakteristika, vidi se da se, povećanjem napona kolektor-emitor, pomoću koga se vrši inverzna polarizacija spoja baza-kolektor, struja baze smanjuje, jer se, povećanjem napona inverzne polarizacije, povećava širina oblasti prostornog tovara, što ima za posljedicu smanjenje efektivne širine baze, odakle slijedi i smanjenje struje rekombinacije u bazi, i povećanje struje inverzno polarisanog p-n spoja, te se, na taj način, smanjuje i rezultatna struja baze. Povećanjem napona kolektor - emitor, povećava se struja kolektora  $I_C$ , zbog toga što se, u užoj bazi, rekombinuje manji broj elektrona dospjelih iz emitora.

Na izlaznim karakteristikama, označena su dva režima rada tranzistora; zasićeni i aktivni. Pri aktivnom režimu kolektorske struje su praktično nezavisne od napona kolektor-emitor. Zavisnost ipak postoji, i ogleda se u blagom nagibu karakteristika.

S druge strane, režim zasićenja nastupa pri direktnoj polarizaciji oba p-n spoja (sama granica je kada su naponi kolektor-emitor i emitor-baza jednaki, jer je, u tom slučaju, napon kolektor-baza, koji je razlika ova dva napona, jednak nuli). Sa statičkih karakteristika je očigledno, da je, u aktivnom režimu, kolektorska struja zavisna samo od ulaznog napona baza-emitor, odnosno od ulazne struje baze, što nije slučaj kada je tranzistor u zasićenju.



Slika 6.18 Statičke karakteristike tranzistora: a) Ulazna; b) Prenosna; c) Izlazna.

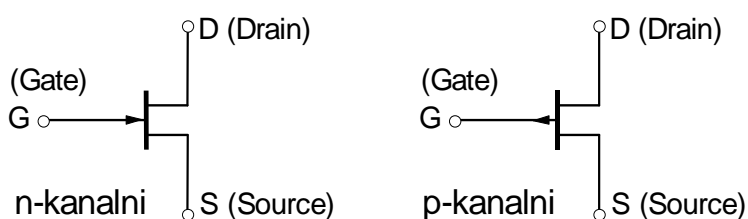
Pri radu sa tranzistorom, neophodno je poznavati ograničenja koja postoje u pogledu dovedenih napona na njegovim krajevima, kao i struja kroz njega, pri kojima neće doći do

njegovog oštećenja. Unutar tih ograničenja nalazi se tzv. **oblast sigurnog rada tranzistora**. Ta oblast ograničena: maksimalnom snagom disipacije iznad koje bi se tranzistor zagrijavao do oštećenja, naponom proboja inverzno polarisanog p-n spoja i maksimalnom strujom pri kojoj neće doći do pregorijevanja veza unutar kućišta tranzistora.

Posebne vrste tranzistora, kod kojih se struja uspostavlja zahvaljujući djelovanju električnog polja, nazivaju se tranzistori sa efektom polja. Postoji više vrsta, ali mi ćemo razmatrati samo dvije JFET, ili, skraćeno, FET (field effect transistor) i MOSFET (metal oxide semiconductor field effect transistor),

### ***FET (field effect transistor)***

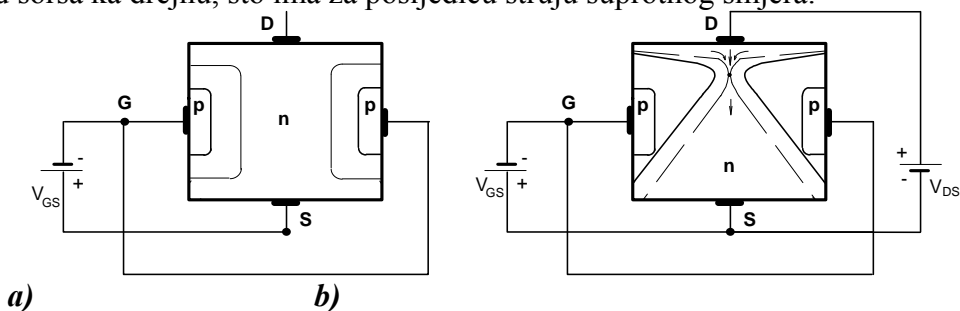
FET-ovi su tranzistori koji se sastoje od po dvije oblasti p ili n tipa poluprovodnika između kojih se nalazi jače dopirana oblast (kanal) suprotnog tipa. Zavisno od toga da li je kanal n ili p tipa, razlikuju se n kanalni i p kanalni FET-ovi, čiji simboli su dati na slici 6.19.



*Slika 6.19 Simboli n-kanalnog i p-kanalnog FET-a.*

Na slici 6.19: sa G je označen priključak koji se naziva gej (analogan bazi kod bipolarnog tranzistora), D predstavlja drejn, a S sors (analogni kolektoru i emitoru, respektivno). Da bismo analizirali rad n kanalnog FET-a, posmatrajmo njegovu strukturu sa naponima polarizacije prikazanim na slikama 6.20a i 6.20b.

Sa slike 6.20, jasno je da FET, kao i bipolarni tranzistor, ima dva p-n spoja, pri čemu su, u ovom slučaju, oba inverzno polarisana naponom  $V_{GS}$ . Za uspostavljanje struje od drejna ka sorsu, koristi se električno polje dobijeno pomoću izvora  $V_{DS}$ . Pod uticajem električnog polja, elektroni se kreću od sorsa ka drejnu, što ima za posljedicu struju suprotnog smjera.



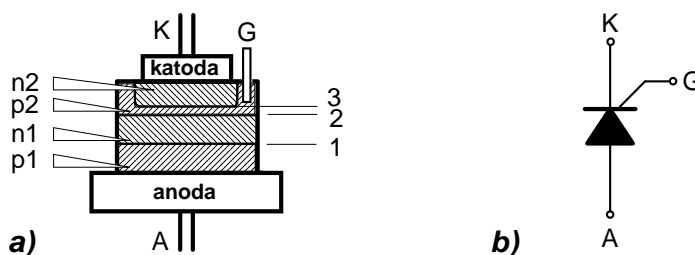
*Slika 6.20 Principske šeme FET-a: a) bez b) sa priključenjem napona  $V_{DS}$ .*

### **6.2.3 Tiristori**

Tiristor je poluprovodnička komponenta čije su karakteristike veoma bliske idealnom prekidaču. Naime, tiristori imaju dva moguća stanja. U jednom stanju impedansa tiristora je vrlo velika, a struja kroz njega praktično je jednaka nuli. U drugom stanju, impedansa tiristora je praktično jednaka nuli, što znači da praktično ne predstavlja nikakav otpor proticanju struje kroz

njega, već je struja kroz njega ograničena samo spoljnjim otporom. Prelazak iz jednog u drugo stanje vrši se najčešće kontrolisano

Tiristor se realizuje za struje od nekoliko ampera do nekoliko kiloampera, i za napone od nekoliko desetina volti do nekoliko kilovolti. Njegova struktura prikazana je na slici 6.21a, a njegov simbol na slici 6.21b.

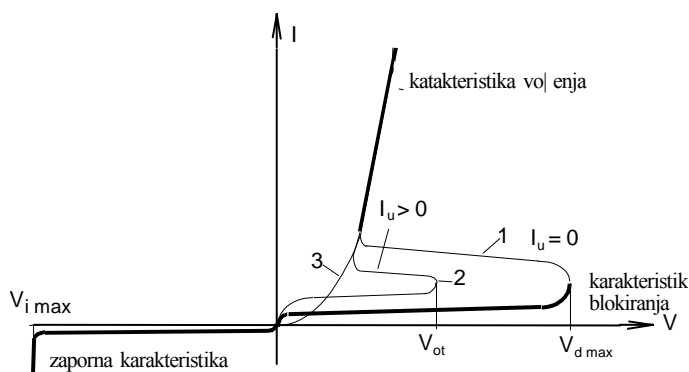


Slika 6.21 Tiristor: a) Struktura; b) Simbol.

Kako se vidi sa slike 6.21a, tiristor čine slojevi p-n-p-n, posmatrajući od anode prema katodi. Kod tiristora, pored anode (A) i katode (K), postoji još jedna elektroda G (gate) na sloju p<sub>2</sub>, koja se naziva upravljačka elektroda. Sloj p<sub>2</sub> realizuje se kao dosta tanji od ostalih slojeva. Spoljašnji slojevi (p<sub>1</sub> i n<sub>2</sub>) realizuju se kao jako dopirani, a unutrašnji slojevi (n<sub>1</sub> i p<sub>2</sub>) kao slabo dopirani.

Kada je anoda A na nižem potencijalu od katode, tada su spojevi 1 i 3 inverzno polarisani, tiristor je zatvoren i kroz njega ne može da teče struje (osim veoma slabe inverzne struje). Ovo stanje predstavljeno je **inverznom ili zapornom karakteristikom** na slici 6.22. Kada je anoda na višem potencijalu od katode, (kolo upravljačke elektrode otvoreno), tada su spojevi 1 i 3 direktno polarisani, dok je spoj 2 inverzno polarisan, opet je tiristor zatvoren, tj struja kroz tiristor neće teći, odnosno može da teče samo struja jednaka inverznoj struji spoja 2. Ovo stanje predstavljeno je **karakteristikom blokiranja** tiristora na slici 6.22. Dakle, pri otvorenom upravljačkom kolu (na elektrodi G nema napona) tiristor ne provodi struju, bez obzira da li je na anodi pozitivan ili negativan napon u odnosu na katodu.

Na slici 6.22 prikazan je tipični oblik karakteristike tiristora I u opsegu zaporne (inverzne) karakteristike i u opsegu karakteristike blokiranja, tiristor praktično predstavlja otvoren prekidač (impedansa tiristora vrlo velika, struja kroz tiristor zanemarljivo mala). Pri inverznom naponu  $V_{i\max}$  i pri direktnom naponu  $V_{d\max}$ , koji predstavljaju karakteristične parametre tiristora, i koji su približno jednaki po intenzitetu, dolazi do tzv. lavinskog proboja. Ne treba dozvoliti da dođe do lavinskog proboja, jer tada može doći do razaranja tiristora.



Slika 6.22 Karakteristike tiristora

Naglasimo da smo do sada razmatrali rad tiristora pri otvorenom kolu upravljačke elektrode G. Dovođenjem različitih napona na upravljačku elektrodu G, može se upravljati naponom otvaranja ("paljenja") tiristora  $V_{ot}$ . Naime, kad je G pozitivno u odnosu na K, to

omogućava da se u sloj  $p_2$  uvedu dodatni nosioci, što omogućava da se tiristor prevede iz opsega blokiranja u opseg provođenja tiristora. U tom slučaju, tiristor se može posmatrati kao dvije redno vezane diode. Na prevođenje tiristora iz stanja blokiranja u stanje provođenja može se djelovati i jačinom upravljačke struje. Jača upravljačka struja izaziva "paljenje" tiristora pri nižem naponu  $V_d$ .

Napomenimo takođe, da prelazak tiristora iz stanja blokiranja u stanje vođenja zavisi i od temperature na spojevima. Pri višim temperaturama spojeva, prelazak iz stanja blokiranja u stanje vođenja dešava se pri nižem direktnom naponu. Ako je temperatura spoja nedozvoljeno visoka, može se desiti da tiristor uopšte ne može da blokira. Zbog toge se hlađenju tiristora mora posvetiti posebna pažnja.

Kada se tiristor otvori, tj. kad pređe u stanje provođenja, nije više neophodna struja upravljačkog kola, da takvo stanje održava. Dakle, za otvaranje tiristora dovoljno je na G dovesti naponski impuls relativno kratkog trajanja, jer se stacionarno stanje provođenja tiristora uspostavlja relativno brzo (reda  $\mu s$ ). Nakon dovođenja u stanje provođenja, tiristor može ponovo zatvoriti (blokirati) tek nakon što se smanji napon do neke vrijednosti, koja će sniziti struju kroz kolo ispod neke vrijednosti karakteristične za tiristor (struja održavanja tiristora). Zatvaranje tiristora može se, dakle, vršiti samo sniženjem napona na njegovim krajevima, tj. smanjenjem struje kroz njega ispod vrijednosti struje održavanja.

Tiristori imaju veoma širok spektar primjene. Mogu se koristiti kao prekidači, ispravljači naizmjenične struje u jednosmjernu, pretvarači jednosmjerne struje u naizmjeničnu, pretvarači naizmjenične struje jedne učestanosti u naizmjeničnu struju druge učestanosti.

#### **6.2.4 Integrisana kola**

Kada je na jednom kristalu proizvedeno više tranzistora, dioda i pasivnih elemenata (R,C), koji su međusobno povezani, dobiju se kola koja nazivamo integrisana kola (monolitska). Za kristal silicijuma, na kome je realizovano integrisano kolo, u upotrebi je naziv čip (Chip).

Pri proizvodnji integrisanih kola, mora se voditi računa da pojedini elementi moraju biti međusobno izolovani. Zatim, proizvodnja pasivnih elemenata (kondenzatora i otpornika) sasvim se razlikuje od proizvodnje dioda i tranzistora. Postoji više tehnika proizvodnje integrisanih kola. Navešćemo samo tehniku izolovanja i tehniku tankih filmova.

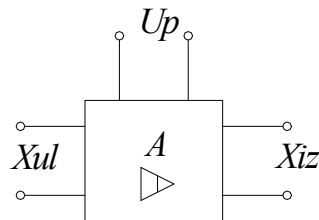
Jedan jedini kristal silicijuma, koji čini integrisano kolo, može da sadrži veliki broj različitih elemenata; tranzistora, dioda, otpornika i kondenzatora. Broj elemenata može da iznosi čak i više hiljada. Ovako veliki broj aktivnih i pasivnih elemenata postavlja niz problema. Najvažniji među njima su razmještaj elemenata, interno povezivanje i povećanje gustine pakovanja. Ograničenje u gustini pakovanja je disipirana snaga. Naime, svaki element disipira (rasipa) određenu snagu, što rezultira povećanjem temperature čipa, a time utiče i na vrijednosti performansi elemenata čipa.

### **6.3 Osnovi pojačavačke tehnike**

Pojačanje naizmjeničnih signala, jedna je od najvažnijih primjena aktivnih elektronskih elemenata. No, i u drugim primjenama, u osnovi primjene stoji rad aktivnog elementa kao pojačavača. Aktivni elementi se mogu upotrijebiti za pojačanje struje, napona i snage, mada ove primjene ne treba smatrati striktno odvojenim. Naime, kada se govori o pojačavaču napona, treba smatrati da je pojačavač prevashodno namijenjen pojačanju napona, što ne znači da izlazna snaga nije daleko veća od ulazne.

#### **6.3.1 Mjerni pojačavači**

Osnovni zadatak mjernih pojačavača je pojačanje slabih strujnih i naponskih signala, dobijenih pri mjerenju različitih fizičkih veličina. Ulazna (mjerena) veličina  $X_{ul}$  dovodi se na ulaz pojačavača (sl.6.23), a na njegovom izlazu dobije se pojačana električna veličina  $X_{iz}$ .



Slika 6.23 Blok šema pojačavača

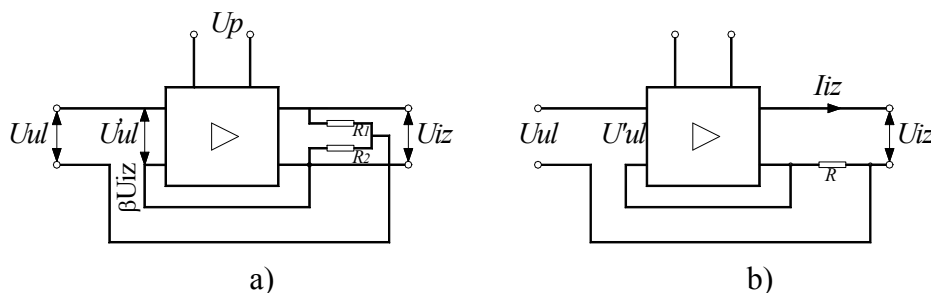
Zahvaljujući pomoćnom izvoru, sa koga se dovodi napona  $U_p$ , generalno, snaga na izlazu pojačavača višestruko je veća od snage koju pojačavač uzima na ulazu.

Zavisno od izvedbe pojačavača postiže se manje ili više pouzdan odnos između izlazne i ulazne veličine. Pojačanje ulazne veličine može se ostvariti upotrebom tranzistora, magnetnih pojačavača i sl.

Od pojačavača se redovno zahtijeva stalan odnos između izlazne i ulazne veličine, tj. zahtijeva se stalno **pojačanje**  $A$ :

$$A = \frac{U_{iz}}{U_{ul}} = const.$$

Generalno, ovaj odnos neće biti konstantan, već će zavisiti od veličina ulaznog i pomoćnog napona kao i od "starenja" upotrebljenih elemenata u pojačavaču, čiji se parametri tokom vremena mogu promijeniti. Zadovoljavajuća stabilizacija pojačanja se postiže primjenom **negativne povratne sprege**

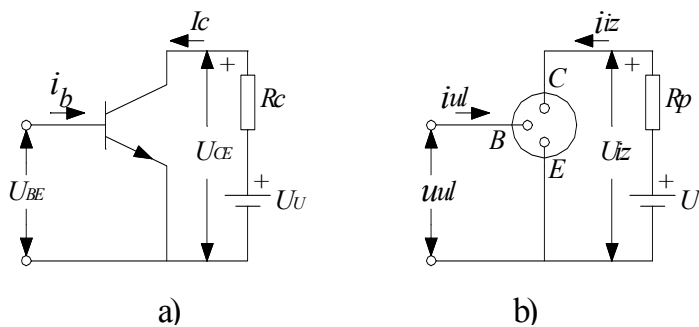


Slika 6.24 Pojačavač sa negativnom povratnom spregom  
a) Naponskom, b) Strujnom

Na sl. 6.24a prikazana je naponska negativna povratna sprega, kod koje se na ulaz pojačavača dovodi napon  $U'_{ul}$ , proporcionalan izlaznom naponu. Njegov smjer je suprotan smjeru ulaznog napona  $U_{ul}$ . Pravilnim i preciznim izborom otpornika  $R_1$  i  $R_2$  možemo dobiti dovoljno pouzdano stalno pojačanje  $A$ . Istina, pojačanje sa povratnom spregom nešto je manje od pojačanja bez povratne sprege, ali je ono znatno manje podložno promjenama. U opisanom pojačavaču traži se stalan odnos izlaznog i ulaznog napona. Međutim, češće se traže pojačavači sa stalnim odnosom izlazne struje i ulaznog napona. Ovakvi pojačavači nazivaju se pojačavači sa strujnim izlazom, prikazan na sl.6.24b, kod kojega se negativna povratna sprega ostvaruje tako što se na ulaz pojačavača dovodi pad napona  $RI_{iz}$ . I ovdje povratna sprega uzrokuje smanjenje pojačanja.

### Tranzistor kao pojačavač

Do sada smo razmatrali samo tranzistor priključen na jednosmjerne napone. i koristili smo njegove statičke karakteristike (sl.6.18). Posmatrajmo sada vezu tranzistora, takođe sa zajedničkim emitorom, u čijem se izlaznom kolu nalazi otpornik  $R_p$  i spoljnji napon  $U$ , a na ulaz je doveden napon  $u_{ul}$ , koji, pored jednosmjernog napona napajanja  $U_0$ , sadrži i promjenljivi **napon signala**  $u_s = U_m \sin \omega t$  (sl.6.25)



Slika 6.25 Šema tranzistora sa zajedničkim emitorom.

Kada se na ulaz tranzistora dovede i promjenljivi ulazni napon  $u_s$ , tada će se taj napon superponirati sa postojećim jednosmjernim naponom  $U_0$ , pa je ulazni napon:

$$u_{ul}(t) = U_0 + U_m \sin \omega t$$

Dakle, rezultatni ulazni napon će se mijenjati u ritmu promjene napona signala, što ima za posljedicu promjene struje baze od vrijednosti  $I_{B1}$  do vrijednosti  $I_{B2}$  (slika 6.26a). Ove promjene struje (baze) na ulazu, imaju za posljedicu promjene (kolektorske) izlazne struje, što opet uzrokuje promjene izlaznog napona, ali sa znatno većom amplitudom od amplitude ulaznog napona (slika 6.26b). Sa sl. 6.25b se vidi da je:

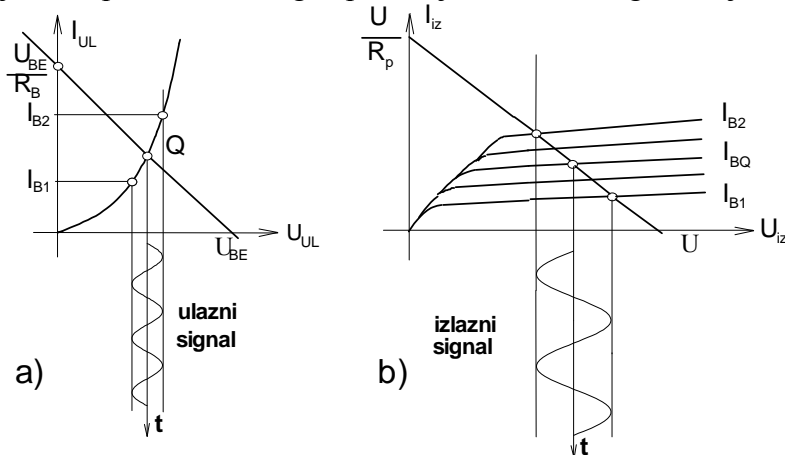
$$U_{iz} = U - R_p I_{iz} \quad (6.1)$$

Jednačina (6.1) predstavlja tzv. **radnu pravu tranzistora**, i zadovoljena je u tački presjeka sa krivom  $I_{iz} = f(U_{iz})$ , koja se naziva **radna tačka tranzistora**. Iz jednačina (6.1) je očigledno, da je pri odsustvu izlazne struje, izlazni napon jednak naponu spoljnog izvora ( $U_{iz} = U$ ), a pri izlaznom naponu jednakom nuli, izlazna struja jednaka je:

$$I_{iz} = \frac{U}{R_p}$$

Za rad tranzistora sa naizmjeničnim naponima, zahtijeva se da radna tačka bude što bliža sredini radne prave jer se, na taj način, omogućava najveća promjena izlaznog napona, izazvana promjenama ulaznog napona.

Zaključimo da jednosmjerni naponi i struje isključivo služe za dovođenje tranzistora u aktivni režim. Ulazni signali ne smiju imati proizvoljne amplitude, kako radna tačka ne bi izašla iz oblasti aktivnog rada, jer, u tom slučaju, tranzistor ne bi radio kao pojačavač, već bi ulazio u režime zakočenja i zasićenja, čime bi se vršilo izobličenje izlaznog napona. Sa slika 6.26, jasna je potreba da radna tačka bude na sredini radne prave. Na taj način, omogućavaju se jednake maksimalne promjene amplitude izlaznog napona u jednom i u drugom smjeru.



Slika 6.26 Analiza rada tranzistora pomoću statičkih karakteristika.

Naglasimo da je vremenska promjena izlaznog signala na sl. 6.26b potpuno identična sa vremenskom promjenom ulaznog signala na sl. 6.26a, samo što je amplituda izlaznog signala  $\mu$  puta veća i suprotnog znaka.  $\mu = -\frac{\Delta U_{iz}}{\Delta U_{ul}}$  je **pojačanje tranzistora**.

U prethodnom razmatranju, konstatovali smo da je postavljanje radne tačke u željenom dijelu karakteristike veoma bitno, jer se, na taj način, tranzistor unaprijed projektuje za ograničene ulazne napone, sa tačno poznatim maksimalnim odstupanjima. Međutim, problemi mogu nastati onda kad se radna tačka, mimo naše volje, pomjeri na jednu ili na drugu stranu radne prave. Ovakvo, neželjeno, pomjeranje radne tačke može da nastupi usljed promjene temperature. Iz tog razloga se pri izradi tranzistora posebna pažnja posvećuje njegovom hlađenju.

### **Pojačavači snage**

Pojačavači snage se veoma često nazivaju i izlazni pojačavački stepeni, jer se od njih zahtijeva da daju što veću snagu potrošaču. Ranije razmatrani pojačavač sa zajedničkim emitorom može se upotrijebiti za ovu svrhu. U tom slučaju, u cilju povećanja stepena iskorišćenja, treba omogućiti da se radna tačka kreće na radnoj pravoj duž čitavog aktivnog režima na izlaznoj karakteristici. Istovremeno, radna prava treba biti postavljena tako da njena dužina između osa bude najveća. Na ovaj način, dobija se maksimalna izlazna snaga. Treba zapaziti da će kretanje radne tačke duž čitavog aktivnog režima imati za posljedicu njen prolazak i kroz nelinearne djelove karakteristike, što će uzrokovati izobličenja pojačanog signala.

### **Električna analogija**

Postoji niz fizičkih pojava koje se opisuju istim matematičkim modelom. Isto tako, postoji niz načina da se izvjesne računске operacije obave ne neki drugi način –analogan način. Poluga sa jednim osloncem između svojih krajeva, najprostiji je mehanički analogni sistem za množenje sa konstantom. Silu na jednom kraju poluge, koja uravnotežava silu na drugom kraju poluge, možemo izračunati iz odnosa dužina krakova poluge. Postoji niz uređaja koji omogućavaju analogno računanje. Mi ćemo našu pažnju zadržati na principima analognog elektronskog računanja, koje je veoma korisno i često se primjenjuje u naučnom i razvojnom radu. U ove svrhe se koristi tzv. **analogni elektronski računar**, pomoću koga se, na relativno jednostavan način, može simulirati rad električnih, mehaničkih, termičkih, tehnoloških i drugih sistema, i tako pratiti proces ili rad nekog fizičkog sistema. Mijenjajući početne uslove, ulazne vrijednosti i parametre, i posmatrajući neposredno rezultate, može se relativno brzo, jeftino i jednostavno doći do rješenja koje obezbjeđuje optimalan rad sistema.

Analogni elektronski računar sadrži niz operacionih pojačavača, otpornika i kondenzatora za obrazovanje kola za rješavanje matematičkih operacija. Zatim, generator funkcija raznih oblika napona, osciloskop za praćenje vremenskih promjena signala. Osim toga, uređaj mora da ima i izvor jednosmjernog napona za napajanje operacionih pojačavača. Programiranje računara sastoji se u sklapanju operacionih pojačavača u analogni računar, koji treba da obavi računске radnje, zahtijevane zadatim jednačinama

Za bolje razumjevanje principa električne analogije i rada analognih elektronskih računara, potrebno je da se prethodno upoznamo sa nekim električnim kolima i elementima.

#### **6.3.2 Operacioni pojačavači**

Operacioni pojačavači su specijalna integrisana kola, koja se koriste sa negativnom povratnom spregom. Osobine rezultujućeg kola u potpunosti su funkcija samo komponenata vezanih oko pojačavača.

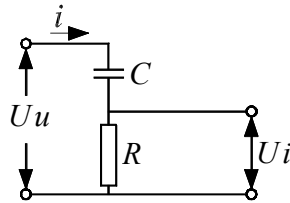
Idealni operacioni pojačavač ima sljedeće osobine:

- beskonačno veliko naponsko pojačanje,
- beskonačno veliku ulaznu impedansu,
- izlaznu impedansu ravnu nuli, vrijeme odziva ravno nuli i
- izlazni napon jednak nuli, kada je ulazni napon jednak nuli.

Iz ovih osobina idealnog pojačavača proizilaze dva pravila koja će nam poslužiti pri detaljnijim analizama:

1. Kako je ulazna impedansa beskonačno velika (realno ona je reda  $10^5$ ), zanemaruju se struje koje ulaze u bilo koji od ulaza u pojačavač.
2. Kako je pojačanje beskonačno veliko, to je napon između ulaznih krajeva pojačavača jednak nuli.

Svaki elektronski pojačavač pojačava manji signal u veći, i, pri tome se nastoji, da pojačanje bude konstantno. Matematički to znači da se ulazni signal umnožava sa jednom konstantom. Operacioni pojačavači su specijalni pojačavači, koji ulazne signale mogu i da sabiraju, integrale ili diferencijale. Posmatrajmo kolo na slici 6.27.



Slika 6.27 Kolo za diferencijaljenje

Napon  $u_u$  je ulazni napon,  $i$  neka je on neka funkcija vremena. Jednačina dinamičke ravnoteže električnih sila je:

$$u_u - \frac{q}{C} - Ri = 0; \text{ imajući u vidu da je: } q = \int idt, \text{ imamo:}$$

$$u_u = \frac{\int idt}{C} + Ri$$

Ako elemente u kolu odaberemo tako da je zadovoljeno  $X_C = \frac{1}{\omega C} \gg R$  tada se vrijednost ulaznog napona može izraziti kao:

$$u_u \cong \frac{\int idt}{C} \quad (6.2)$$

Iz jednačine (6.2) vrijednost za struju  $i$  je:

$$i = C \frac{du_u}{dt}$$

Kako ta struja protiče kroz otpornik  $R$ , vrijednost izlaznog napona je:

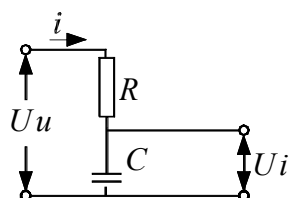
$$u_i = Ri \cong RC \frac{du_u}{dt} \quad (6.3)$$

Iz izraza (6.3) očigledno je da se izlazni napon na ovom kolu dobija kao izvod ulaznog napona, dakle, ovako formirano kolo se koristi za diferencijaljenje.

Za integraljenje se takođe koristi redno R-C kolo (sl.6.28) samo su sada elementi kola odabrani tako da aktivna otpornost bude mnogo veća od reaktivne otpornosti, tj. da zadovoljavaju relaciju  $R \gg X_C$ , pa se struja u ovom kolu može izraziti, npr. u kompleksnom obliku kao  $I = u_u/R$ . Iz jednačine dinamičke ravnoteže električnih sila, pisane u kompleksnom obliku:

$$\underline{U}_i = \frac{I}{j\omega C} = \frac{\underline{U}_u}{j\omega CR} = \frac{1}{CR} \int \underline{U}_u dt \quad (6.4)$$

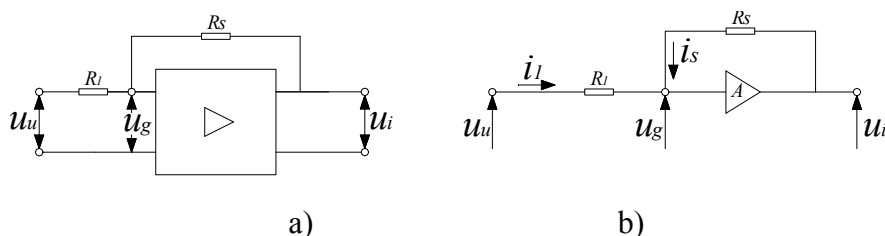
vidimo da je izlazni napon srazmjeran integralu ulaznog napona.



Slika 6.28 Kolo za integraljenje

Operacioni pojačavači se izvode sa negativnom povratnom spregom. Primjenom negativne povratne sprege, dobijaju se kola sa interesantnim osobinama. Negativna povratna sprega uspostavlja se tako što se signal sa izlaza, preko kola povratne sprege, dovodi na ulaz operacionog pojačavača. Na taj način, dobija se konstantno pojačanje. Dakle, negativna povratna sprega se protivi bilo kakvoj promjeni izlaznog napona. Na ovaj način, obezbijedena je konstantnost pojačanja operacionog pojačavača sa kolom negativne povratne sprege.

Na slici 6.29a prikazano je kolo operacionog pojačavača sa povratnom spregom. Otpornik povratne sprege  $R_s$  povezuje izlaz i ulaz pojačavača A. Na ulazu je vezan i otpornik  $R_1$ . Na slici 6.29b prikazana je uobičajena blok-šema ovog kola.



Slika 6.29 a) Operacioni pojačavač, b) Šematski prikaz

Kako se operacioni pojačavači izrađuju sa beskonačno velikom ulaznom impedansom (idealni), to znači da struja na ulazu u pojačavač mora biti jednaka nuli, tako da je zbir struja  $i_1$  i  $i_s$  koje se sastaju u čvoru na ulazu u pojačavač, jednak nuli, tj.

$$\frac{u_u - u_g}{R_1} + \frac{u_i - u_g}{R_s} = 0 \quad (6.5)$$

kako je  $u_i = Au_g$  (A je pojačanje) jednačina (6.5) se može pisati na slijedeći način:

$$\frac{u_u}{R_1} + \frac{u_i}{R_s} - \frac{u_i}{A} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_s} \right) = 0$$

odakle dobijamo vrijednost izlaznog napona:

$$u_i = \frac{-\frac{u_u}{R_1}}{\frac{1}{R_s} - \frac{1}{A} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_s} \right)} = \frac{-u_u \frac{R_s}{R_1}}{1 - \frac{R_s}{R_1} + \frac{R_s}{A}} \quad (6.6)$$

Pošto je pojačanje A kod realnih pojačavača  $A > 10^5$ , a vrijednost otpornika  $R_1$  i  $R_s$  se uvijek odaberu tako da bude zadovoljeno:

$$A \gg \left( \frac{R_s}{R_1} + 1 \right)$$

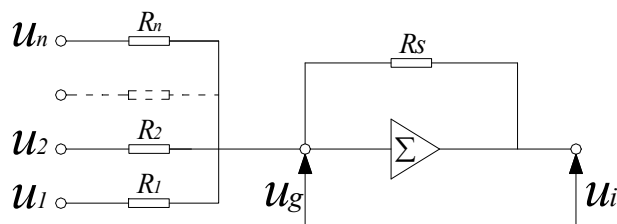
što znači da se izraz (6.6) svodi na:

$$u_i \cong -u_u \frac{R_s}{R_1} \quad (6.7)$$

Dakle, izlazni napon je u opoziciji (suprotnog znaka) sa ulaznim naponom i umnožen je konstantom  $R_s/R_1$  – pojačanjem.

## Sumator

Sabiranje više ulaznih napona ostvaruje se kolom predstavjenim na slici 6.30.



Slika 6.30 Sabirač (sumator)

Pođimo od činjenice da je struja na ulazu u pojačavač jednaka nuli, pa je zbir svih struja u čvoru g jednak nuli:

$$\frac{u_1 - u_g}{R_1} + \frac{u_2 - u_g}{R_2} + \dots + \frac{u_n - u_g}{R_n} + \frac{u_i - u_g}{R_s} = 0 \quad (6.8)$$

Pošto je  $u_g = u_i / A$ , a kako je pojačanje  $A$  vrlo veliko, možemo uzeti da je  $u_g$  zanemarivo po veličini u odnosu na ulazne napone  $u_1, u_2, \dots, u_n$ , pa se jednačina (6.8) može pisati:

$$\frac{u_1}{R_1} + \frac{u_2}{R_2} + \dots + \frac{u_n}{R_n} \cong -\frac{u_i}{R_s}$$

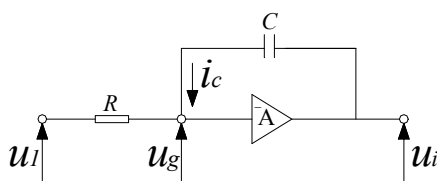
pa je izlazni napon:

$$u_i = -\left( u_1 \frac{R_s}{R_1} + u_2 \frac{R_s}{R_2} + \dots + u_n \frac{R_s}{R_n} \right) \quad (6.9)$$

Izlazni napon sastoji se, dakle, od zbira ulaznih napona, od kojih je svaki pomnožen konstantom, koja se može slobodno izabrati. Cio izraz je pomnožen sa  $-1$ , pa da bi se dobio stvarni zbir, potrebno je da taj napon prođe kroz operacioni pojačavač podešen za množenje sa  $-1$ .

## Integrator

Šema integratora data je na slici 6.31. Kao što se sa slike vidi, umjesto otpornika za povratnu spregu  $R_s$ , ovdje je postavljen kondenzator  $C$ , koji djeluje kao integraleći element.



Slika 6.31 Integrator

Kao i ranije, posmatračemo zbir struja u čvoru na ulazu u pojačavač. Struja kroz kondenzator  $C$  je:

$$i_c = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} \text{ pa je:}$$

$$\frac{u_1 - u_g}{R} + C \frac{d(u_i - u_g)}{dt} = 0 \quad (6.10)$$

Znajući da je pojačanje veliko, slijedi da je  $u_g$  relativno malo, pa ga zanemarimo, jednačina (6.10) postaje:

$$\frac{u_i}{R} \cong -C \frac{du_i}{dt} \quad (6.11)$$

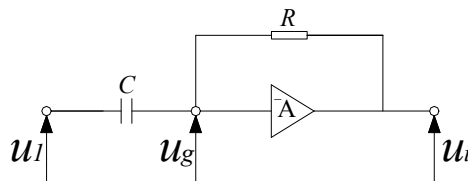
Integraleći lijevu i desnu stranu jednačine (6.11) dobijamo:

$$u_i \cong -\frac{1}{RC} \int u_1 dt \quad (6.12)$$

Ako parametre  $R$  i  $C$  u kolu integratora odaberemo, npr.  $R = 1M\Omega$  i  $C = 1\mu F$ , vremenska konstanta  $RC$  je 1 sekund, pa je izlazni napon jednak integralu ulaznog. Ako se pusti da ulazni napon dovoljno dugo djeluje na pojačavač, tada će i mali konstantni ulazni napon, na izlazu proizvesti vrlo veliki izlazni napon. U praktičnim izvedbama, ovaj napon je ograničen sa ograničenjem vremena rada tranzistora kojeg sadrži pojačavač. Primjetimo da se i na integrator može priključiti više ulaznih signala, i da će svi oni biti integraljeni.

### Diferencijator

Vezivanjem otpornika i kondenzatora u kolu operacionog pojačavača kao na slici 6.32 dobija se diferencijator, čija je osobina da diferencira ulazni napon.



Slika 6.32 Diferencijator

Prvi Kirhofov zakon za čvor na ulazu u pojačavač je:

$$\frac{u_1 - u_g}{R} + C \frac{d(u_1 - u_g)}{dt} = 0 \quad (6.13)$$

Uzimajući iste pretpostavke kao u prethodnim slučajevima, tj.  $u_g = u_i / A$ ;  $A > 10^5$ , pa se napon  $u_g$  na ulazu zanemaruje, za izlazni napon dobijamo:

$$u_i = -RC \frac{du_1}{dt} \quad (6.14)$$

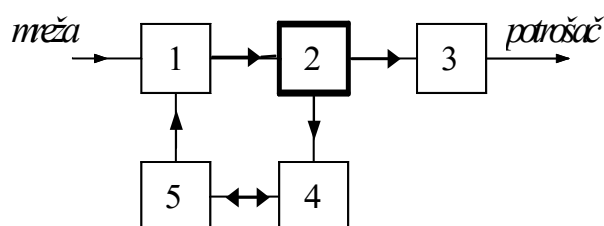
Treba napomenuti da se upotreba diferencijatora u računarima nastoji izbjeći (najčešće podešavajući pisanje diferencijalnih jednačina). Zašto? Ako ulazni signal ima veoma strm porast ili pad, njegov izvod može dati nedozvoljeno visok izlazni napon.

## 6.4 Energetski elektronski pretvarači

Energetski elektronski pretvarači su uređaji koji međusobno povezuju električne sisteme, preko beskontaktnih prekidačkih elemenata, ili, kako se često kaže, preko elektronskih ventila. Kako elektronski ventili mogu biti upravljivi i neupravljivi, to i energetski elektronski pretvarači mogu biti upravljivi i neupravljivi.

Energetski elektronski pretvarači uvijek se sastoje iz više sklopova: (vidi sl.6.33)

- 1- sklop za prilagođavanje pretvarača na napojnu mrežu
- 2- pretvarački sklop
- 3- sklop za prilagođavanje pretvarača na potrošač
- 4- upravljački sklop
- 5- sklop za regulaciju i zaštitu



Slika 6.33 Blok-šema energetskog pretvarača

Zavisno od toga kakve sisteme povezuju, energetske elektronske pretvarače se dijele na:

- ispravljajući**; povezuju naizmjenični i jednosmjerni sistem,
- invertori** (izmjenjivači); povezuju jednosmjerni sistem sa naizmjeničnim,
- konvertori**; povezuju istovrsne sisteme, i mogu biti:
  - jednosmjerni konvertori**; povezuju dva jednosmjerna sistema, i
  - naizmjenični konvertori**; povezuju dva naizmjenična sistema.

Za energetske elektronske pretvarače, koji povezuju raznovrsne električne sisteme, karakteristično je da je tok energije kroz njih jednosmjernan, a kroz pretvarače koji povezuju istovrsne električne sisteme, tok energije je dvosmjernan.

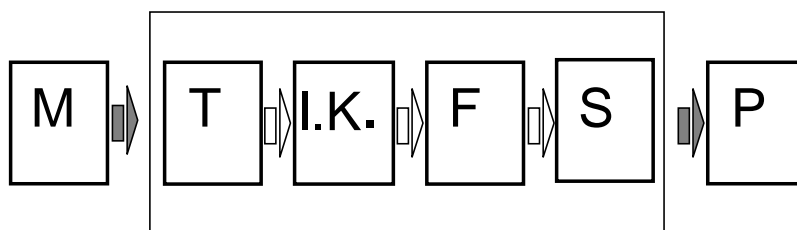
Pod idealnim elektronskim energetskim pretvaračem podrazumijevamo pretvarače koji, svu energiju dovedenu iz jednog sistema na njihov ulaz, predaju na svom izlazu drugom sistemu.

#### 6.4.1 Ispravljajući

Ispravljajući su elektronski uređaji koji pretvaraju energiju naizmjeničnog sistema u energiju jednosmjernog sistema, odnosno povezuju naizmjenične i jednosmjerne električne sisteme. Prema načinu povezivanja sa nazmjeničnim sistemom, ispravljajući dijelimo na jednofazne, trofazne i višefazne ispravljajuće spojeve. Prema načinu korišćenja energije naizmjeničnog sistema, ispravljajući spojevi mogu da budu polutalasn i punotalasni. Pri ispravljanju, na izlazu se dobije pulsirajući napon, pa, u tom smislu, postoje jednopulsni i višepulsni ispravljajući sklopovi. Prema stepenu upravljivosti, razlikujemo neupravljive sklopove u kojima su ventili diode i tranzistori, i upravljive ispravljajuće sklopove, gdje su ventili upravljivi tiristori.

#### Struktura i opšte karakteristike ispravljajuća

Opšta blok-šema ispravljajuća, u koju ulaze: transformator (T), ispravljajuće kolo (I.K.), filter (F) i stabilizator (S), prikazana je na slici 6.34. Ulazni element ispravljajuća predstavlja mreža (M) naizmjeničnog napona. Na izlaz ispravljajuća veže se potrošač (prijemnik) (P).



Slika 6.34 Blok-šema ispravljajuća.

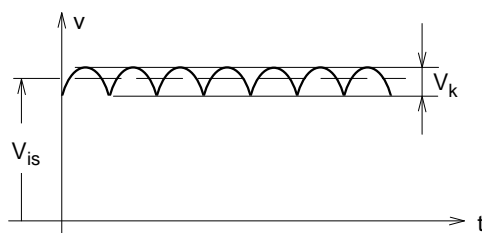
Svi elementi ispravljajuća, na svoj način, doprinose kvalitetu ispravljanja, odnosno, primjena svakog od njih doprinosi da se realizuju povećani zahtjevi u odnosu na kvalitet izlaza ispravljajuća.

Savremeni ispravljajući razlikuju se prema: funkciji ispravljanja (polutalasn i punotalasno), šemi veza elemenata u ispravljajućem kolu i prema broju faza izvora naizmjenične struje. Takođe, ispravljajući se dijele na neupravljive i upravljive ispravljajuće.

Kod ispravljajuća, ulaz je naizmjenična, a izlaz jednosmjerna veličina. Logičan je interes da izlaz (jednosmjerna veličina) bude, više ili manje, blizak po obliku stalnom naponu, ili struji. U vezi sa tim, definiše se veličina, na osnovu koje se može kritički suditi o kvalitetu ispravljajuća, valovitost

$$W = \frac{V_k}{V_{is}} \cdot 100\%,$$

gdje je  $V_{is}$  srednja vrijednost ispravljenog napona, a  $V_k$  veličina koja karakteriše naizmjeničnu komponentu u izlaznom naponu ispravljajuća, saglasno slici 6.35.



Slika 6.35 Ilustracija definicije valovitosti.

Niža vrijednost  $V_k$  ukazuje na bolji kvalitet ispravljača.

Druga važna veličina, kojom se karakteriše kvalitet stabilizatora, a time i ispravljača kod koga je ovaj primijenjen, je faktor stabilizacije. Ovaj faktor (S) definiše se kao odnos relativne promjene ulaznog napona ( $dV_u/V_u$ ) i relativne promjene izlaznog napona ( $dV_i/V_i$ ) stabilizatora.

Što je veće S, to se stabilizator (a time i ispravljač sa stabilizatorom) smatra kvalitetnijim.

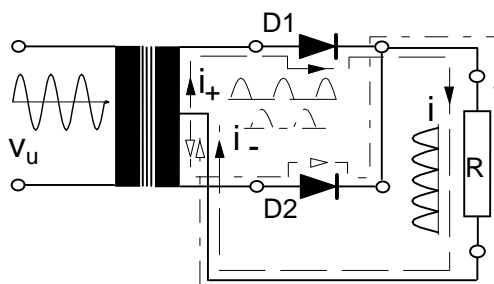
### Neupravljiva ispravljačka kola

Neupravljivi ispravljači sadrže ispravljačka kola sa ispravljačkim diodama. Ova ispravljačka kola realizuju se za polutalasno ili za punotalasno ispravljanje. Kola mogu, takođe, biti realizovana za ispravljanje jednofaznih, ili za ispravljanje višefaznih veličina.

Kod polutalasnog ispravljanja ispravljačko kolo propušta (ispravlja) samo jednu poluperiodu naizmjenične struje (dovedene u direktnom smjeru), dok se druga poluperioda "gubi" (zbog inverzne polarizacije), i nema je na izlazu. Nedostatak ovakvog ispravljanja je, za najčešće primjene, nepovoljan oblik izlaznog napona.

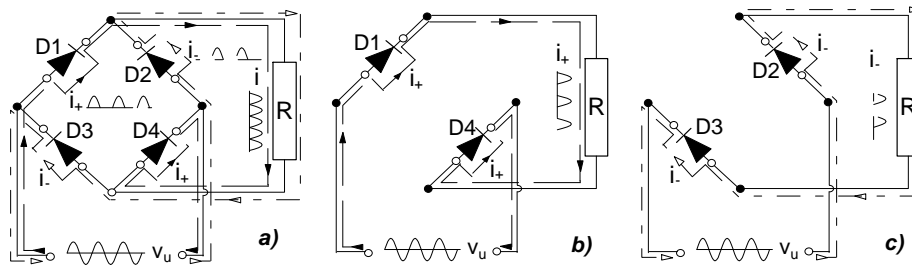
Punotalasnim ispravljanjem iskorišćava se pozitivna i negativna poluperioda naizmjeničnog napona, tako da kroz prijemnik, za vrijeme obje poluperiode, teče struja u istom smjeru.

Dvije su osnovne koncepcije ispravljačkih kola za punotalasno ispravljanje - ispravljačko kolo sa transformatorom sa srednjom tačkom i ispravljačko kolo u mostnom spoju - Grečov spoj (Greatz).



Slika 6.36. Ispravljačko kolo za punotalasno ispravljanje sa transformatorom sa srednjom tačkom.

Ispravljačko kolo, sa transformatorom sa srednjom tačkom, realizuje se prema šemi sa slike 6.36. Ispravljanje, u ovom spoju, zahtijeva primjenu transformatora sa srednjom tačkom u sekundarnom kolu, na čija dva kraja se priključuju ispravljačke diode. Za vrijeme pozitivne poluperiode na ulazu, naponi na sekundaru transformatora su takvih smjerova da je direktno polarisana dioda D1, a inverzno dioda D2. U toku negativne poluperiode ulaznog napona, situacija je obrnuta - provodi dioda D2, dok je dioda D1 zakočena. Primijetimo da, u oba slučaja, struja kroz potrošač R ima isti smjer, te su, stoga, obje poluperiode ulaznog napona iskorišćene, pa se na izlazu dobija napon u tzv. punotalasnom obliku. Radi jednostavnosti, diode su posmatrane kao idealni elementi.

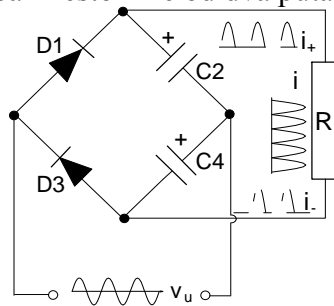


Slika 6.37 Grecovo spojevanje: a) Potpuna šema; b) Ekvivalentna šema za pozitivni polutalas; c) Ekvivalentna šema za negativni polutalas.

Grecovo spojevanje se prema šemi prikazanoj na slici 6.37a. Pozitivni polutalas ulaznog napona polariše u direktnom smjeru diode D1 i D4 (slika 6.37b), čega je posljedica pojava pozitivnih polutalasa struje  $i_+$  kroz potrošač (R). S druge strane, negativni polutalas ulaznog napona polariše u direktnom smjeru diode D2 i D3 (slika 6.37c), pa otuda negativni polutalasi struje  $i_-$  kroz potrošač. Ukupna struja kroz potrošač jednaka je sumi ove dvije struje  $i=i_++i_-$ , kako je to pokazano na slici 6.37a.

Nekad se zahtijeva da se izlazni napon dijagonale mosta, za isti ulazni napon, poveća. Jedan od jednostavnih načina da se to postigne realizuje se tako što se, umjesto diode D2 i D4, u most vežu kondenzatori odgovarajućih kapacitivnosti (C2 i C4), kako je to pokazano na slici 6.38.

Za vrijeme pozitivne poluperiode, kad je dioda D1 otvorena, kondenzator C2 se puni do amplitudske vrijednosti  $V_m$ . Za to vrijeme, dioda D3 je zatvorena. Pri sljedećoj poluperiodi, otvara se D3 i puni C4, sa smjerom kao na slici. Za to vrijeme D1 je zatvorena. Za vrijeme dok se puni kondenzator C4, kondenzator C2 se prazni preko R vremenskom konstantnom  $\tau=RC_2$ . Ukoliko je  $\tau$  veliko, onda je potrebno i veliko vrijeme da se C2 isprazni. Dakle, za slučaj kad je  $\tau$  mnogo veće od trajanja poluperiode, C2 će se veoma malo isprazniti, odnosno, zadržaće vrijednost  $V_m$ . Kako su kondenzatori C2 i C4 vezani redno, napon na krajevima potrošača je praktično udvostručen. Idealno posmatrano, izlazni signal se, na ovaj način, povećava dva puta. Međutim, ovo povećanje izlaznog napona je ipak nešto niže od dva puta.

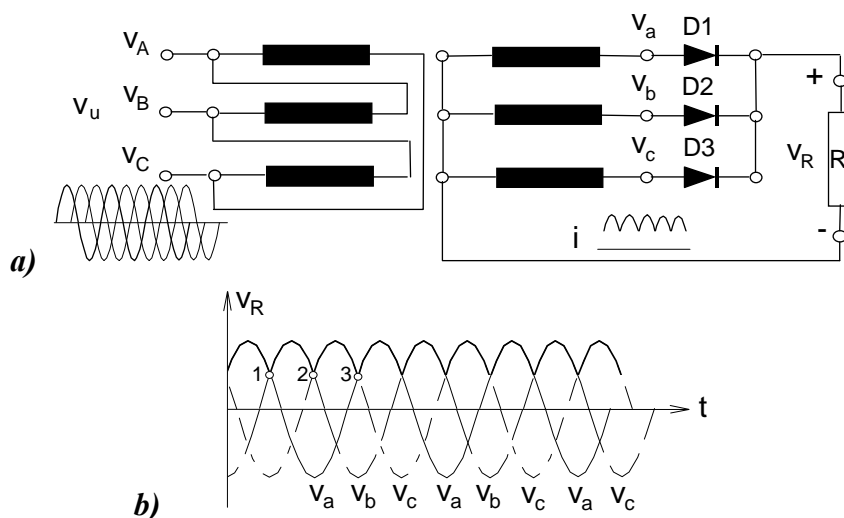


Slika 6.38 Mostni ispravljač udvostručivač napona.

Postavlja se pitanje, koje su prednosti i nedostaci razmotrenih punotalasnih ispravljača. Za razliku od ispravljača sa Grecovim spojem, u slučaju ispravljača sa transformatorom sa srednjom tačkom potrebno je dvostruko više navojaka u kolu sekundara transformatora da bi se dobio napon iste srednje ispravljene vrijednosti. Prednost Grecovog spoja je i u tome što diode "trpe" dvostruko manji inverzni napon. Međutim, njegov nedostatak je upotreba četiri diode, kod kojih je ukupna disipacija i ukupni pad napona veći.

Trofazno ispravljačko kolo za polutalasnno ispravljanje šematski je prikazano slici 6.39a.

Dakle, trofazno ispravljačko kolo za polutalasnno ispravljanje ima transformator na čiju svaku fazu sekundara je priključena po jedna ispravljačka dioda (tri jednofazna ispravljačka kola objedinjena vezama kao na slici 6.39a).



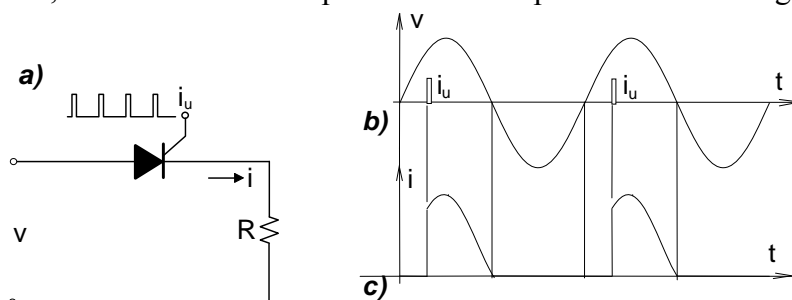
Slika 6.39 Trofazno ispravljjačko kolo za polutalasnno ispravljjanje:  
a) šema; b) Oblik izlaznog napona.

Sa slike 6.39b može se uočiti princip ispravljjanja kod ovog ispravljjača. Naime, dok je napon  $v_a$  na anodi diode D1 veći od napona katode D1, ova dioda vodi. To ima za posljedicu da je, u idealnom slučaju, napon na katodi D1, a samim tim i na katodama D2 i D3, jednak naponu  $v_a$ . Znači, dioda, D2 je zakočena sve dok napon na njoj anodi ( $v_b$ ) ne postane veći od napona  $v_a$  (tačka 1 na slici 6.39b). Tada se napon sa anode D2 prenosi na katode sve tri diode, te kako je napon na katodi D1 veći od napona na njoj anodi, dioda D1 je zakočena. Potpuno analogno ovome, u tački 2, dioda D3 počinje da vodi, a dioda D2 je zakočena. Ovakve promjene režima rada dioda, izazvane uticajem mrežnog napona, nazivaju se prirodna komutacija

### Ispravljjačko kolo sa tiristorom

Kad je dovedeni napon naizmjeničnog karaktera, onda postoje uslovi za provođenje pri jednom karakteru polutalasa, a za zatvaranje tiristora odmah nakon prolaska napona kroz nulu (vrijeme potrebno za zatvaranje je takođe vrlo kratko).

Na slici 6.40a prikazano je jedno ispravljjačko kolo sa tiristorom za polutalasnno ispravljjanje. Za razliku od kola za polutalasnno ispravljjanje sa diodom, koje daje na izlazu potpune polutalase pristigle u direktnom smjeru, ovo kolo omogućava dobijanje samo djelova tih polutalasa, u zavisnosti od trenutka otvaranja tiristora, odnosno od trenutka dovođenja impulsa na upravljačko kolo, kako je to pokazano na slikama 6.40b i 6.40c. Dakle, pomoću ovakvog kola, moguće je upravljati vrijednošću ispravljenog napona, odnosno ispravljene struje, pa se ispravljjači, koji sadrže ovakvo kolo, nazivaju upravljivi ispravljjači. Napomenimo da je prikaz struje na slici 6.40c idealizovan, jer niti se tiristor otvara neposredno nakon dovođenja impulsa na upravljačku elektrodu, niti se on zatvara neposredno nakon prolaska dovedenog napona kroz nulu.

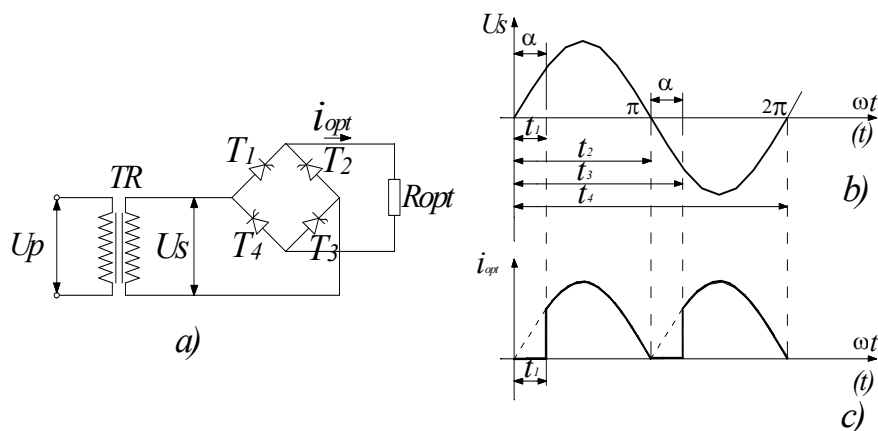


Slika 6.40 Polutalasnno upravljivi ispravljjač a)šema veza; b) Oblik dovedenog napona;  
c) Oblik struje kroz prijemnik.

Prema istom principu, kao i kod neupravljivih ispravljača, koncipiraju se trofazni upravljivi ispravljači, samo se, umjesto sa ispravljačkim diodama, radi sa tiristorima. Primjera radi, dajemo šemu veza jednofaznog punotalasnog ispravljača u mosnom spoju (sl.6.41).

Neka je u trenutku  $t=0$  gornji izvod transformatora pozitivan. U trenutku  $t_1$  na upravljačke elektrode tiristora  $T_1$  i  $T_3$  dovedu se upravljački impulsi - tada su tiristori  $T_1$  i  $T_3$  u stanju vođenja i u periodu od  $t_1$  do  $t_2$  kroz njih protiče struja opterećenja  $i_{opt}$ . U trenutku  $t_2$  struja prolazi kroz nulu, pa se tiristori  $T_1$  i  $T_3$  gase. U trenutku  $t_3$  dovodi se upravljački impuls na tiristore  $T_2$  i  $T_4$ . Sada je donji kraj transformatora pozitivan i struja teče kroz tiristor  $T_2$ , opterećenje  $R_{opt}$ , kroz tiristor  $T_4$  i ponovo se zatvara u transformator. Primjetimo da u oba slučaja struja kroz opterećenje teče u istom smjeru, što je uočljivo i na dijagramu  $i_{opt} = f(t)$  na (sl. 6.41c).

Kada opterećenje sadrži i induktivitet, struja kasni za naponom, i neće prolaziti kroz nulu u trenutku  $t_2$  kada i napon, već nešto kasnije. Situacija sa gašenjem tiristora se unekoliko komplikuje, ali to prevazilazi naše interesovanje.



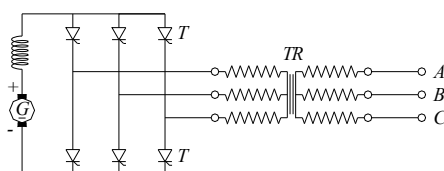
Slika 6.41 Ispravljač; a) Šema veze, b) Ulazni napon, c) Struja kroz otpornik  $R_{opt}$

### 6.4.2 Invertori

Invertori su energetske elektronske prevarači, koji pretvaraju energiju jednosmjernog sistema u energiju naizmjeničnog sistema.

Prema karakteru opterećenja, invertore dijelimo na zavisne (mrežom vođene) i autonomne (nezavisne) invertore. Autonomni se dalje dijele na strujne, naponske i rezonantne autonomne invertore. Prema karakteru izlaznog napona, invertori mogu biti jednofazni, trofazni i višefazni. Prema stepenu upravljivosti, invertori se dijele na neupravljive i upravljive. Za invertovanje većih jednosmjernih snaga koriste se mrežom vođeni invertori sa izlaznim naponom učestanosti 50Hz. Šema trofaznog mostnog, mrežom vođenog, invertora data je na sl. 6.42.

Odgovarajućim upravljanjem tiristorima, jednosmjerni napon generatora G invertira se u trofazni naizmjenični napon na krajevima A,B,C transformatora.



Slika 6.42 Trofazni mostni inverter

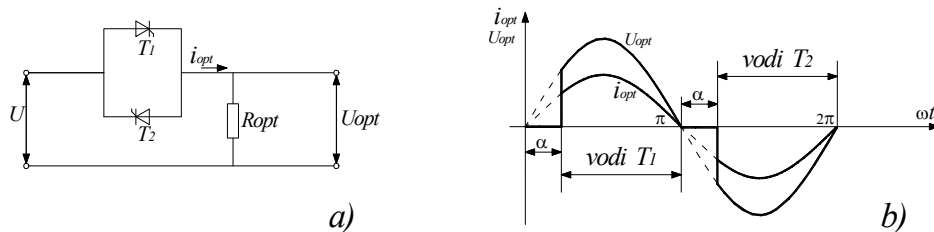
### 6.4.3 Konvertori

Konvertori su energetske elektronske prevarači, koji povezuju dva sistema naizmjenične struje -naizmjenični konvertori- ili dva sistema jednosmjerne struje -jednosmjerni konvertori-.

## Naizmjenični konvertori

Naizmjenični konvertori pretvaraju naizmjenični napon jednog nivoa u naizmjenični napon drugog nivoa, ili naizmjenični napon jedne učestanosti u naizmjenični napon druge učestanosti.

Šema veze **pretvarača nivoa napona** kao i dijagram vremenske promjene napona opterećenja  $U_{opt}$  i struje opterećenja  $i_{opt}$  dati su na sl. 6.43



Slika 6.43 Konvertor napona; a) Šema veze, b) Napon i struja opterećenja

Očigledno, nivo napona na potrošaču  $R_{opt}$ , može se mijenjati promjenom ugla paljenja tiristora  $T_1$  i  $T_2$ .

**Pretvarači frekvencije** mogu biti direktni ili indirektni. Indirektni pretvarači imaju jednosmjerni međustepen, te prema tome imaju dvostruko pretvaranje energije; najprije naizmjeničnu učestanosti  $f_1$  pretvaraju u jednosmjernu energiju, a zatim jednosmjernu pretvaraju u naizmjeničnu učestanosti  $f_2$ , što uzrokuje umanjeње stepena korisnog djelovanja  $\eta$ . Izlazna učestanost može biti veća ili manja od ulazne.

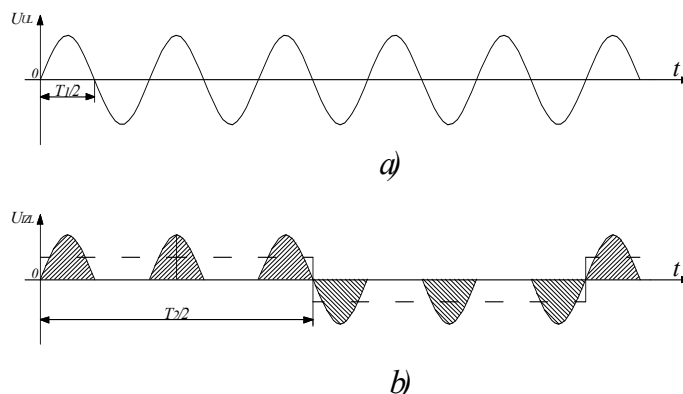
Direktni pretvarač učestanosti može koristiti istu šemu veza kao i pretvarač napona sl.6.43. Primjenimo li kroz  $n$  perioda ulaznog napona učestanosti  $f_1$  upravljačke impulse samo na tiristoru  $T_1$  (sa uglom paljenja  $\alpha = 0^\circ$  na sl.6.44), a zatim kroz isti broj perioda upravljačke impulse samo na tiristoru  $T_2$ , na potrošaču ćemo imati naizmjenični napon učestanosti:

$$f_2 = \frac{f_1}{2n+1},$$

jer je, kako se sa sl.6.44, vidi

$$\frac{T_2}{2} = nT_1 + \frac{T_1}{2}.$$

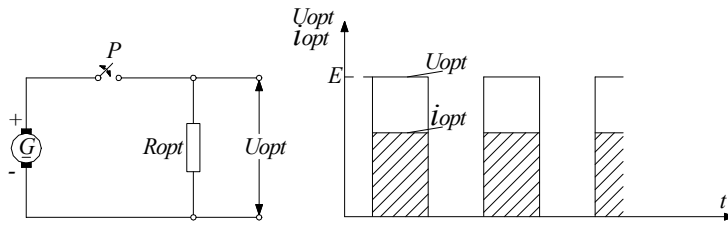
Očigledno je da se na ovaj način izlazna frekvencija može samo smanjiti. Za slučaj veće izlazne frekvencije od ulazne, šema veza i posebno upravljanje tiristorima se znatno uslođnjava.



Slika 6.44 Konverzija učestanosti

## Jednosmjerni konvertori

Jednosmjerni konvertori pretvaraju jedan nivo jednosmjernog napona u drugi ili jednu jačinu struje u drugu. Ovo pretvaranje može se vršiti direktno i indirektno.



Slika 6.45 Jednosmjerni konvertor; a) Šema veze, b) Napon i struja opterećenja

Kod indirektnog pretvaranja pretvarač se sastoji od invertora koji jednosmjerni napon pretvara u naizmjenični i ispravljača koji naizmjenični napon invertora ispravlja. Ovakvi pretvarači imaju prednost kada je odnos izlaznog i ulaznog napona velik, ali im je nedostatak u dvostrukoj obradi snage (u invertoru i ispravljaču) pa im je stepen korisnog djelovanja relativno mali. Kod direktnih jednosmjernih pretvarača koriste se impulsne metode pretvaranja i regulisanja napona sl.6.45.

Prekidač P se periodično zatvara i otvara i tada na opterećenju  $R_{opt}$  napon ima oblik impulsa čija je amplituda jednaka jednosmjernom naponu napajanja E.

Odnos trajanja impulsa  $t_I$  unutar perioda ponavljanja i vremena trajanja perioda T naziva se faktor ispunje  $\gamma = t_I / T$ . Promjenom koeficijenta  $\gamma$  moguće je uticati na srednju i efektivnu vrijednost napona na opterećenju.

Pri konstantnom vremenu trajanja perioda  $T = \text{const.}$ , srednja vrijednost napona na opterećenju je:

$$U_{opt.sr} = \frac{1}{T} \int_0^T U_{opt} \cdot dt = \frac{1}{T} \int_0^{t_I} E \cdot dt = E \frac{t_I}{T} = E\gamma$$

a efektivna vrijednost:

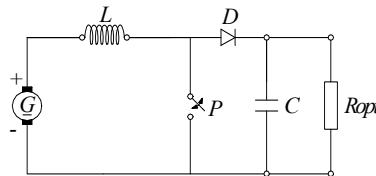
$$U_{opt.sr} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U_{opt}^2 \cdot dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{t_I} E^2 dt} = E\sqrt{\gamma}$$

Srednja vrijednost struje opterećenja je:

$$I_{opt.sr} = \frac{U_{opt.sr}}{R_{opt}}$$

Na ovaj način izlazni napon je moguće samo smanjiti. Smanjenje izlaznog napona je u rasponu od nule ( $t_I = 0, \gamma = 0$ ) do napona napajanja E ( $t_I = T, \gamma = 1$ ).

Ako se na izlazu želi dobiti viši napon od ulaznog to se može realizovati prema šemi na sl.6.46:



Slika 6.46 Jednosmjerni konvertor za povećanje napona

Kada se prekidač P zatvori, na prigušnici L vlada napon E izvora. Za vrijeme  $t_I$  uključenosti prekidača u prigušnici se akumulira magnetna energija. Kada se prekidač otvori, energija nagomilana u prigušnici prenosi se na kondenzator C i potrošač  $R_{opt}$ . Na taj način, kada je prekidač P otvoren, magnetna energija prigušnice se koristi kao privremeni dodatni naponski izvor spojen u seriju sa naponskim izvorom E. Za vrijeme  $t_I$  (prekidač P zatvoren) kondenzator C napaja potrošač  $R_{opt}$  energijom nagomilanom u kondenzatoru, a dioda D sprečava pražnjenje kondenzatora preko zatvorenog prekidača P.