



1. SKLOPOVI S DIODAMA

Poluvodičke diode su elektroničke komponente s dvije elektrode, različitih izvedbi, svojstava i namjena. U ovom poglavlju opisane su dioda opće namjene (u stručnoj literaturi susreće se naziv ispravljačka dioda, engl. rectifier diode, njem. Gleichrichterdiode), Zenerova, tunelska i kapacitivna dioda. Višeslojne diode opisane su u poglavlju 9. *Sklopovi s tiristorima i jednospojnim tranzistorom*, a fotodioda, svijetleća i laserska dioda u poglavlju 10. *Optoelektronički elementi*.

Načela djelovanja dioda poznata su čitatelju od prije iz predmeta ELEKTROTEHNIČKI MATERIJALI I KOMPONENTE. Stoga su ovdje ukratko opisana osnovna svojstva dioda proširena sa znanjima o tehničkim podacima važnim za uporabu. Glavni dio čine prikazi izvedbi, svojstava i primjene sklopova s diodama.

Ovo poglavlje ima četiri dijela. U prvom su dijelu opisana svojstva dioda opće namjene. U sljedeća dva su opisane izvedbe, svojstva i primjene ispravljačkih sklopova te ograničavača i restauratora napona. U posljednjem dijelu dan je prikaz svojstava i osnovne primjene Zenerove, tunelske i kapacitivne diode.

1.1. Svojstva dioda

Propusno polarizirana dioda
Zaporno polarizirana dioda
Strujno-naponska karakteristika diode
Karakteristične veličine diode

1.2. Ispravljački sklopovi

Poluvalni ispravljač
Punovalni ispravljač
Filtriranje ispravljenoga napona
Udvostručivač napona
Umnoživač napona

1.3. Diodni ograničavači i restauratori

Serijski diodni ograničavači
Paralelni diodni ograničavači
Dvostrani diodni ograničavač
Restauratori

1.4. Ostale vrste dioda

Zenerova dioda
Stabilizacija napona sa Zenerovom diodom
Tunelska dioda
Kapacitivna dioda

Pregled ključnih pojmova
Dodatna literatura za učenike

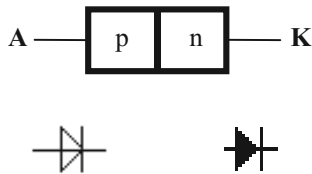
Zadaci za laboratorijske vježbe

Vježba 1.1. Poluvalni ispravljač
Vježba 1.2. Punovalni ispravljač
Vježba 1.3. Stabilizacija napona sa Zenerovom diodom

Pitanja i zadaci za ponavljanje i provjeru znanja

1.1. SVOJSTVA DIODA

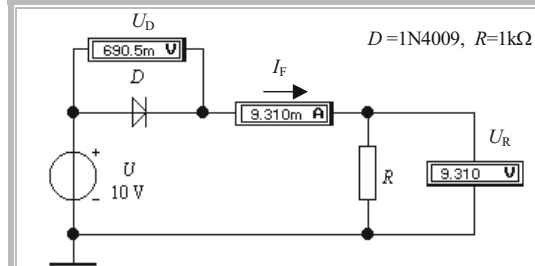
Diode opće namjene (ispravljačke diode) sastoje se od p -tipa i n -tipa poluvodiča. Izvod povezan s p -tipom poluvodiča je **anoda** (A), a izvod povezan s n -tipom je **katoda** (K). Mogu biti silicijske i germanijske. Imaju svojstvo da u jednemu smjeru propuštaju struju, a u drugom ne.



Slika 1.1. Građa i simboli diode

Propusno polarizirana dioda

Pokus



Slika 1.2. Spoj propusno polarizirane diode

Kad je anoda na pozitivnijem potencijalu od katode, za diodu se kaže da je propusno polarizirana. U tom slučaju kroz diodu teče **propusna struja** I_F (engl. forward current, njem. Durchlassstrom) od anode prema katodi. Na diodi je mali pad napona koji za silicijske diode iznosi oko 0,7V, a za germanijske diode oko 0,3V (slika 1.2.).

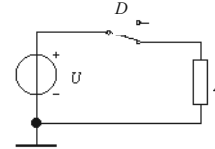
Veličina struje, koja teče kroz propusno polariziranu diodu, ovisi o priključenom naponu U i otporu R otpornika spojenog u seriju s diodom:

$$I_D = I_F = \frac{U - U_D}{R}$$

Dioda ima vrlo mali otpor pa je napon $U_D = U_F$ na diodi mali. Stoga je gotovo sav napon U priključenog izvora na otporu R , pa struja kroz diodu približno iznosi:

$$I_D = I_F = \frac{U}{R}$$

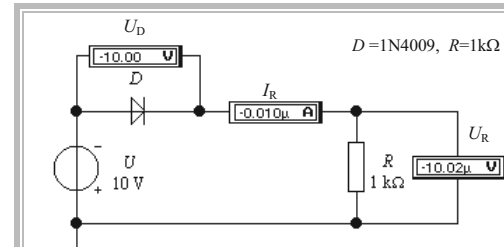
Stoga se može reći da dioda djeluje kao uključena sklopka (slika 1.3.).



Slika 1.3. Djelovanje propusno polarizirane diode

Zaporno polarizirana dioda

Pokus

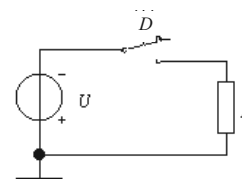


Slika 1.4. Spoj zaporno polarizirane diode

Kad je katoda na pozitivnijem potencijalu od anode, dioda je zaporno (nepropusno) polarizirana (slika 1.4.). Kroz diodu teče u smjeru od katode prema anodi vrlo mala struja I_R koja se naziva **zaporna** ili **reverzna struja** (preostala struja, engl. reverse current, njem. Sperrstrom). Zaporna struja za germanijske diode reda je veličine desetak mikroampera, a za silicijske desetak nanoampera.

U serijskom spoju zaporno polarizirane diode i otpornika R zaporna struja diode može se zanemariti. Stoga se može zanemariti i pad napona na otporniku R . Zaporni napon na diodi (engl. reverse voltage, njem. Sperrspannung) jest napon U priključenog izvora. Dioda djeluje praktično kao isključena sklopka (slika 1.5.).

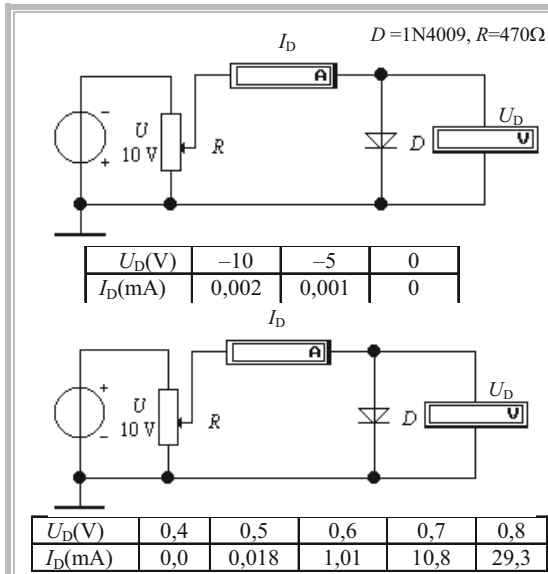
$$I_D = I_R = 0 \quad U_D = U = 0$$



Slika 1.5. Zaporno polarizirana dioda djeluje kao isključena sklopka

Strujno-naponska karakteristika diode

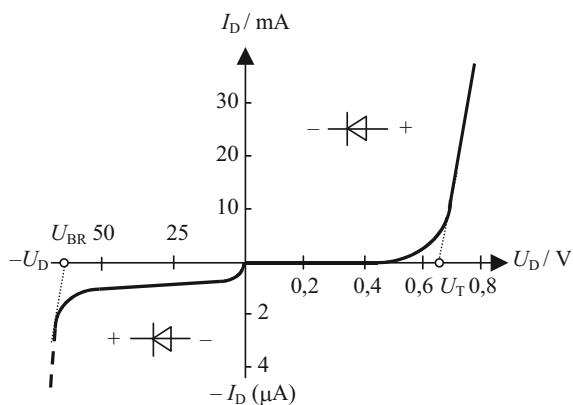
Pokus



Slika 1.6. Snimanje strujno-naponske karakteristike diode

Grafički prikaz odnosa napona i struje diode naziva se **strujno-naponska karakteristika diode** (slika 1.7.).

Dioda postaje vodljiva kad priključeni napon propusne polarizacije dostigne iznos U_T . Taj napon naziva se **napon praga** ili **napon koljena** (engl. threshold voltage, knee voltage, njem. Schwellspannung, Schleusenspannung) i za silicijske diode iznosi oko 0,6V-0,7V, a za germanijske diode 0,2V-0,3V.



Slika 1.7. Strujno-naponska karakteristika diode

Ako priključeni napon zaporne polarizacije prijeđe vrijednost U_{BR} , koja se naziva **probojni napon** (engl. breakdown reverse voltage, njem. Durchbruchspannung), dolazi do nagloga porasta reverzne struje, što može prouzročiti uništenje diode. Iznos probojnoga napona za diode kreće se u rasponu od nekoliko desetaka volta do nekoliko kilovolta.

Karakteristične veličine diode

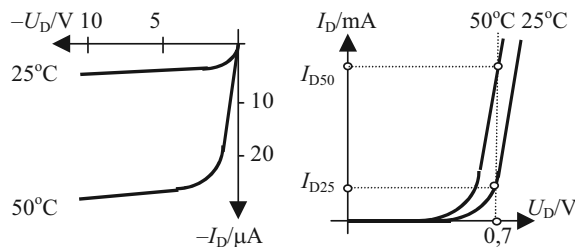
Najvažnije karakteristične veličine diode jesu:

- **dopuštena vrijednost napona zaporne polarizacije** U_R koja se smije priključiti na diodu a da ne dođe do njezina trajnog oštećenja
- **dopuštena jakost struje** I_F koja smije teći kroz diodu pri propusnoj polarizaciji a koja neće uzrokovati trajno oštećenje diode
- **dopušteni utrošak snage** P_{tot}
- **temperaturno područje rada**
- **oblik kućišta i raspored izvoda.**



Slika 1.8. Primjeri izvedbi dioda

Dopušteni zaporni napon silicijskih dioda iznosi od nekoliko desetaka pa do tisuću volta. Dopuštene jakosti struja dioda iznose od nekoliko desetaka miliampera do nekoliko kiloampera. Utjecaj temperature na karakteristike diode pokazan je na slici 1.9. U tvorničkim podacima karakteristične veličine dioda uvijek se daju za određeno područje temperatura.



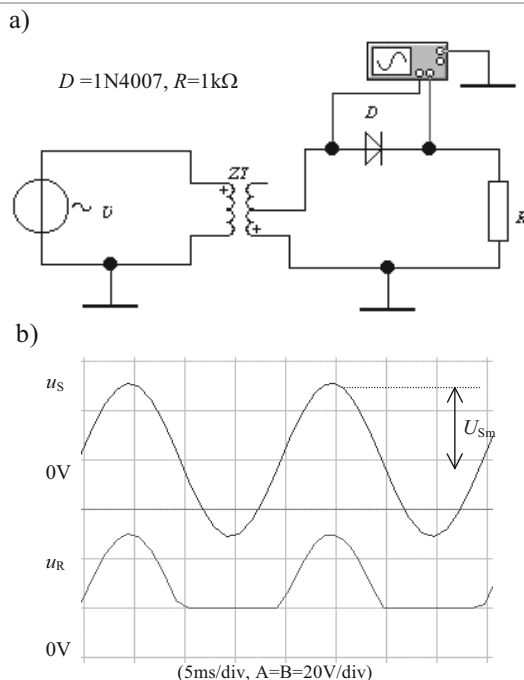
Slika 1.9. Utjecaj temperature na karakteristike diode

1.2. ISPRAVLJAČKI SKLOPOVI

Za normalan rad elektronički sklopovi trebaju istosmjerni napon napajanja. U tu se svrhu izmjenični napon mreže transformira na potrebnu vrijednost i zatim ispravlja. Ispravljanje se obavlja spojevima ispravljačkih dioda koji se nazivaju ispravljački sklopovi, kraće ispravljači (engl. rectifier circuits, njem. Gleichrichterschaltungen). Ispravljački spojevi mogu biti poluvalni i punovalni. Za dobivanje visokih napona s pomoću niskonaponskih elemenata upotrebljavaju se umnoživači napona (engl. voltage multipliers, njem. Spannungsvervielfacher).

Poluvalni spoj ispravljača

Pokus



Slika 1.10. Poluvalni ispravljač: a) shema, b) ulazni i izlazni napon

Poluvalni spoj ispravljača (engl. halfwave rectifier, njem. Einweggleichrichter) najjednostavniji je ispravljački spoj. Dioda propušta struju samo za vrijeme jedne poluperiode izmjeničnoga napona. Za spoj na slici 1.10.a to je pozitivna poluperioda. Stoga se na trošilu javlja samo pozitivni dio izmjeničnoga napona (slika 1.10.b). Srednja vrijednost izlaznoga napona ispravljača (istosmjerna komponenta), uz zanemareni pad napona na diodi, iznosi:

$$U_{ST} = \frac{U_{Sm}}{\pi} = 0,45U_S$$

gdje su U_{Sm} i U_S vršna, odnosno efektivna vrijednost napona na sekundaru transformatora, tj. na ulazu ispravljača. Dopuštena vrijednost napona zaporne polarizacije diode mora biti veća od U_{Sm} .

Primjer 1.1.

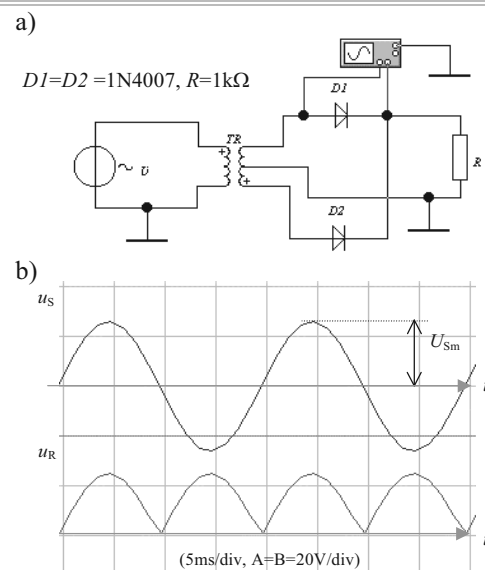
Koliki mora biti najmanje dopušteni napon zaporne polarizacije diode ako je sklop sa slike 1.10. priključen na mrežni napon, uz prijenosni omjer transformatora 10:1?

$$U_R > U_{Sm} = \frac{220V}{10V} \sqrt{2} = 31,11V$$

Punovalni spoj ispravljača

Znatno bolja svojstva imaju punovalni ispravljači. To su spoj s dvije diode (slika 1.11.) i mosni ili Graetzov spoj (slika 1.12.).

Pokus



Slika 1.11. Punovalni ispravljač: a) shema, b) ulazni i izlazni napon

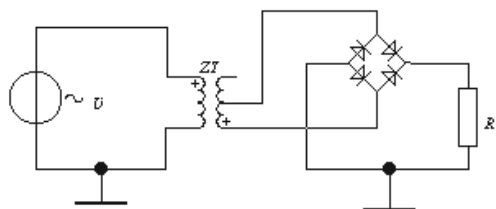
U spoju s dvije diode (engl. fullwave rectifier using a center-tapped transformer, njem. Mittelpunktleichrichter) za vrijeme pozitivne poluperiode napona na sekundaru transformatora vodljiva je dioda $D1$, a za vrijeme negativne poluperiode dioda $D2$. Struja teče kroz trošilo uvijek u istom smjeru pa se na njemu dobije pozitivan napon u obje poluperiode.

Srednja vrijednost napona na izlazu ispravljača (istosmjerna komponenta), uz zanemareni pad napona na diodi, iznosi:

$$U_{ST} = 2 \frac{U_{Sm}}{\pi} = 0,9U_S$$

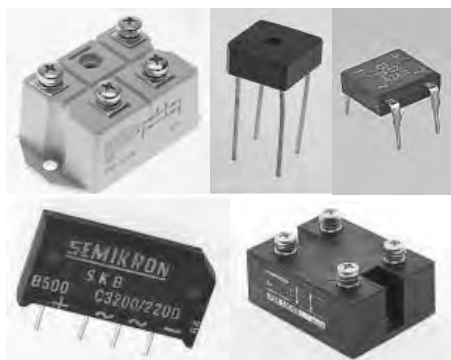
gdje su U_{Sm} i U_S vršna, odnosno efektivna vrijednost napona na sekundaru transformatora (napon gornjeg ili donjeg izvoda prema srednjem izvodu), tj. na ulazu ispravljača. Dopuštena vrijednost napona zaporne polarizacije diode mora biti veća od $2U_{Sm}$.

Isti oblik napona dobije se s pomoću ispravljača u mosnome spoju (Graetzov spoj, engl. bridge rectifier, njem. Brückenschaltung). U_{Sm} je vršna, a U_S efektivna vrijednost napona na sekundaru transformatora, tj. na ulazu ispravljača. Dopuštena vrijednost napona zaporne polarizacije diode mora biti veća od U_{Sm} . Spoj zahtijeva četiri diode ali je transformator jednostavniji.



Slika 1.12. Mosni spoj punovalnog ispravljača

Proizvođači poluvodičkih elemenata proizvode oba spoja ispravljača kao element u jednom kućištu (slika 1.13.).

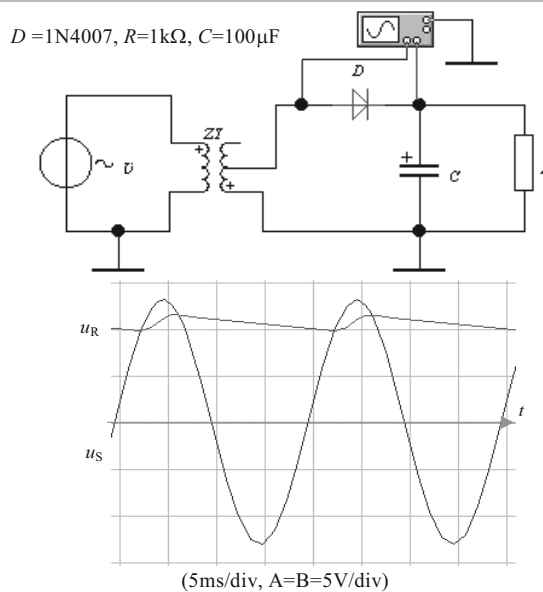


Slika 1.13. Ispravljač u jednom kućištu

Filtriranje ispravljenoga napona

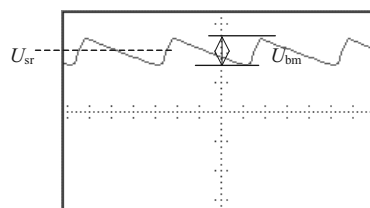
Izlazni napon otporno opterećenog ispravljača ima veliku **valovitost**, tj. uz istosmjernu komponentu sadrži jako izraženu izmjeničnu komponentu, tzv. **napon brujanja** (engl. ripple, njem. Brummspannung). Takav napon nije pogodan za napajanje elektroničkih sklopova. Poboľšanje oblika izlaznoga napona (povećanje istosmjerne komponente uz smanjenje valovitosti) dobije se postupkom filtriranja (glađenja) ispravljenoga napona. Za filtriranje ispravljenoga napona najčešće se upotrebljavaju kondenzatori velikoga kapaciteta (slika 1.14.).

Pokus



Slika 1.14. Filtriranje poluvalno ispravljenoga napona

Dioda vodi samo dok je anoda pozitivnija od katode. U tome dijelu periode izmjeničnoga napona kondenzator se nabija. U ostalome dijelu periode dioda je zaporno polarizirana. Struju trošilu daje nabijeni kondenzator pa se napon na njemu smanjuje. Što je opterećenje veće, bit će znatnije smanjenje izlaznoga napona. Da se to spriječi, potrebno je primijeniti kondenzatore velikoga kapaciteta.

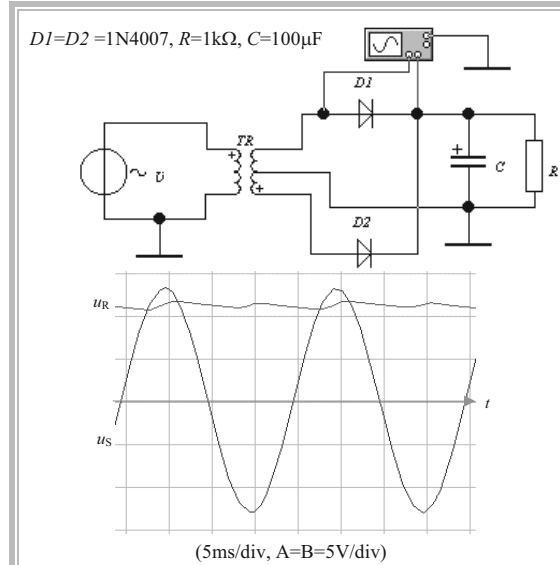


Slika 1.15. Napon brujanja

Iznos napona brujanja U_{bm} (mjeren od vrha do vrha, slika 1.15.) ovisi o vršnoj vrijednosti ispravljenoga napona (približno jednaka vršnoj vrijednosti napona na sekundarnom namotu transformatora U_{Smax}), o frekvenciji napona brujanja f_b (za poluvalni ispravljač $f_b=50\text{Hz}$, za punovalni ispravljač $f_b=100\text{Hz}$), o opterećenju ispravljača R i kapacitetu kondenzatora za glađenje C :

$$U_{bm} = \frac{U_{Sm}}{f_b RC}$$

Pokus



Slika 1.16. Filtriranje punovalno ispravljenoga napona

Primjer 1.2.

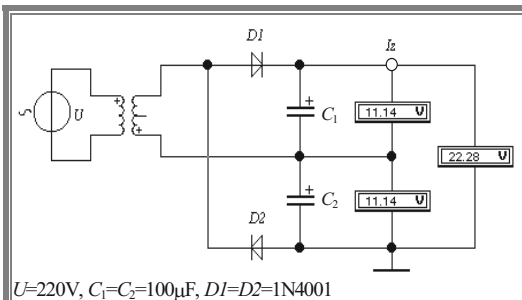
Izračunati napon brujanja ispravljača sa slike 1.16. ako je prijenosni omjer transformatora 10:1, $C=100\mu\text{F}$ i $R=1k\Omega$.

$$U_{Smax} = \frac{\sqrt{2} \cdot 220}{2} = 15,56\text{V}$$

$$U_{bm} = \frac{15,56}{2 \times 50 \times 10^3 \times 100 \times 10^{-6}} = 1,556\text{V}$$

Udvostručivač napona

Pokus



Slika 1.17. Udvostručivač napona

Ako su na sekundarni namot transformatora spojena dva poluvalna ispravljača opterećena kapacitivnim opterećenjem, s time da diode vode naizmjenično, tada dobivamo sklop koji na izlazu daje napon dvostruko viši od napona dobivenog jednim poluvalnim ispravljačem. To je tzv. **udvostručivač napona** ili Delonov, odnosno Greinacherov spoj (slika 1.17.).

Za vrijeme pozitivne poluperiode sekundarnog napona u_s vodi dioda $D1$, kondenzator C_1 se nabija, dok se za vrijeme negativne poluperiode nabija C_2 preko diode $D2$. Uz zanemarivanje pada napona na diodama, dobiveni istosmjerni napon na svakom kondenzatoru bit će jednak vršnoj vrijednosti napona sekundara U_{Smax} , te će ukupni napon između točaka 1 i 2 biti:

$$U_{iz} = 2U_{Smax}$$

Prednost ovog sklopa je u tome što se pri niskom naponu na sekundarnom namotu transformatora može dobiti visoki istosmjerni napon.

Primjer 1.3.

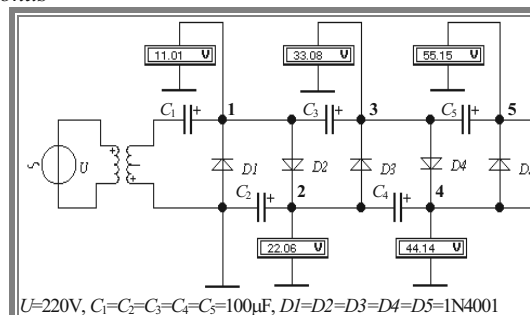
Ako efektivna vrijednost napona na sekundaru iznosi 200V, koliki će biti napon na izlazu sklopa sa slike 1.17.?

$$U_{iz} = 2\sqrt{2}U_{ef} = 2 \times \sqrt{2} \times 200 = 564\text{V}$$

Umnoživač napona

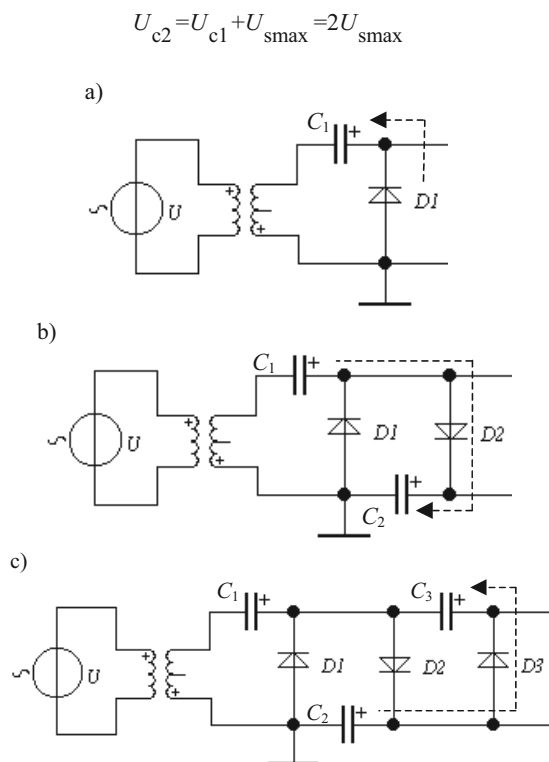
Za dobivanje istosmjernih napona na sekundaru, koji su jednaki parnim ili neparnim višekratnicima napona, upotrebljava se tzv. **kaskadni generator** ili Cockroft-Waltonov, odnosno Greinacherov spoj (slika 1.18.).

Pokus



Slika 1.18. Kaskadni generator

Za vrijeme jedne poluperiode napona na sekundaru transformatora preko diode $D1$ nabija se kondenzator C_1 na napon $U_{c1}=U_{smax}$ (slika 1.19.a). Za vrijeme iduće poluperiode dioda $D1$ je nepropusno polarizirana, a $D2$ je propusno polarizirana te se preko nje (slika 1.19.b) nabija kondenzator C_2 na napon:



Slika 1.19. Prikaz načela rada kaskadnoga generatora

Kondenzator C_1 se pri tome djelomično izbija. Kondenzator C_3 nabije se preko propusno polarizirane diode D_3 strujnim krugom transformator- C_2 - D_3 - C_3 - C_1 -transformator (slika 1.19.c) na napon:

$$U_{c3} = U_{smax} + U_{c2} - U_{c1}$$

$$U_{c3} = U_{smax} + 2U_{smax} - U_{smax} = 2U_{smax}$$

C_2 se djelomično izbija, a C_1 se opet nabija preko vodljive diode D_1 . Na isti način je:

$$U_{c4} = U_{smax} + U_{c1} + U_{c3} - U_{c2} = 2U_{smax}$$

Dakle, svaki se kondenzator, osim kondenzatora C_1 , nabije na napon jednak dvostrukoj amplitudi napona na sekundarnom namotu transformatora, te se sa svake strane naponi kondenzatora zbrajaju. Tako se na granama označenim neparnim brojevima dobiju neparni, a na granama označenima parnim brojevima parni višekratnici napona U_{smax} . Tako se u točki 3 dobije vrijednost napona $3U_{smax}$, a u točki $4U_{smax}$ itd.

Prednost ovog spoja je što se s pomoću elemenata za male napone (dioda i kondenzatora) može dobiti relativno veliki istosmjerni napon. Upotrebljava se samo kao izvor napona jer pri većem opterećenju napon pada pošto se kondenzatori ne stignu dopuniti.

1.3. DIODNI OGRANIČAVAČI I RESTAURATORI

U elektronici je često potrebno ograničiti porast napona iznad određene vrijednosti. Sklopovi koji obavljaju tu funkciju nazivaju se ograničavači (engl. clipping circuits, limiting circuits, skraćeno clippers, odnosno limiters, njem. Begrenzerschaltung).

Neki električni i elektronički sklopovi imaju svojstvo da signalima oduzimaju istosmjernu komponentu (npr. RC-mreža). Kad je potrebno obnoviti (uspostaviti) istosmjernu komponentu, upotrebljavaju se restauratori (engl. restorer, njem. Klemmschaltung).

Paralelni diodni ograničavač

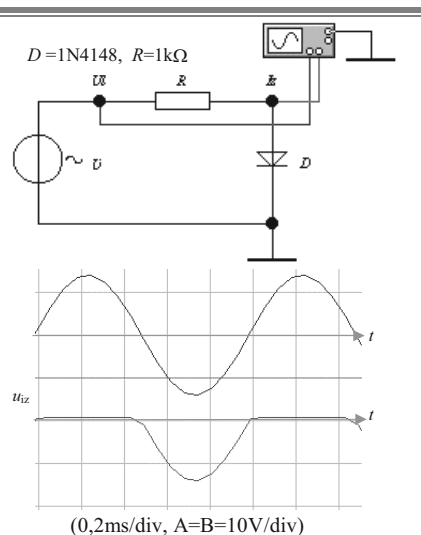
Na slici 1.20. pokazan je spoj diode i otpornika koji ograničava porast izlaznoga napona za vrijeme pozitivne poluperiode ulaznoga napona. Kako je dioda spojena paralelno izlazu, spoj se naziva paralelni ograničavač.

Za vrijeme pozitivne poluperiode ulaznoga napona dioda je vodljiva pa je na izlazu mali napon propusne polarizacije diode U_F .

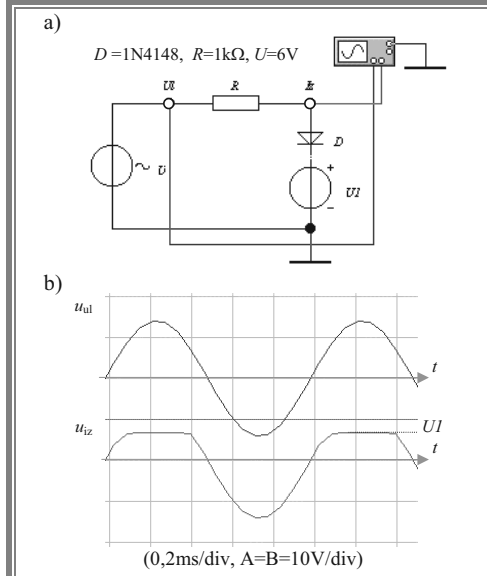
Za vrijeme negativne poluperiode dioda je nevodljiva pa se ulazni napon prenosi na izlaz.

Slika 1.20. Ograničavanje napona diodom

Pokus



Pokus

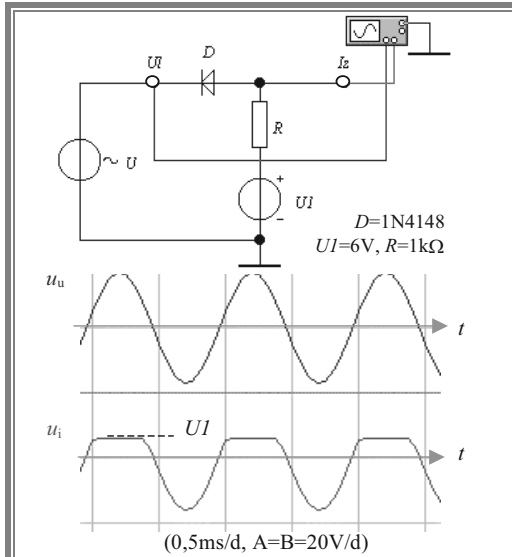


Slika 1.21. Paralelni diodni ograničavač

Ako se želi porast izlaznog napona ograničiti na neku vrijednost veću od U_F , dodaje se u seriju s diodom izvor napona UI (slika 1.21.). Dioda postaje vodljiva kad je ulazni napon veći od napona UI uvećanoga za pad napona na propusno polariziranoj diodi. Tada je na izlazu približno napon UI (točnije $UI+U_F$).

Serijski diodni ograničavač

Pokus

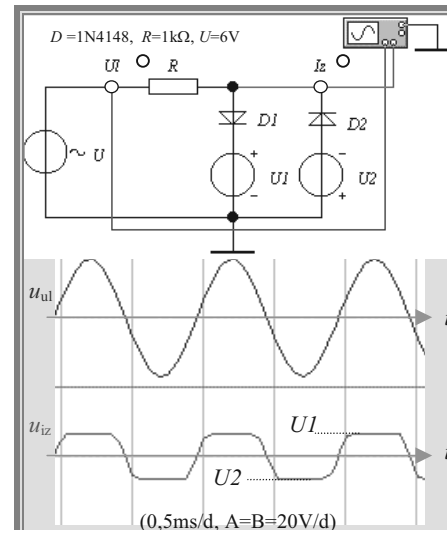


Slika 1.22. Serijski diodni ograničavač

Isti učinak može se postići serijskim diodnim ograničavačem. Ulazni napon prenosi se na izlaz kad je dioda vodljiva, tj. kad je ulazni napon manji od napona UI . U protivnom je na izlazu napon UI dodanoga istosmjernog izvora (slika 1.22.).

Dvostrani ograničavač

Pokus

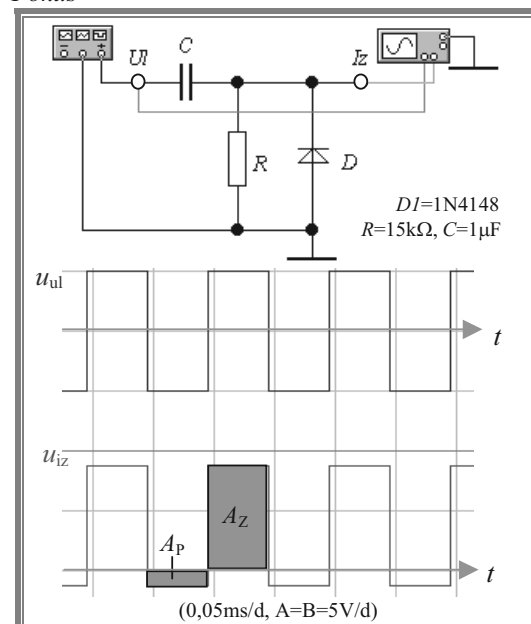


Slika 1.23. Dvostrani paralelni ograničavač

Kad je potrebno ograničiti napon na dvije razine, upotrebljavaju se dvostrani paralelni ograničavači (slika 1.23.). Za vrijeme pozitivne poluperiode ulaznoga napona vodi dioda $D1$ kad ulazni napon ima vrijednost veću od UI . Tada je na izlazu napon UI . Za vrijeme negativne poluperiode ulaznoga napona vodi dioda $D2$ kad ulazni napon ima manju vrijednost od $U2$. Tada je na izlazu napon $U2$.

Restauratori

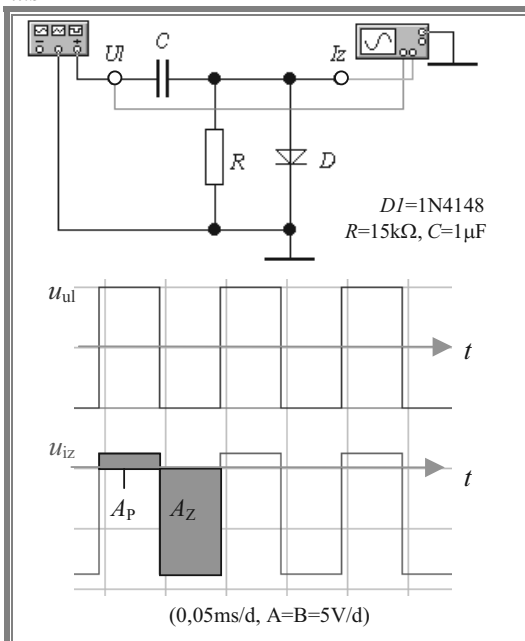
Pokus



Slika 1.24. Restaurator pozitivne komponente

Pokus sa slike 1.24. pokazuje djelovanje restauratora koji obnavlja pozitivnu istosmjernu komponentu.

Pokus



Slika 1.25. Restaurator negativne komponente

Pokus sa slike 1.25. pokazuje djelovanje restauratora koji obnavlja negativnu istosmjernu komponentu.

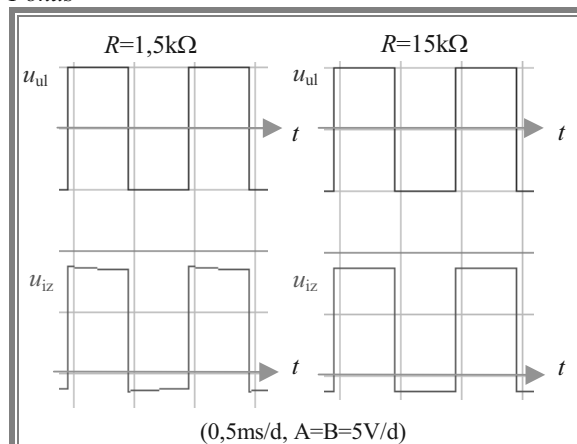
Izlazni napon restauratora nije u potpunosti samo pozitivan, odnosno samo negativan. Uzrok tome je odstupanje svojstava diodne sklopke od onih za idealnu sklopku.

Površina koju izlazni napon zatvara s vremenskom osi u vremenu kad je dioda propusno polarizirana prema površini koju izlazni napon zatvara s vremenskom osi u vremenu kad je dioda zaporno polarizirana, odnosi se kao otpor propusno polarizirane diode r_d prema otporu R (slika 1.24. i 1.25.).

$$\frac{A_p}{A_z} = \frac{r_d}{R}$$

Iz toga proizlazi da bi otpor R trebao biti što veći u usporedbi s otporom propusno polarizirane diode. Međutim, povećanje otpora R ograničeno je iznosima otpora zaporno polarizirane diode. Pokus sa slike 1.26. pokazuje djelovanje restauratora uz različite vrijednosti otpora R .

Pokus



Slika 1.26. Djelovanje restauratora pozitivne istosmjerne komponente

1.4. OSTALE VRSTE DIODA

Od ostalih vrsta dioda u ovom dijelu prvoga poglavlja dan je prikaz svojstava i osnovne primjene Zenerove, tunelske i kapacitivne diode.

Zenerova dioda

Zenerova dioda je silicijska dioda kod koje se primjenjuje svojstvo da kod Zenerova (lavinskog) proboja održava stalan napon, praktički neovisan o struji kroz diodu.

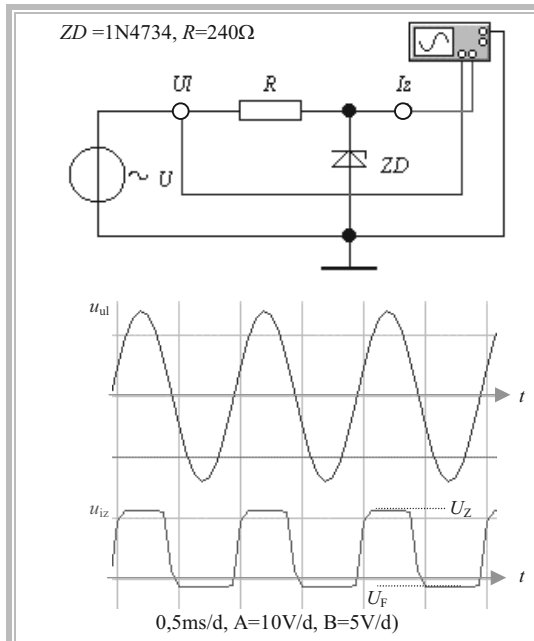


Slika 1.27. Simboli Zenerove diode



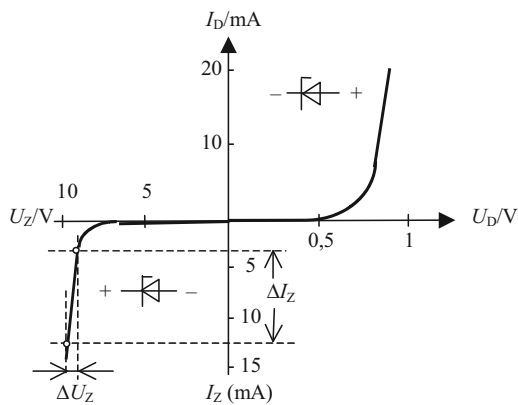
Slika 1.28. Primjeri izvedbi Zenerovih dioda

Pokus



Slika 1.29. Pobuda Zenerove diode sinusoidnim naponom

U pokusu na slici 1.29. na ulaz sklopa spojen je promjenljivi sinusoidni napon. Kad je ulazni napon negativan, Zenerova dioda je propusno polarizirana i na njoj je mali napon $-U_F$. Uz pozitivni ulazni napon manji od napona U_Z dioda je zaporno polarizirana i na njoj je napon izvora. Kad iznos ulaznog napona zadobije vrijednost veću od U_Z , dioda prelazi u stanje lavinskoga proboja i na njoj je stalan napon U_Z .



Slika 1.30. Strujno-naponska karakteristika Zenerove diode

Vrijednosti probojnoga napona Zenerovih dioda može se kontrolirati u tijeku procesa proizvodnje. To omogućuje da se proizvode diode s probojnim naponima od nekoliko volta do nekoliko stotina volta. Dioda s probojnim naponom manjim od 5V nemaju oštro izražen probojni napon. Dioda s probojnim naponom ispod 5V imaju negativan temperaturni

koeficijent (s porastom temperature smanjuje se Zenerov napon). Dioda sa Zenerovim naponom višim od 5V imaju pozitivan temperaturni koeficijent (s porastom temperature raste Zenerov napon).

Dioda s većim probojnim naponom imaju veći unutarnji otpor. Unutarnji otpor Zenerove diode jest omjer promjene napona na diodi i promjene struje kroz diodu koja je dovela do promjene napona:

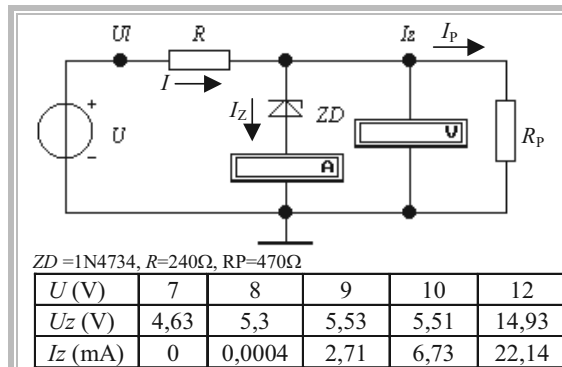
$$r_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$$

Zenerove diode upotrebljavaju se kao stabilizatori i ograničavači napona. Prilikom odabira Zenerovih dioda potrebno je voditi računa o najvećoj dopuštenoj struji diode u Zenerovu području I_Z , odnosno o dopuštenu utrošku snage. Iznosi dopuštenih utrošaka snage kreću se od nekoliko stotina milivata do nekoliko desetaka vata.

Prilikom odabira Zenerovih dioda potrebno je voditi računa o najvećoj dopuštenoj struji diode u Zenerovu području I_Z , odnosno o dopuštenom utrošku snage. Iznosi dopuštenih utrošaka snage kreću se od nekoliko stotina milivata do nekoliko desetaka vata.

Stabilizacija napona sa Zenerovom diodom

Pokus



Slika 1.31. Stabilizacija napona sa Zenerovom diodom

Primjer uporabe Zenerove diode pokazan je na slici 1.31. Riječ je o najjednostavnijoj izvedbi stabilizatora napona. Izlazni je napon ovoga stabilizatora Zenerov napon U_Z . Kako promjene struje I_Z neznatno mijenjaju napon U_Z , izlazni napon može se smatrati stalnim. Promjena ulaznog napona uzrokuje promjenu struje Zenerove diode I_Z . Zato se mijenja pad napona na otporniku R , pa je izlazni napon gotovo konstantan.

$$U_i = U_u - I \times R = U_Z$$

$$I = I_Z + I_P = I_Z + \frac{U_Z}{R_P}$$

Otpornik R služi za ograničenje struje Zenerove diode. Kad je stabilizator neopterećen, sva struja iz izvora teče kroz Zenerovu diodu pa otpornik R treba odabrati tako da ta struja ne prelazi dopuštenu vrijednost, kako ne bi došlo do oštećenja diode:

$$R = \frac{(U_u - U_Z)}{I}$$

No isto tako struja ne smije pasti ispod određene vrijednosti kad se počne smanjivati napon na diodi. Za siguran rad stabilizatora ulazni napon treba biti veći od izlaznoga oko dva puta.

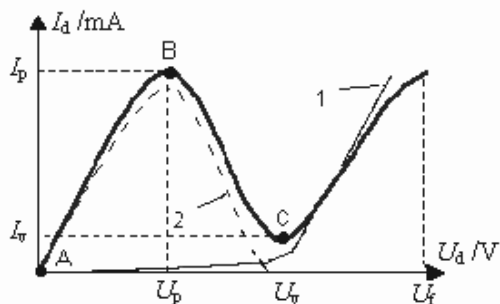
Tunelska dioda

Tunelska dioda ili **Esakijeva dioda** (prema japanskom fizičaru Leu Esakiju koji je prvi teoretski obradio tunelsku diodu) poluvodički je element na bazi germanija ili galij-arsenida s vrlo tankim i jako dopiranim PN spojem.



Slika 1.32. Simboli tunelske diode

Na tako uskoj PN barijeri javlja se **efekt tuneliranja**, tj. elektroni i šupljine prolaze (tuneliraju) kroz barijeru (uz uvjet da se nalaze na istom energetskeg nivou). Tada kroz diodu teče osim **difuzione struje** (krivulja 1) i **struja tuneliranja** (krivulja 2 sa slike 1.33.). Ta struja naglo raste kod malih napona u propusnom smjeru (točke A do B), a zatim opada s porastom napona (B do C). To je tzv. područje **negativnog otpora**, gdje se javlja efekt suprotan Ohmovu zakonu, tj. porastom napona struja se smanjuje. Od točke C nadalje dioda se ponaša kao poluvodička propusno polarizirana dioda.



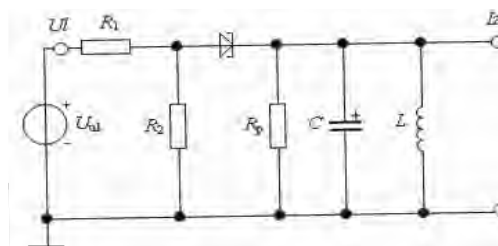
Slika 1.33. Karakteristika tunelske diode

Ako se dioda upotrebljava kao sklopka, radna točka se mora nalaziti na karakteristici u području između točaka A i B, ili iza točke C. Karakteristični naponi, odnosno struje su napon vrha U_p (engl. peak voltage) i struja vrha I_p (engl. peak current), te napon dna U_v (engl. valley voltage) i struja dna I_v (engl. valley current). Karakteristične veličine ovise o vrsti poluvodičkog materijala što je prikazano tablicom 1.1. Maksimalna struja I_p kreće se u rasponu od $100\mu A$ do više od 10A, a odnos I_p/I_v od 5 do 10. Najbolje vrijednosti daje GaAs.

Tablica 1.1. Karakteristične veličine tunelskih dioda

MATERIJAL	NAPONI		
	U_p/mV	U_v/mV	U_f/mV
Ge	55	350	500
Si	75	450	750
GaAs	150	500	1200

Tunelska dioda nalazi primjenu u VF tehnici, ali ograničenu zbog nemogućnosti upravljanja vanjskim signalom. Veću primjenu nalazi u oscilatorima za rad na visokim frekvencijama do desetak GHz. Primjer jednostavnog oscilatora pokazuje slika 1.34. U serijskom spoju tunnel diode (radna točka se nalazi u sredini karakteristike dijela negativnog otpora) i titrajnog kruga R_p-C-L na izlazu dobivamo konstantan sinusoidni signal.



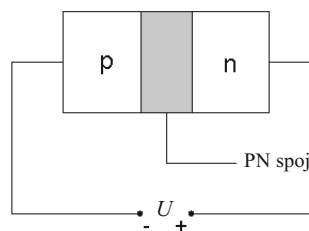
Slika 1.34. Primjena tunelske diode

Kapacitivna dioda

Kapacitivna dioda ili **varikap dioda** (varaktor) je dioda kod koje se kapacitet mijenja s promjenom napona.



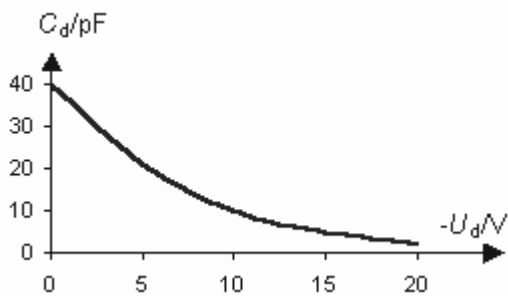
Slika 1.35. Simboli kapacitivne diode



Slika 1.36. Građa kapacitivne diode

Upotrebljava se u području zaporne polarizacije PN spoja, gdje PN spoj djeluje kao dielektrik kondenzatora, jer kroz njega pri zapornoj polarizaciji ne teče struja, a P i N tip poluvodiča djeluju kao njegove ploče (slika 1.36.). Kada PN spoj nije priključen na napon napajanja, područje PN barijere ima određenu širinu, a time i početni kapacitet $C_{poč}$. Jače dopirani PN spoj ima užu barijeru, a time i veći $C_{poč}$.

Priključkom izvana dodanog napona $-U_d$ proširuje se područje barijere, a time se kapacitet diode C_d smanjuje. On je najmanji kada se $-U_d$ približi probnoj vrijednosti PN spoja, koja iznosi oko 40V (vidljivo iz karakteristike na slici 1.37.).



Slika 1.37. Ovisnost kapaciteta diode o zapornom naponu

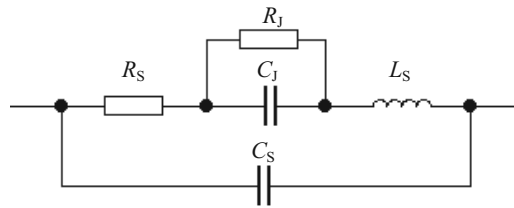
Najvažniji podaci kapacitivnih dioda, potrebni za praktičnu primjenu, i njihove tipične vrijednosti za primjer izvedbe sa slike 1.38. pokazani su u tablici 1.2.



Slika 1.38. Primjer izvedbe kapacitivne diode

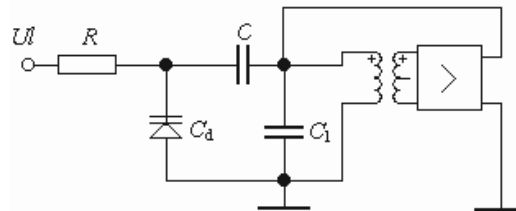
Tablica 1.2. Karakteristične vrijednosti za primjer izvedbe kapacitivne diode

dopušteni zaporni napon	12V
dopuštena struja zaporne polarizacije	250mA
dopušteni utrošak snage	400mW
serijski induktivitet	6nH
faktor dobrote ($U_R=2V$)	200
kapacitet ($C=C_J+C_S$)	10-200pF



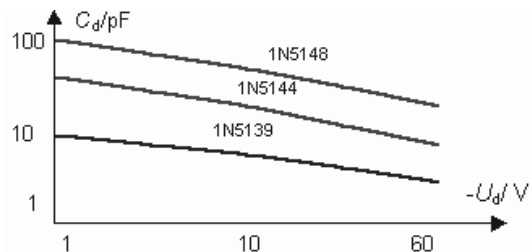
Slika 1.39. Nadomjesni spoj kapacitivne diode

Kapacitivne diode se upotrebljavaju za ugađanje titrajnih krugova te za automatsku regulaciju frekvencije u radiotelevizijskoj tehnici. Primjer sa slike 1.40. pokazuje primjenu kapacitivne diode u stupnju za podešavanje frekvencije, a što se koristi kod sinkronizacije rada oscilatora. Promjenom napona regulacije dobivenog fazno-frekventnim komparatorom koji djeluje na kapacitivnu diodu. Taj napon mijenja kapacitet diode C_d , a time i ukupan kapacitet titrajnog kruga čime se podešava frekvencija.



Slika 1.40. Primjena kapacitivne diode

Karakteristike nekih kapacitivnih dioda dane su slikom 1.41.



Slika 1.41. Karakteristike kapacitivnih dioda

PREGLED KLJUČNIH POJMOVA

dioda opće namjene (ispravljačka dioda) - elektronički element s dvije elektrode (anoda i katoda) koji ima svojstvo da u jednome smjeru propušta struju, a u drugom ne

efekt tuneliranja - prolazak elektrona i šupljina kroz PN barijeru uz uvjet da se nalaze na istoj energetskoj razini, posljedica je postojanje **difuzione struje** i **struje tuneliranja**

gladenje (filtriranje) - postupak smanjenja napona brujanja izlaznoga napona ispravljača

kapacitivna dioda (varikap dioda, varaktor) - dioda kod koje se kapacitet mijenja s promjenom napona

karakteristika negativnog otpora - područje rada elektroničkoga elementa u kojemu se porastom napona struja smanjuje

kaskadni generator (Cockroft-Waltonov, odnosno Greinacherov spoj) - sklop za dobivanje istosmjernih napona jednakih parnim ili neparnim višekratnicima napona na sekundaru transformatora

mosni spoj ispravljača - punovalni spoj ispravljača s četiri diode

napon brujanja (valovitost) - izmjenična komponenta izlaznoga napona ispravljača

napon praga ili **napon koljena** U_T - napon propusne polarizacije kod kojega dioda postaje vodljiva

ograničavači - sklopovi kojima se ograničava porast napona iznad određene vrijednosti

poluvalni spoj ispravljača - najjednostavniji ispravljački spoj u kojemu dioda propušta struju samo za vrijeme jedne poluperiode izmjeničnoga napona

probojni napon U_{BR} - napon zaporne polarizacije kod kojega dolazi do nagloga porasta reverzne struje i proboja diode

propusna struja I_F - struja koja teče kroz diodu kada je propusno polarizirana, tj. anoda pozitivnija od katode

punovalni spoj ispravljača u spoju s dvije diode - spoj ispravljača u kojemu je za vrijeme pozitivne poluperiode napona na sekundaru transformatora vodljiva jedna dioda, a za vrijeme negativne poluperiode druga dioda pa struja teče kroz trošilo uvijek u istomu smjeru u obje poluperiode

reverzna struja I_R - struja koja teče kroz diodu kad je zaporno polarizirana, tj. kad je katoda na pozitivnijemu potencijalu od anode

restauratori - sklopovi kojima se signalima obnavlja istosmjerna komponenta

tunelska dioda (Esakijeva dioda) - poluvodički elemenat na bazi germanija ili galij-arsenida sa vrlo tankim i jako dopiranim PN spojem i karakteristikom negativnoga otpora

udvostručivač napona (Delonov, odnosno Greinacherov spoj) - sklop koji na izlazu daje napon dvostruko viši od napona dobivenog jednim poluvalnim ispravljačem

Zenerove diode - silicijske diode koje kod Zenerova (lavinskog) proboja imaju stalan napon, praktički neovisan o struji kroz diodu

DODATNA LITERATURA ZA UČENIKE

P. Biljanović, *Poluvodički elektronički elementi* (6. Poluvodičke pn-diode), Školska knjiga, Zagreb, 1996.

T. Brodić, *Elektronički elementi i osnovni sklopovi* (6. Poluvodičke diode, 7. Zenerove diode, 16. Neupravljivi ispravljači), Školska knjiga, Zagreb, 1995.

A. Szabo, *Industrijska elektronika* (8. Ispravljački spojevi, 9. Osnovni spojevi ispravljača, 9. Gladenje ispravljenoga napona), Tehnička škola Ruđera Boškovića, Zagreb, 1975.

A. Šarčević, *Elektroničke komponente i analogni sklopovi* (2. Poluvodička dioda), Tehnička škola Ruđera Boškovića, Zagreb, 1987.

ZADACI ZA LABORATORIJSKE VJEŽBE

VJEŽBA 1.1. POLUVALNI ISPRAVLJAČ

Zadatak

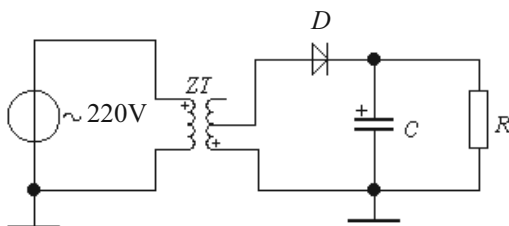
Upoznati svojstva poluvalnog ispravljača mjerenjem istosmjernoga napona i struje opterećenja univerzalnim instrumentom te napona brujanja uporabom osciloskopa.

Ustanoviti utjecaj kapaciteta kondenzatora za glaćenje na vrijednost istosmjernoga napona na izlazu i na napon brujanja te mogućnost opterećenja ispravljača.

Ustanoviti utjecaj opterećenja na vrijednost izlaznoga napona i napona brujanja.

Pribor i instrumenti

- diode 1N4007 (4 komada)
- otpornici $0,1k\Omega$, $0,47k\Omega$ i $1k\Omega$
- kondenzatori $47\mu F$, $100\mu F$ i $470\mu F$
- eksperimentalna pločica i spojni vodovi
- univerzalni instrument (2 komada)
- osciloskop
- izvor izmjeničnoga napona 0-48V, 50Hz (regulacijski transformator).



Slika 1.42. Poluvalni ispravljač

Priprema

1. Navedite najveći dopušteni zaporni napon i najveću dopuštenu struju pri propusnoj polarizaciji za diodu 1N4007.

2. Izračunajte srednju vrijednost ispravljenoga napona ispravljača sa slike 1.42. bez spojenoga kondenzatora C uz napon na sekundarnom namotu transformatora $U_S=24V$.

3. Izračunajte napon brujanja izlaznoga napona ispravljača sa slike 1.42. uz $C=100\mu F$ ako je napon na sekundarnom namotu transformatora $U_S=24V$.

4. Nacrtajte shemu spoja poluvalnog ispravljača (slika 1.42.) s ucrtanim instrumentima za mjerenje izlazne struje te izlaznoga napona i napona brujanja.

Pokusi

1. Ispitivanje ovisnosti izlaznoga napona o kapacitetu kondenzatora za glaćenje

1.1. Namjestite izlazni napon iz regulacijskoga transformatora na 24V. Prema nacrtanoj shemi povežite elemente sklopa i instrumente te priključite ulazni napon.

Izmjerite pad napona U_R i struju I_R kroz otpor $R=1k\Omega$ za vrijednosti kapaciteta kondenzatora C : $47\mu F$, $100\mu F$ i $470\mu F$. Rezultate mjerenja prikažite tablicom.

1.2. Osciloskopom ustanovite oblike ulaznoga i izlaznoga napona poluvalnog ispravljača za vrijednosti kapaciteta kondenzatora za glaćenje C : $47\mu F$, $100\mu F$ i $470\mu F$. Izmjerite napon brujanja za svaki zadani kapacitet kondenzatora.

2. Ispitivanje ovisnosti izlazne struje, izlaznoga napona i valovitosti o otporu potrošača

2.1. Namjestite izlazni napon regulacijskoga transformatora na 24V. Prema nacrtanoj shemi povežite elemente i priključite napon napajanja.

Izmjerite izlazni napon i struju kroz otpor R za vrijednosti otpora 100Ω , 470Ω i $1k\Omega$. Rezultate mjerenja prikažite tablicom.

2.2. Osciloskopom ustanovite oblik ulaznoga i izlaznoga napona i izmjerite iznos napona brujanja za zadane vrijednosti otpora opterećenja R iz točke 2.1.

VJEŽBA 1.2. PUNOVALNI ISPRAVLJAČ

Zadatak

Upoznati svojstva punovalnog ispravljača mjerenjem istosmjernoga napona i struje opterećenja univerzalnim instrumentom te napona brujanja uporabom osciloskopa.

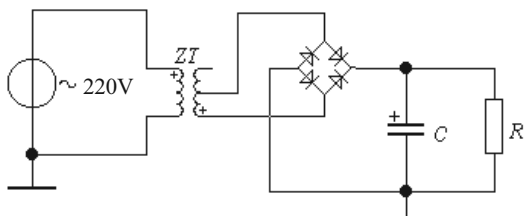
Ustanoviti utjecaj kapaciteta kondenzatora za glađenje na vrijednost istosmjernoga napona na izlazu, napon brujanja i mogućnost opterećenja ispravljača.

Ustanoviti utjecaj opterećenja na vrijednost izlaznoga napona i napona brujanja.

Pribor i instrumenti

- diode 1N4007 (4 komada)
- otpornici 100Ω, 470Ω i 1kΩ
- kondenzatori 47μF, 100 μF i 470 μF
- eksperimentalna pločica i spojni vodovi
- univerzalni instrument (2 komada)
- osciloskop
- izvor izmjeničnoga napona 0-48V, 50Hz (regulacijski transformator).

Priprema



Slika 1.43. Punovalni ispravljač

1. Navedite najveći dopušteni zaporni napon i najveću dopuštenu struju pri propusnoj polarizaciji za diodu 1N4007.
2. Izračunajte srednju vrijednost ispravljenoga napona ispravljača sa slike 1.43. bez spojenoga kondenzatora C uz napon na sekundarnom namotu transformatora $U_S = 24V$.
3. Izračunajte napon brujanja izlaznoga napona ispravljača sa slike 1.43. ako je napon na sekundarnome namotu transformatora $U_u = 24V$.
4. Nacrtajte shemu spoja punovalnog ispravljača (slika 1.43.) s ucrtanim instrumentima za mjerenje izlazne struje te izlaznoga napona i napona brujanja.

Pokusi

1. Ispitivanje ovisnosti izlazne struje i napona te valovitosti o kapacitetu kondenzatora za glađenje

1.1. Namjestite izlazni napon iz regulacijskoga transformatora na 24V. Prema nacrtanoj shemi povežite elemente sklopa i instrumente te priključite ulazni napon.

Izmjerite pad napona U_R i struju I_R kroz otpor $R=1k\Omega$ za vrijednosti kapaciteta kondenzatora C : 47μF, 100μF i 470μF. Rezultate mjerenja prikažite tablicom.

1.2. Osciloskopom ustanovite oblike ulaznoga i izlaznoga napona poluvalnog ispravljača za vrijednosti kapaciteta kondenzatora za glađenje C : 47μF, 100μF i 470μF. Izmjerite napon brujanja za svaki zadani kapacitet kondenzatora.

2. Ispitivanje ovisnosti izlazne struje i napona te valovitosti o otporu potrošača

2.1. Namjestite izlazni napon regulacijskoga transformatora na 24V. Prema nacrtanoj shemi povežite elemente i priključite napon napajanja.

Izmjerite izlazni napon i struju kroz otpor R za vrijednosti otpora 100Ω, 470Ω i 1kΩ. Rezultate mjerenja prikažite tablicom.

2.2. Osciloskopom ustanovite oblik ulaznoga i izlaznoga napona i izmjerite iznos napona brujanja za zadane vrijednosti otpora opterećenja R iz točke 2.1.

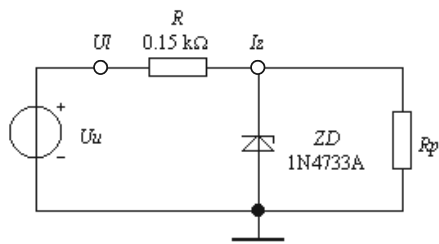
VJEŽBA 1.3. STABILIZACIJA NAPONA SA ZENEROVOM DIODOM

Zadatak

Upoznati stabilizacijsko djelovanje Zenerove diode mjerenjem napona i struja jednostavnoga stabilizatora napona izvedenoga s pomoću Zenerove diode. Ustanoviti ovisnost izlaznoga napona o promjenama ulaznoga napona i promjenama struje opterećenja.

Pribor i instrumenti

- Zenerova dioda 1N4733
- otpornici 150Ω, 330Ω, 470Ω, 680Ω i 1kΩ
- eksperimentalna pločica i spojni vodovi
- univerzalni instrument (3 komada)
- izvor istosmjernoga napona 0-15V, 1A.

Priprema

Slika 1.44. Stabilizator s diodom 1N4733

1. Navedite Zenerov napon, dopuštenu struju i dopušteni utrošak snage za diodu 1N4733.

2. Nacrtajte shemu stabilizatora sa Zenerovom diodom prema slici 1.44. opterećenog otporom R_p i spojenim instrumentima za mjerenje ulaznoga i izlaznoga napona te struja kroz diodu i trošilo.

Pokusi**1. Ovisnost izlaznoga napona o promjenama ulaznoga napona**

1.1. Povežite elemente stabilizatora i instrumente prema shemi. Na ulaz priključite izvor promjenljivo-ga istosmjernog napona i izmjerite vrijednosti izlaznoga napona te struje kroz diodu i trošilo za vrijednosti ulaznoga napona $U_u = 5V, 6V, 7V, 8V, 9V$ i $10V$.

1.2. Grafički prikažite ovisnost izlaznoga napona o promjenama ulaznoga napona.

2. Ovisnost izlaznoga napona o promjenama struje opterećenja

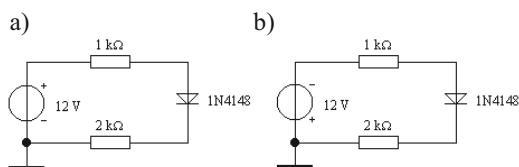
2.1. Na ulaz stabilizatora priključite izvor istosmjernog napona $10V$ i izmjerite vrijednosti izlaznoga napona te struje kroz diodu i trošilo za vrijednosti otpora $R_p = 330\Omega, 470\Omega, 680\Omega$ i $1k\Omega$.

2.2. Grafički prikažite ovisnost izlaznoga napona o promjenama opterećenja.

PITANJA I ZADACI ZA PONAVLJANJE I PROVJERU ZNANJA

1. Kada se dioda može smatrati isključenom, a kada uključenom sklopkom?

2. Koliko približno iznose jakosti struja kroz diode i padovi napona na diodi i otpornicima spoja dioda i otpornika sa slike 1.45.?



Slika 1.45. Serijski spoj otpornika i diode

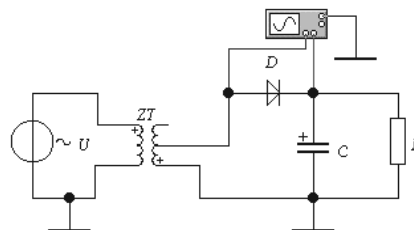
3. Kakav je utjecaj kapaciteta kondenzatora za glaćenje na iznos izlaznoga napona i struje ispravljača?

4. Kakav je utjecaj kapaciteta kondenzatora za glaćenje na iznos napona brujanja?

5. Kakav je utjecaj opterećenja na izlazni napon ispravljača?

6. Kakav je utjecaj opterećenja na iznos napona brujanja?

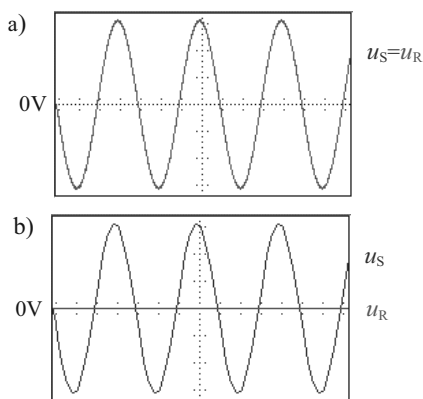
7. Koliki treba biti kapacitet kondenzatora C da napon brujanja izlaznoga napona ispravljača sa slike 1.42. ne bude veći od $500mV$ uz napon $24V$ na sekundarnom namotu transformatora i $R=1k\Omega$?



Slika 1.46. Mjerenje na poluvalnom ispravljaču

8. Mjerenjem napona prema slici 1.46. dobiven je napon pokazan na slici 1.47.a. Koja je komponenta u kvaru?

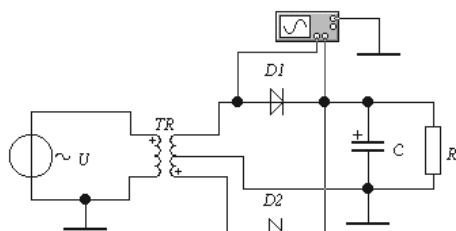
9. Mjerenjem napona prema slici 1.46. dobiven je napon pokazan na slici 1.47.b. Koja je komponenta u kvaru?



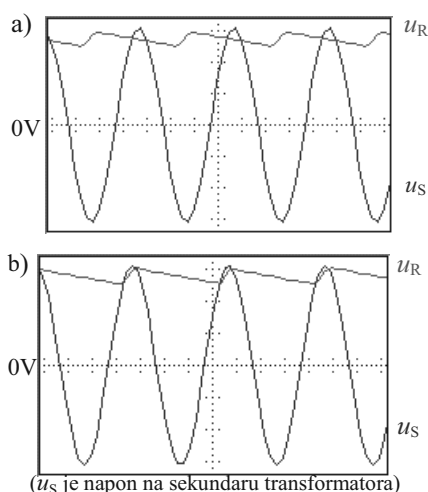
(u_S je napon na sekundaru transformatora)

Slika 1.47. Oscilogrami napona na neispravnomu ispravljaču

10. Koliki treba biti kapacitet kondenzatora C da napon brujanja izlaznoga napona ispravljača sa slike 1.43. ne bude veći od 500mV uz napon 24V na sekundarnom namotu transformatora i $R=1k\Omega$?



Slika 1.48. Mjerenje na punovalnom ispravljaču



(u_S je napon na sekundaru transformatora)

Slika 1.49. Oscilogrami napona na neispravnomu ispravljaču

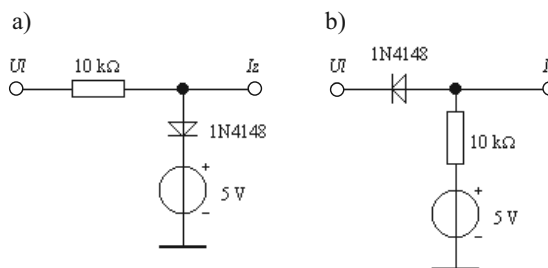
11. Mjerenjem napona prema slici 1.48. dobiven je napon pokazan na slici 1.49.a. Koja je komponenta u kvaru?

12. Mjerenjem napona prema slici 1.48. dobiven je napon pokazan na slici 1.49.b. Koja je komponenta u kvaru?

13. Nacrtajte shemu spoja umnoživača napona sa 6 dioda, te odredite koliki napon se dobije takvim umnoživačem.

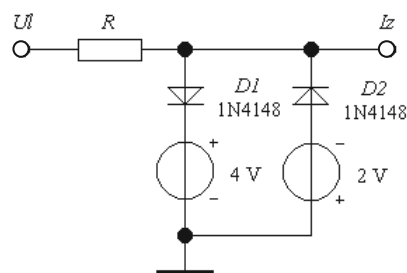
14. Izlazni napon umnoživača napona izvedenog sa četiri diode iznosi 620V. Kolika je efektivna vrijednost napona na sekundaru transformatora koji napaja takav sklop?

15. Nacrtajte oblike izlaznoga napona diodnih ograničavača sa slike 1.50. pobuđenoga sinusoidnim naponom frekvencije 1kHz i amplitude 6 V.



Slika 1.50. Diodni ograničavači

16. Usporedite međusobno djelovanje ograničavača sa slike 1.50.

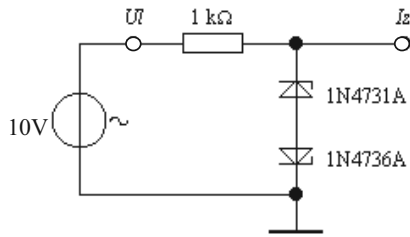


Slika 1.51. Dvostrani diodni ograničavač

17. Nacrtajte oblike izlaznoga napona diodnog ograničavača sa slike 1.51. pobuđenoga sinusoidnim naponom frekvencije 1kHz i amplitude 6 V.

18. Kako vrijednost otpora R restauratora utječe na njegovo djelovanje i oblik izlaznoga napona?

19. Opišite djelovanje stabilizatora sa Zenerovom diodom uz promjene struje opterećenja. Što je kritičnije za Zenerovu diodu, neopterećen ili kratko spojeni izlaz?



Slika 1.52. Spoj dvaju Zenerovih dioda

20. Kolika je vršna vrijednost struje kroz diode spoja sa slike 1.52. ako izlaz nije opterećen?

21. Kakav će biti izlazni napon spoja Zenerovih dioda prema slici 1.52. ako je na ulaz priključen izmjenični napon frekvencije 1kHz i amplitude 10V?

22. Usporedite svojstva tunelskih dioda za izvedbe s Ge, Si te GaAs.

23. Objasnite princip rada kapacitivne diode te usporediti karakteristike kapacitivnih dioda danih slikom 1.41.