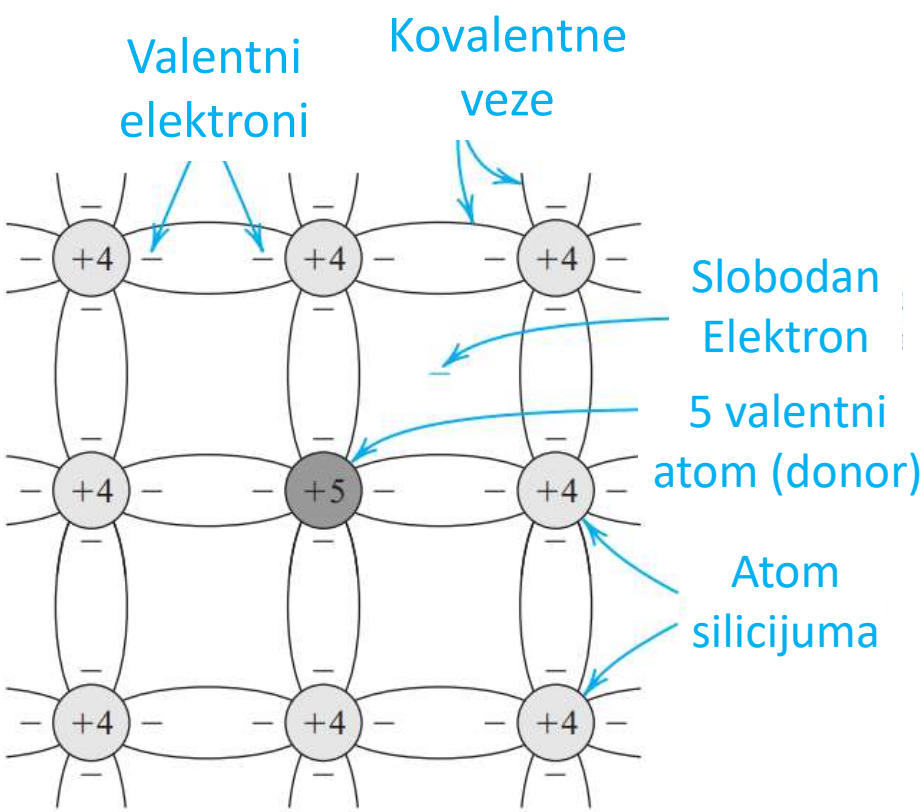
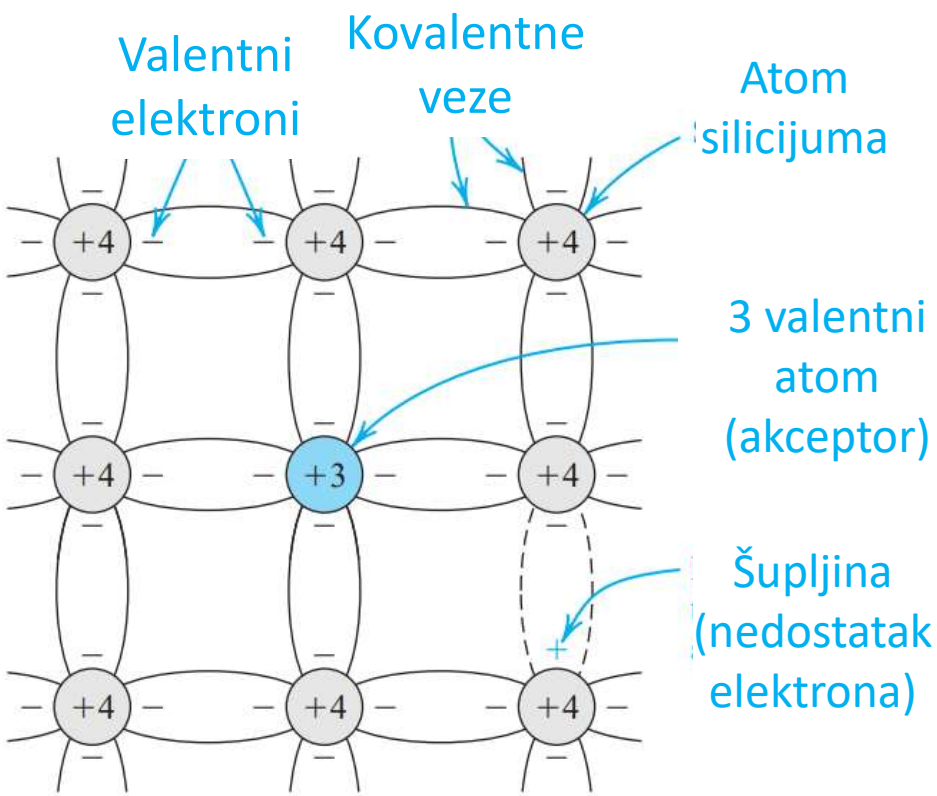
Kola sa diodama

- Kod čistog poluprovodnika koji je četovorovalentan broj slobodnih elektrona jednak je broju šupljina (nepopunjena kovalentna veza).
- **Poluprovodnik n** tipa dobija se unošenjem male koncetracije petovalentnih elemenata u uzorak silicijuma. Većinski nosioci naelektrisanja u poluprovodniku n tipa su slobodni elektroni.
- **Poluprovodnik p** tipa dobija se unošenjem male koncentracije trovalentnih primesa u uzorak silicijuma. Većinski nosioci nalektrisanja u poluprovodniku p tipa su šupljine.

Poluprovodnik n tipa

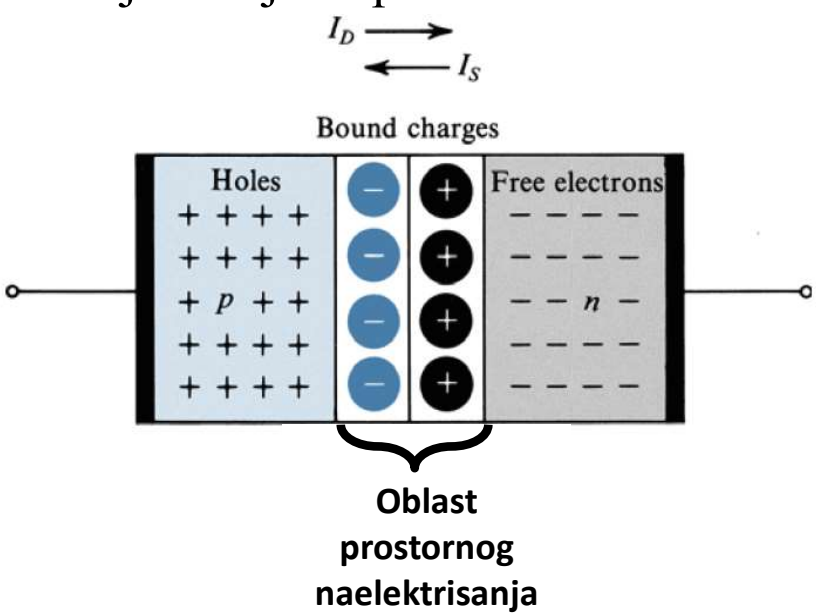


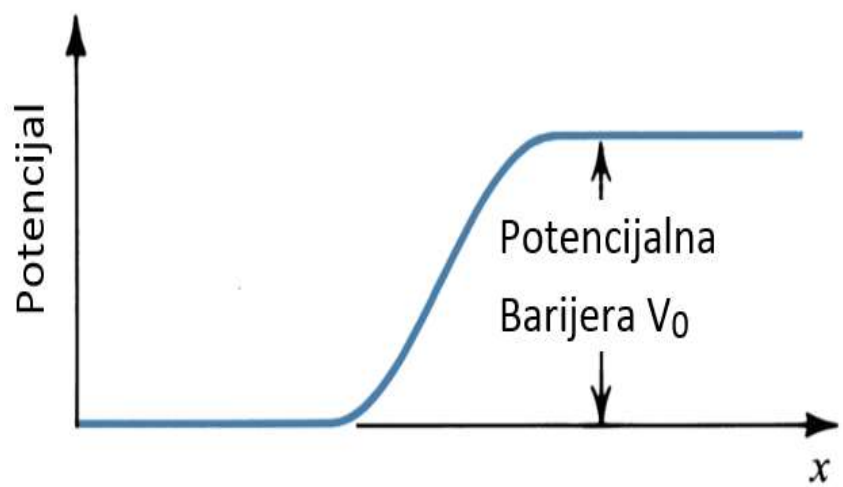
Poluprovodnik p tipa



Model diode

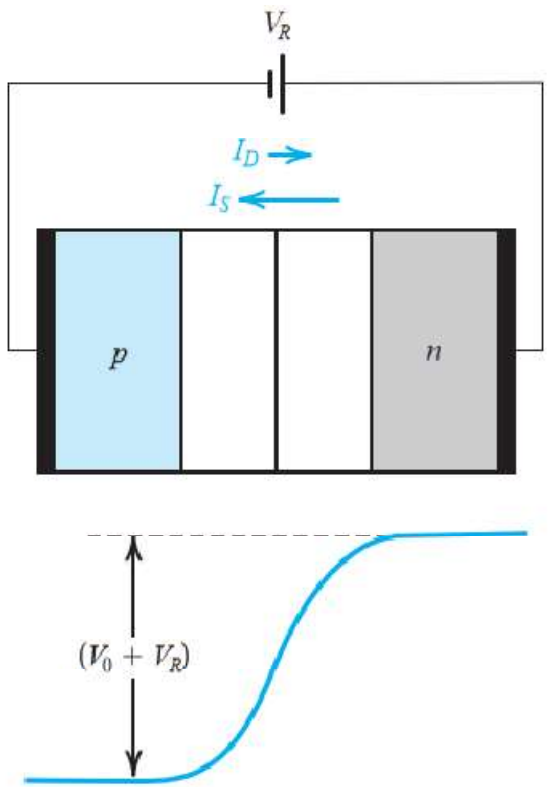
Ukoliko na jednom kraju poluprovodnika postoji veća koncentracija šupljina (poluprovodnik p tipa) a na drugom kraju veća koncentraciju elektrona (poluprovodnik n tipa) doći će do **difuzije** slobodnih noslaca naelektrisanja. Difuzija je kretanje slobodnih nosioca naeleketrisanja iz oblasti veće koncentracije ka oblasti manje koncentracije. Elektroni će se kretati iz n oblasti pema p oblasti a šupljine iz p oblasti prema n oblasti. Tom prilikom neki od slobodnih elektrona prestaju da budu slobodni nosioci naelektrisanja jer postaje deo kovalentne veze na mestu gde je ranije bila šupljina. Ovaj proces zove se **rekombinacija**. Prilikom svake rekombinacije u kristalnoj rešetki ostaje jedan pozitivan jon u n oblasti i jedan negativan jon u p oblasti. Na taj način formira se na samom spoju p i n oblasti **oblast prostornog naelektrisanja** ili **osiromašena oblast**. Električno polje koje stvara oblast prostornog naelektrisanja sprečava dalju difuziju većinskih nosilaca nalektrisanja. Razlika potencijala koja se pri tome formira naziva se **potencialna barijera**.





Model diode

Kada je spoljnji napon priključen tako da je *p* oblast na nižem potencijalu od *n* oblasti kažemo da je **dioda inverzno polarisana**. Pri inverznoj polarizaciji pn spoja širina prelazne obasti se povećava usled kreatanja **glavnih nosilaca naelektrisanja** (elektrona iz n oblasti i šupljina iz p oblasti) od pn spoja ka spoljnjim priključicma. Spoljnji napon deluje na takav način da podstiče kretanje **sporednih nosilaca naelektrisanja** (elektrona u **p** oblasti i šupljine u **n** oblasti) kroz osiromašenu oblast. Usled toga dolazi do opadanja koncentracije sporednih nosilaca uz granicu osiromašene oblasti. Već pri malim vrednostima spoljašnjeg napona ($V_r < 4 \cdot V_T \approx 100\, mV$) njihova koncentracija je na granici prelazne oblasti praktično jednaka nulu. Odavde proističe da će pri daljem porastu napona inverzne polarizacije *Vr* struja ostati nepromenjiva, jer se ne menja koncentracija nosilaca naelektrisanja.



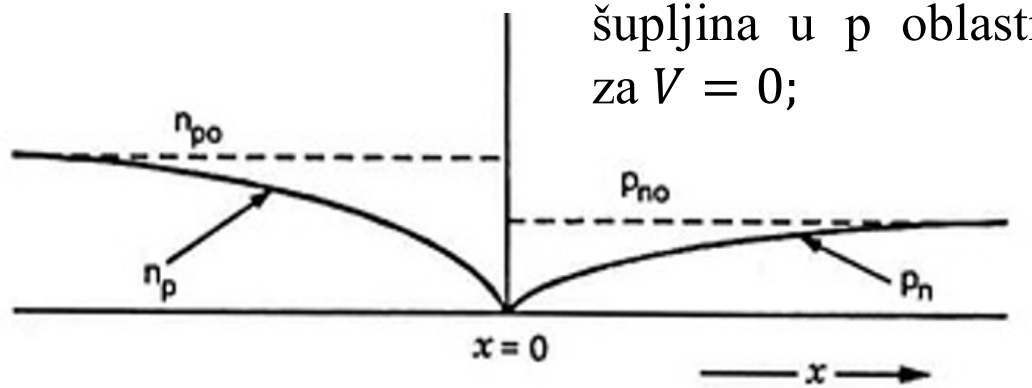
$$p_n(0) = p_{no} \cdot e^{\frac{V}{V_T}} = p_{no} \cdot e^{-\frac{(V_r+V_o)}{V_T}}$$

$$n_p(0) = n_{po} \cdot e^{\frac{V}{V_T}} = n_{po} \cdot e^{-\frac{(V_r+V_o)}{V_T}}$$

p_{no} koncentracija šupljina u n oblasti za $V = 0$;

n_{po} koncentracija šupljina u p oblasti za $V = 0$;

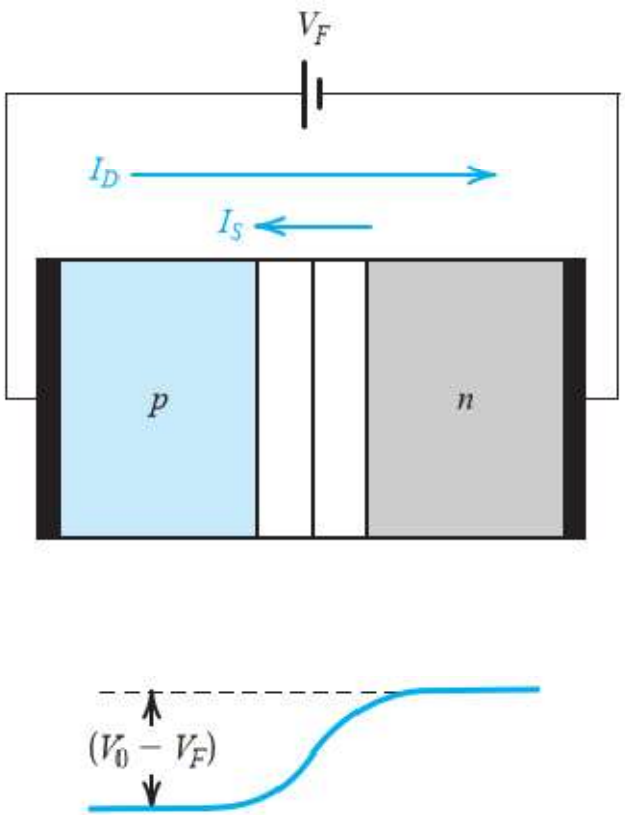
Koncentracija manjinskih nosilaca naelektrisanja na granici sa osiromašenom oblašću (x=0)



Koncentracija manjinskih nosilaca naelektrisanja duž pn spoja kada je V<0

Model diode

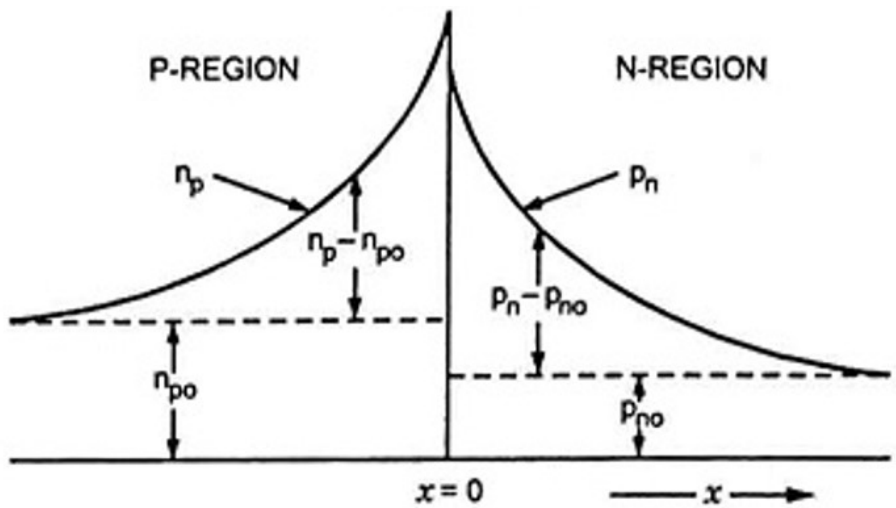
Kada je p oblast na višem potencijalu od n oblasti kažemo da je **dioda direktno polarisana**. U tom slučaju spoljašnji napon ima suprotan polaritet u odnosu na električno polje osiromašene oblasti. Spoljašnji napon podstiče kretanje većinskih nosioci nalektrisanja (šupljina u p oblasti i elektroni u n oblasti) kroz osiromašenu oblast. Ovi nosioci naelektrisanja postaju manjiski nosioci naelektrisanja kada predju u drugu oblast i pri tome dolazi do njihove rekombinacije. S obzirom da je tada koncentracija manjinskih nosilaca znatno povećana dolazi do njihovog gomilanja uz granicu osiromašene oblasti. Sa udaljavanjem od osiromašene oblasti koncentracija manjinskih nosilaca eksponencijalno opada.



$$p_n(0) = p_{no} \cdot e^{\frac{V_F - V_o}{V_T}}$$

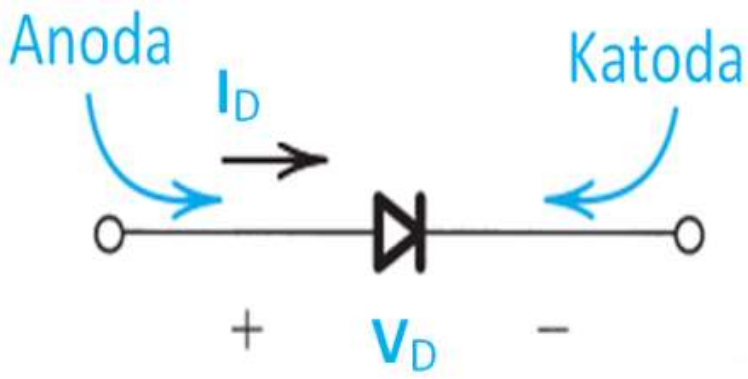
$$n_p(0) = n_{po} \cdot e^{\frac{V_F - V_o}{V_T}}$$

Izrazi za koncentracije manjinskih nosilaca na granici prelazne oblasti (x=0).



Koncentracija manjinskih nosilaca naelektrisanja duž pn spoja kada je V>0

-Diode (strujno naponska karakteristika)

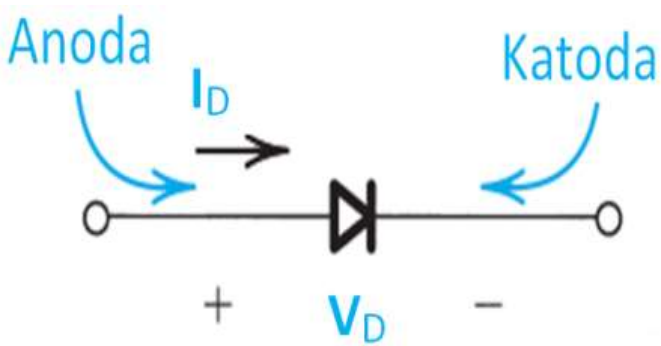


Dioda je elektronska komponenta sa dve elektrode koje se nazivaju: **anoda i katoda**. Napravljena je na bazi pn spoja.

Najvažnija osobina diode je da poseduje **usmeračko svojstvo**, odnosno da provodi struju u jednom smeru, od anode ka katodi.

Kada je potencijal na anodi veći od potencijala na katodi kažemo da je dioda **direktno polarisana** a ukoliko je obrnuto onda je **inverzno polarisana**.

-Diode (strujno naponska karakteristika)



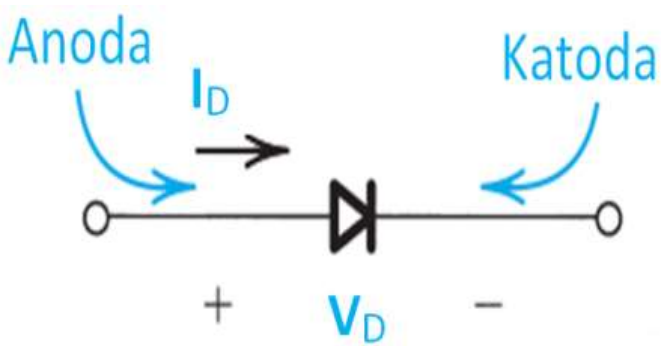
$$I_D = I_S\left(e^{\frac{V_D}{\eta \cdot V_T}} - 1\right)$$

V_T je **temperaturski potencijal** $V_T = \left.\frac{kT}{q}\right|_{T=300K} = 0.026V = 26mV$

I_S je **inverzna struja zasićenja**, za Si diodu reda nA a za germanlijumsku reda μA.

η je **koeficijent idealnosti** koji zavisi od materijala, a vrednost mu se kreće između jedan i dva.

-Diode (strujno naponska karakteristika)



$$I_D = I_S\left(e^{\frac{V_D}{\eta \cdot V_T}} - 1\right)$$

Za napone koji su mnogo veći ili mnogo manji od temperaturskog potencijala mogu se primeniti sledeće aproksimacije:

pri direktnoj polarizaciji za $V_D >> V_T$ $\quad I_D \approx I_S \cdot e^{\frac{V_D}{\eta \cdot V_T}}$

pri inverznoj polarizaciji za $V_D \ll V_T$ $\quad I_D \approx -I_S$

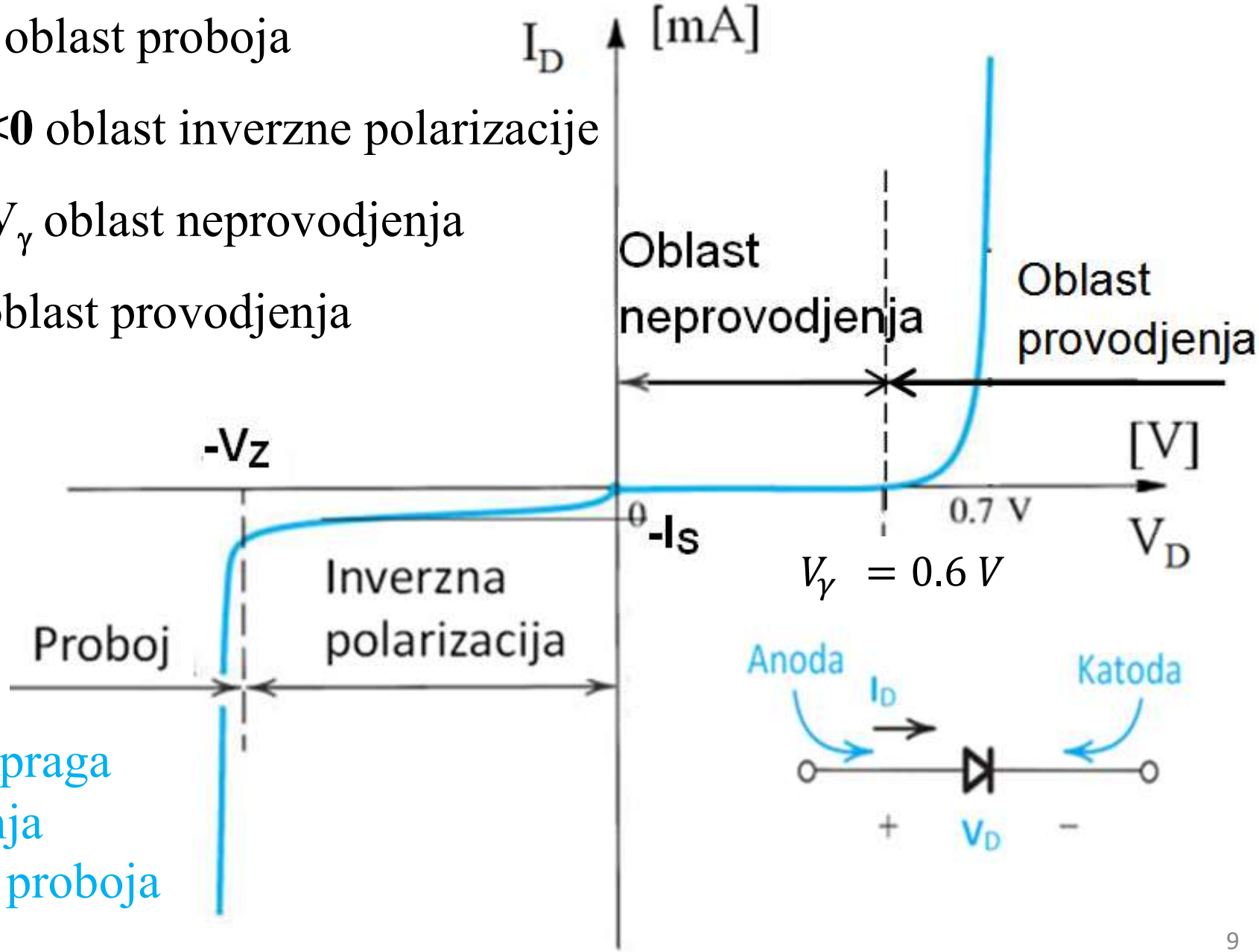
Oblasti rada diode:

$\mathbf{V_D < -V_Z}$ oblast proboja

$\mathbf{-V_Z < V_D < 0}$ oblast inverzne polarizacije

$\mathbf{0 < V_D < V_\gamma}$ oblast neprovodjenja

$\mathbf{V_D > V_\gamma}$ oblast provodjenja



$V_\gamma = 0.6\ V$

$\mathbf{V_\gamma}$ napon praga provodjenja

$\mathbf{V_Z}$ napon proboja

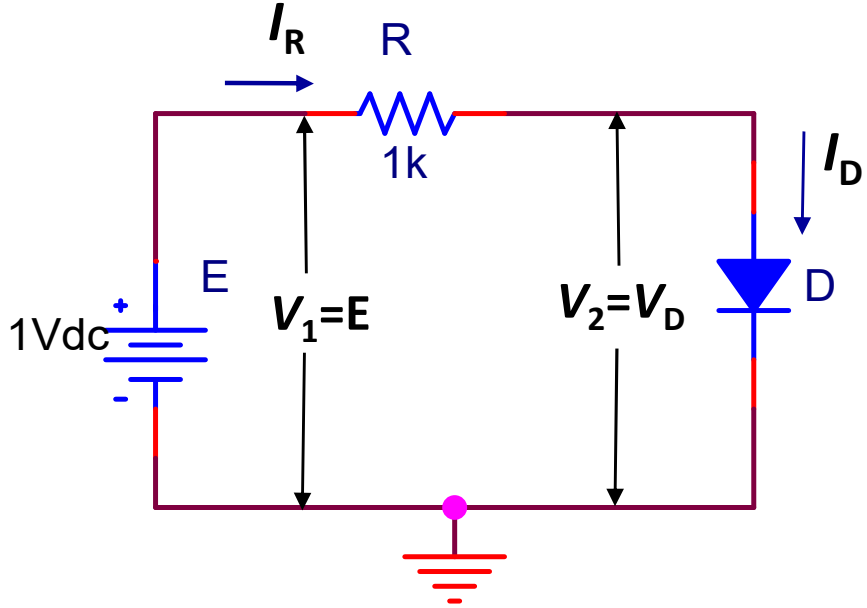
Analiza kola sa diodama u jednosmernom režimu

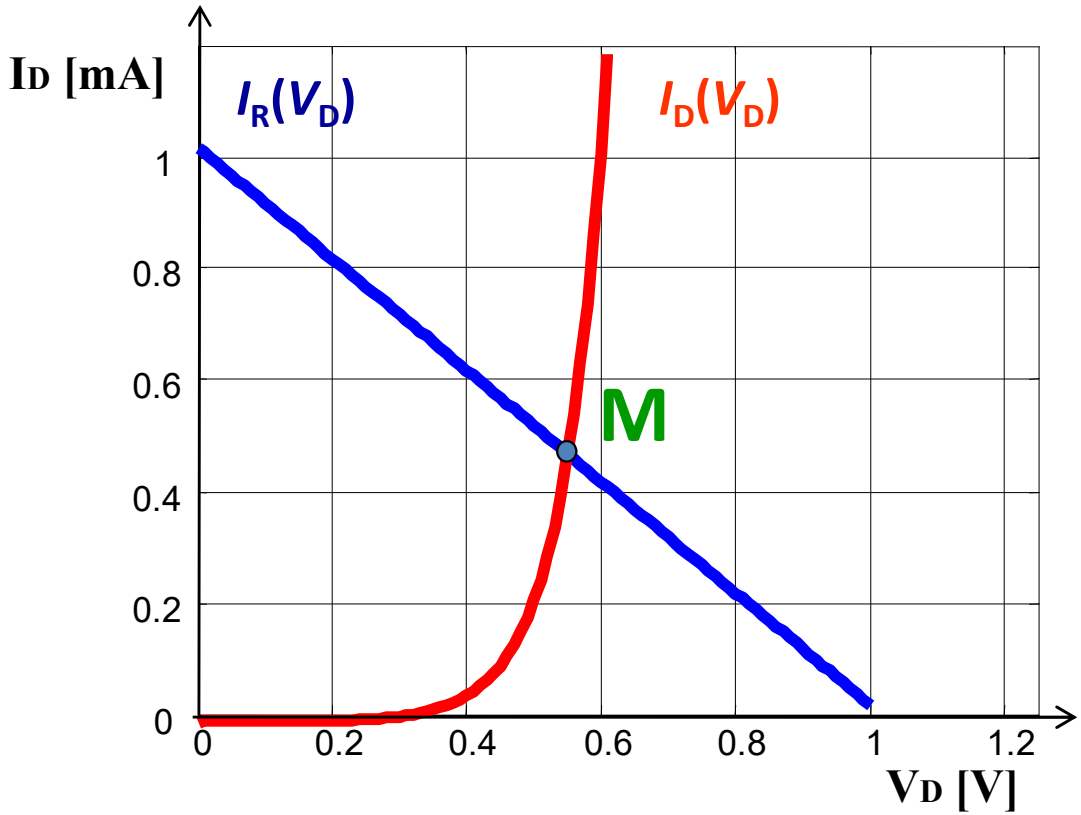
Analiza kola sa diodama složenija je u odnosu na analizu linearnih kola zato što je dioda nelinearna komponenta. Kola sa diodama se mogu analizirati na jedan od sledeća tri načina:

- Grafička analiza kola
- Analiza matematičkim modelom diode
- Analiza kola sa linerarizovanim modelom diode

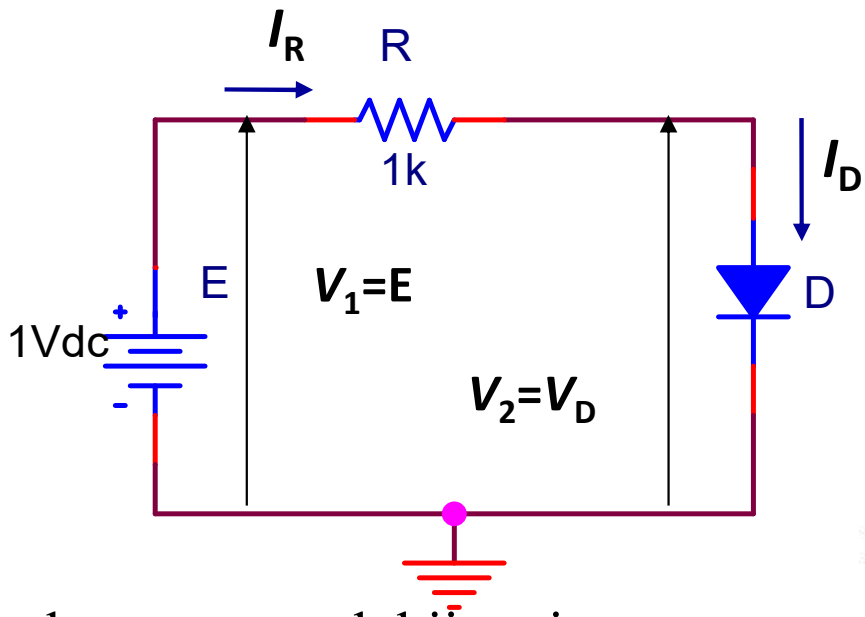
Grafička analiza kola

Grafička analiza kola je primenjiva kada je poznata relacija između struje kroz diodu i napona na diodi. Ovaj posupak je praktično primenjiv samo na veoma jednostavnim kolima.





Grafička analiza kola



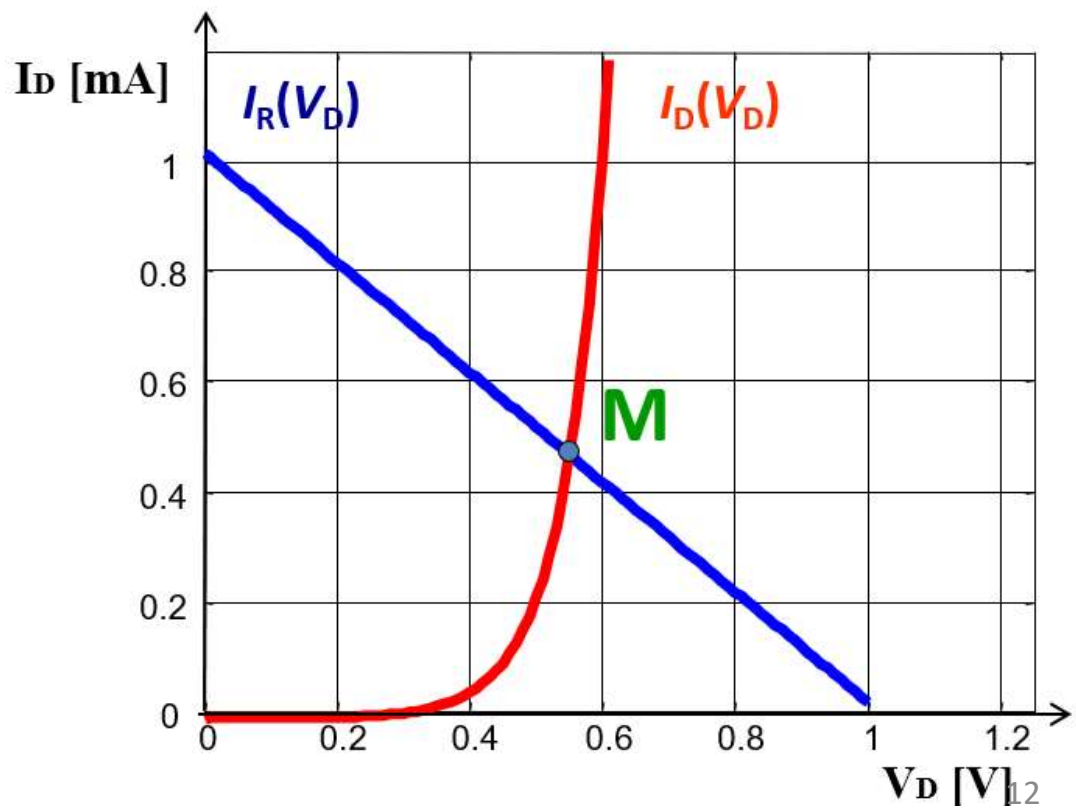
U preseku strujno naponske karakteristike diode (crvena linija) i radne prave (plava linija) nalazi se **radna tačka** diode. Radna tačka je određena strujom kroz diodu i naponom na diodi (tačka M).

Radna prava se dobija primenom Kirhofovog zakona za napon.

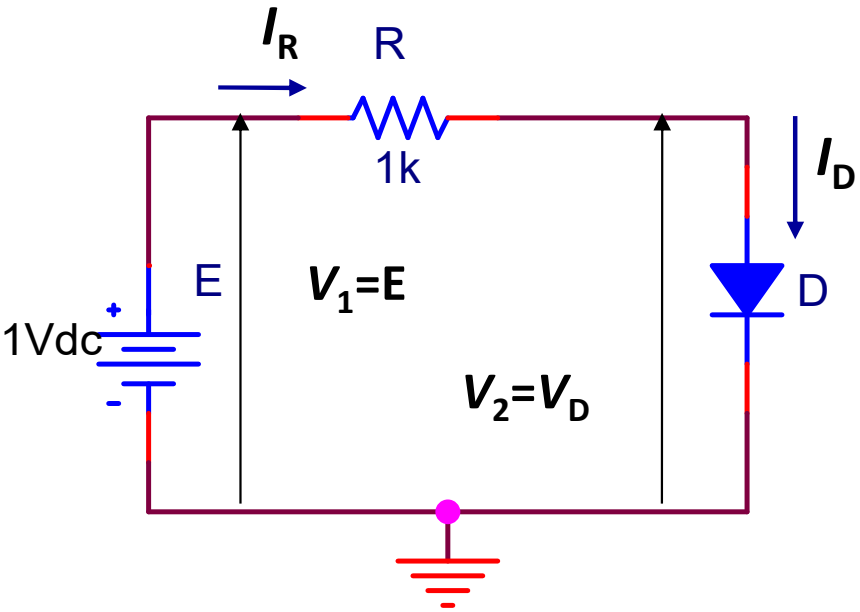
$$E - I_R \cdot R - V_D = 0$$

$$I_D = I_R = \frac{E - V_D}{R}$$

$$I_D = I_S\left(e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1\right)$$



Analiza matematičkim modelom diode



S obzirom da je strujno naponska karakteristika diode pozanata kolo sa diodama se može anlizirati i matematički. *Kirhofovi zakoni za struje i napone su univerzalni pa važe i za kola koja sadrže nelinearne komponente*.

Kada se jedna jednačina zameni u drugu dobija se transcedentna jednačina po naponu na diodi. Ova jednačina se može rešiti samo numerički. Postupak analize pomoću matemaitčkog modela se retko koristi u praksi jer je matematički veoma kompleksana čak i za najjednostavnija kola.

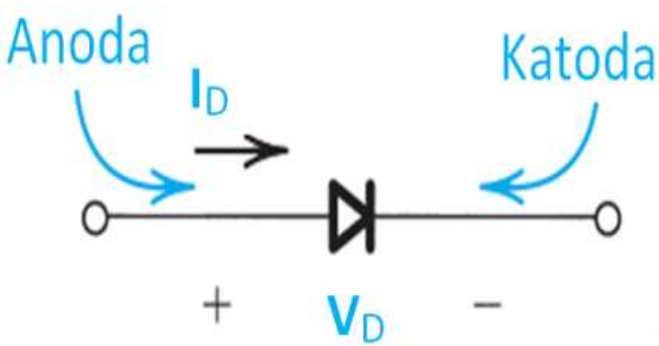
$$E - I_D \cdot R - V_D = 0$$

$$I_D(V_D) = I_s(e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1)$$

$$E - R \cdot I_s\left(e^{\frac{V_D}{V_T}} - 1\right) - V_D = 0$$

Analiza kola sa linerarizovanim modelom diode

Prilikom analize kola sa diodama u praksi se najčešće pojednostavljuje strujno naponska karakteristika diode. Preciznije rečeno koristi se strujno naponska karakteristika sastavljena od linearnih segmenata. Na taj način se problem analize kola sa nelinearnom komponentom svodi na linearnu analizu. U nastavku su navedena tri **linearizovana modela diode za velike signale**.

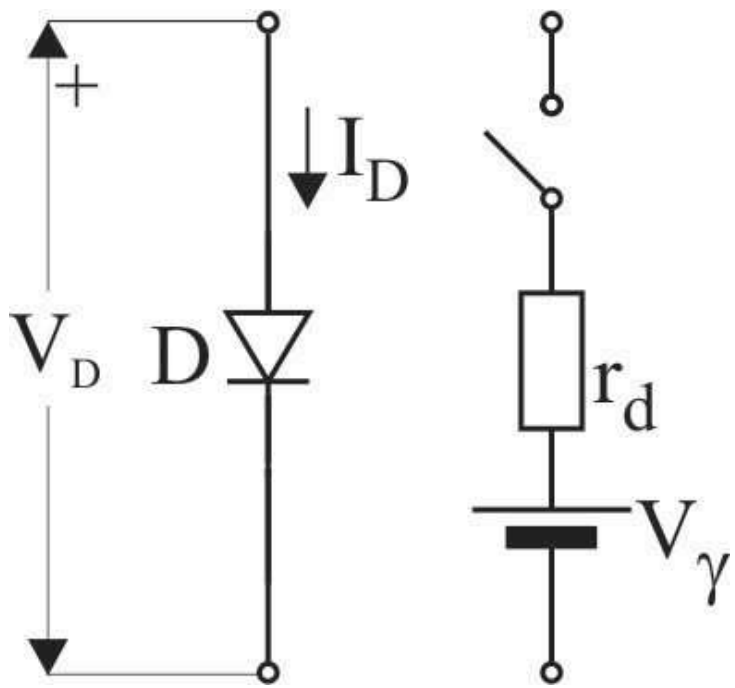


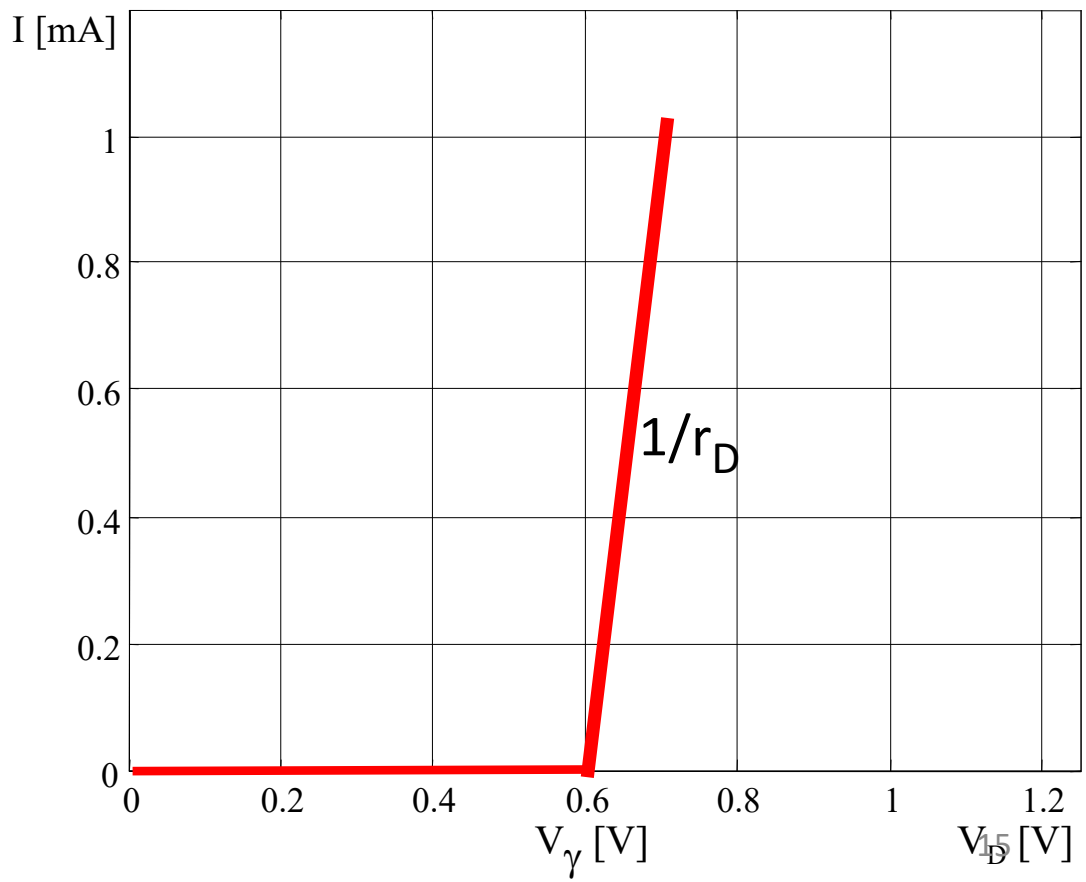
1) Model diode – linearizovan

$$I_D = 0 \quad \text{za } V_D < V_\gamma$$

$$I_D = \frac{V_D - V_\gamma}{r_d} \quad \text{za } V_D > V_\gamma$$

U modelu postoje dva linearna segmenta. Kada vodi, dioda se modelira kao redna veza jednosmernog naponskog generatora Vγ i otpornika rd.

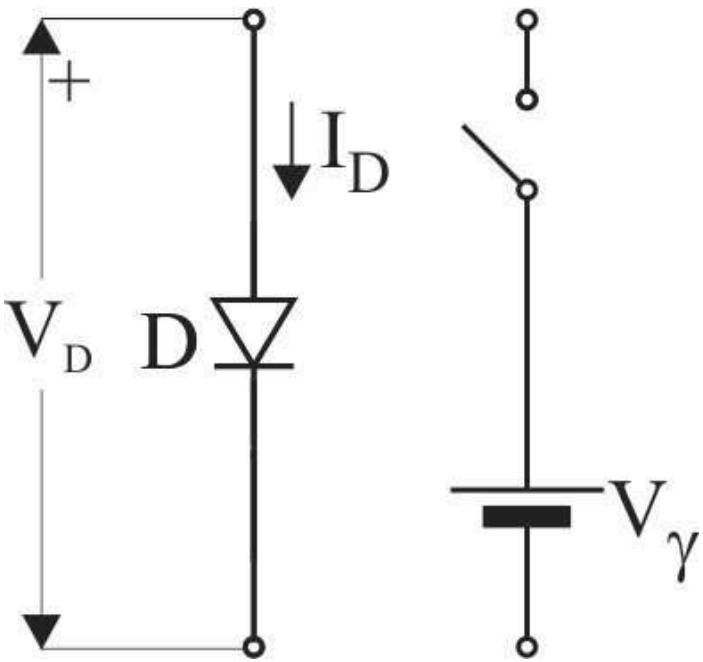




Model diode za velike signale

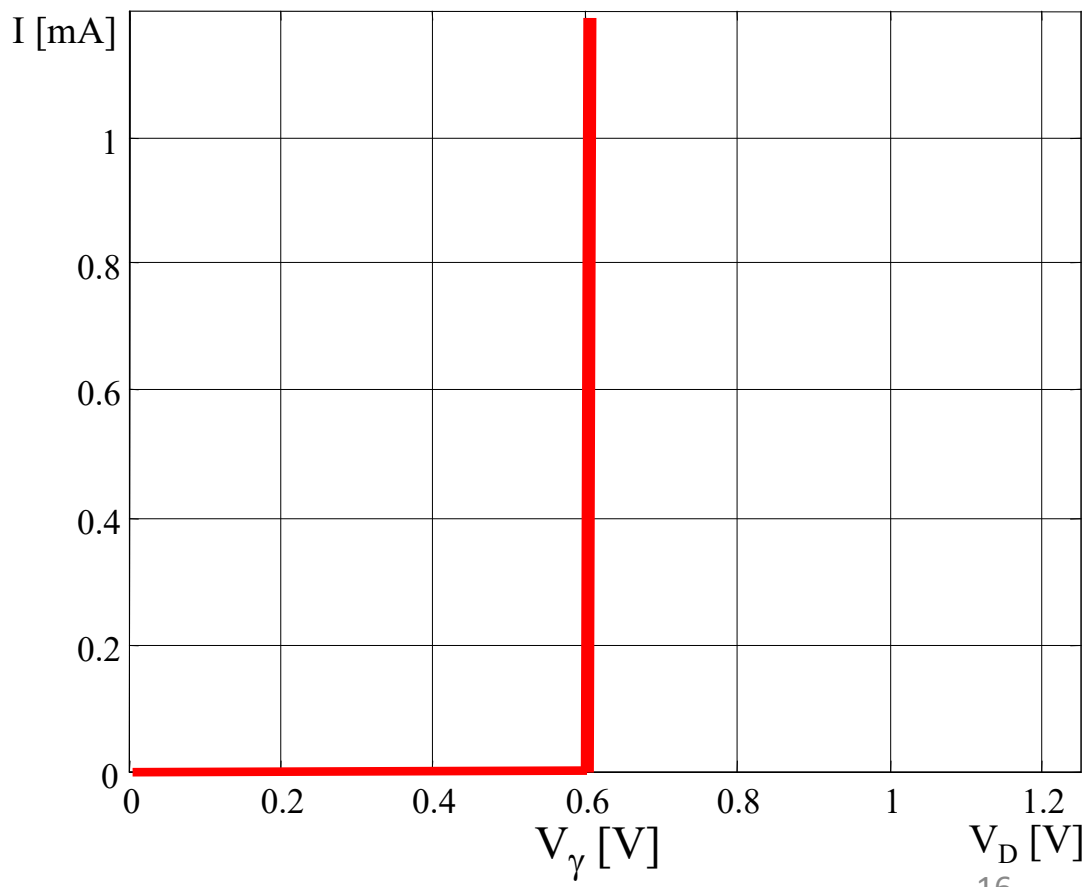
2) Model konatantnog napona

U modelu postoje dva linearna segmenta. Kada vodi dioda se modelira kao naponski generator Vγ.
$V_\gamma = 0{,}6\ V$ za silicijumsku diodu
$V_\gamma = 0{,}2\ V$ za germanlijumsku diodu



$$I_{\mathbf{D}} = 0 \quad \text{za } V_D < V_\gamma$$

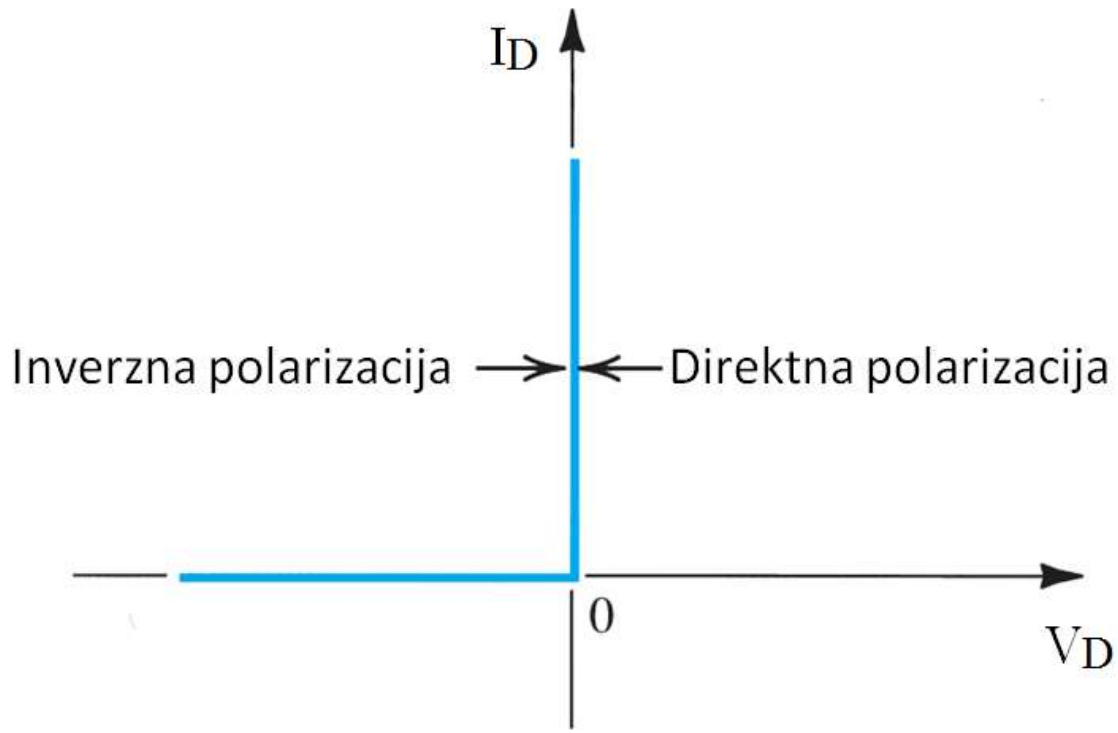
$$V_{\mathbf{D}} = V_\gamma \quad \text{za } I_{\mathbf{D}} > 0$$



3) Model idealne diode

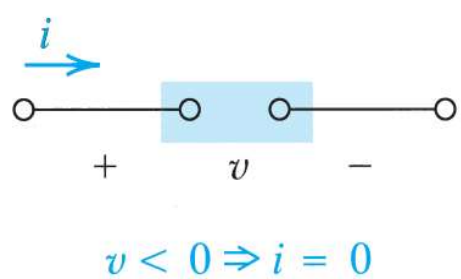
$$\boxed{V_D < 0 \quad \Rightarrow \quad I_D = 0}$$

$$\boxed{I_D > 0 \quad \Rightarrow \quad V_D = 0}$$

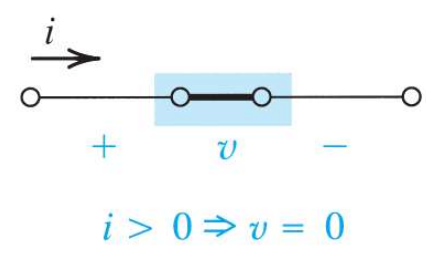


Kada diode vodi, modelira se kao kratak spoj ($V_D = 0$), a kada ne void modelira se kao prekid ($I_D = 0$).

Prekid



Kratak spoj



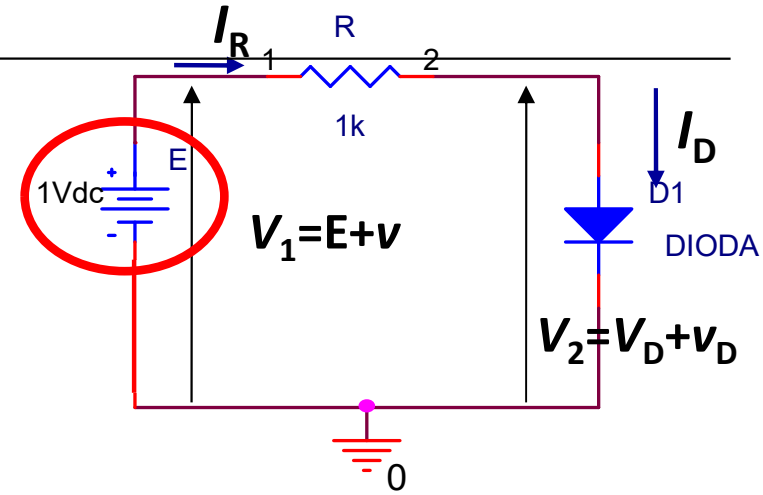
Model diode

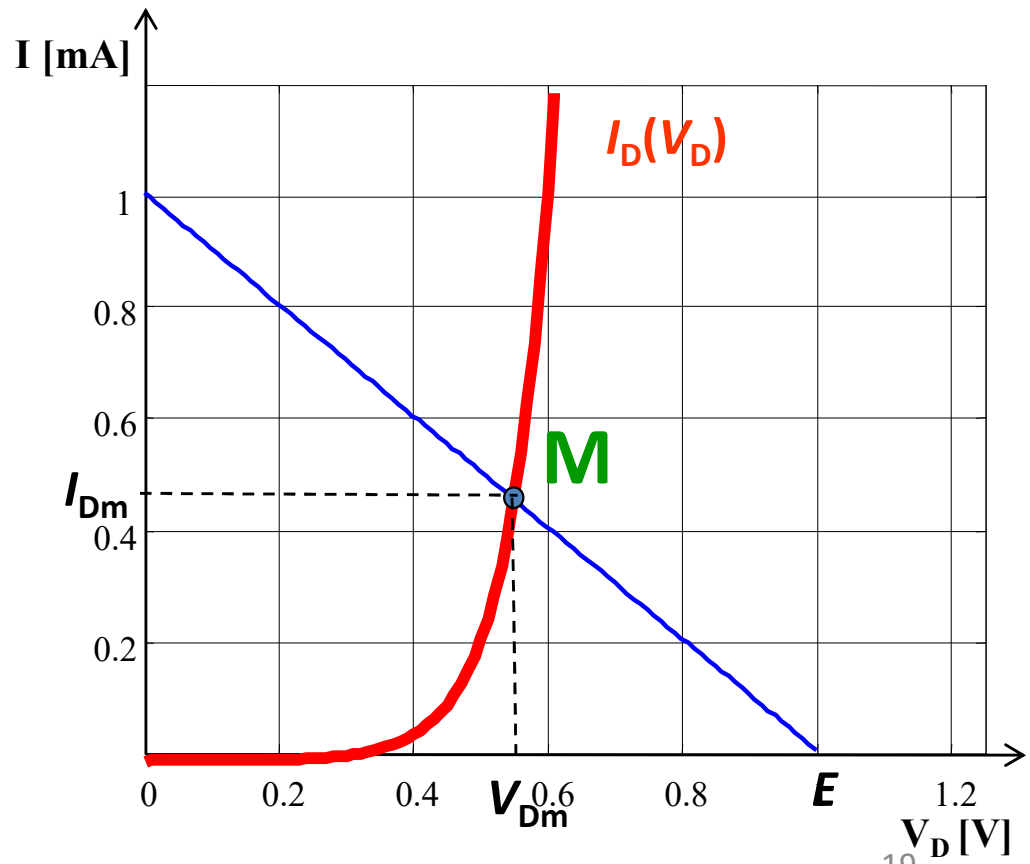
Linearizacijom modela diode unosi se određena greška prilikom određivanja struja i napona u kolu. Vrednost dobijene greške zavisi od kola u kome je povezana dioda.

Izbor adekvatnog modela za linearizaciju zavisi od kola. Ukoliko pad napona na diodi nema veći uticaj na struje i napone u kolu onda se može primeniti i grublji model kao što je model idealne diode.

- Dioda u elektronskom kolu

Uloga jednosmernog izvora napajanja je da obezbede odgovarajuću **mirnu radnu tačku** komponente (označena sa M). Mirna radna tačka diode odredjena je jednosmernom strujom kroz diodu i jednosmernim naponom na diodi. Radna tačka treba da se nalazi u odgovarajućoj oblasti rada i da bude u što linearnijem delu karakteristike.

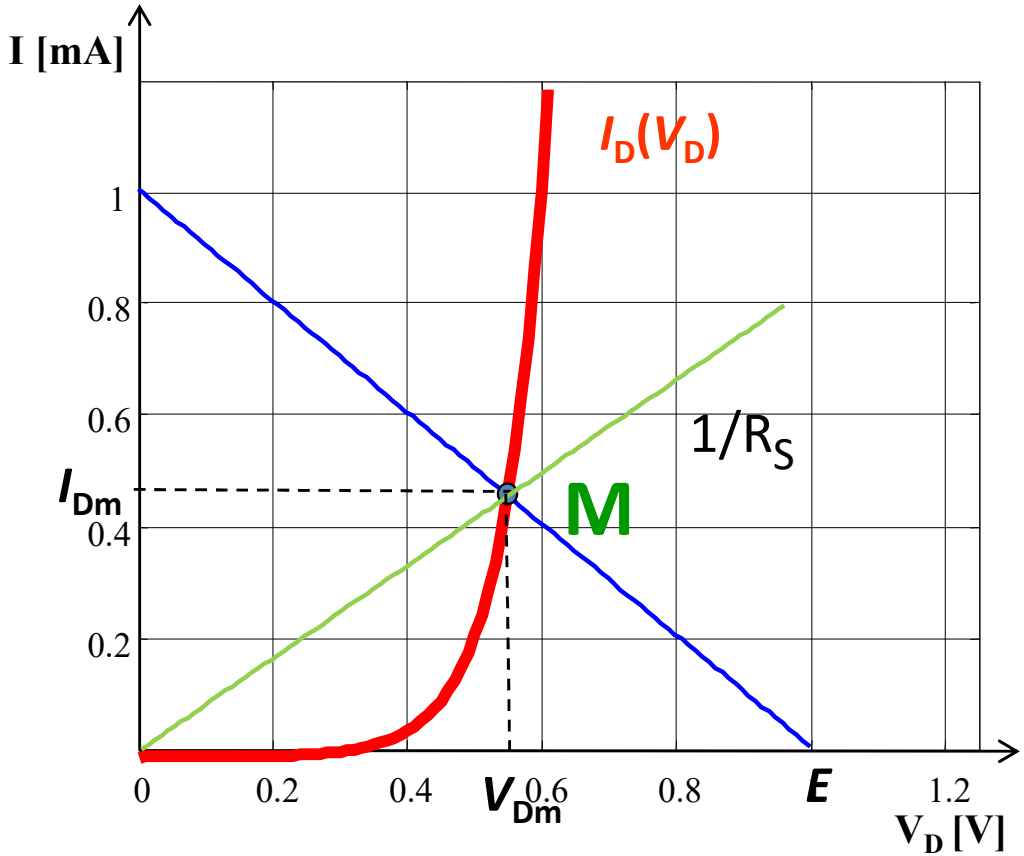




Statička i dinamička otpornost

Statička i dinamička otpornost se mogu odrediti grafički sa strujno naponske karakteristike.

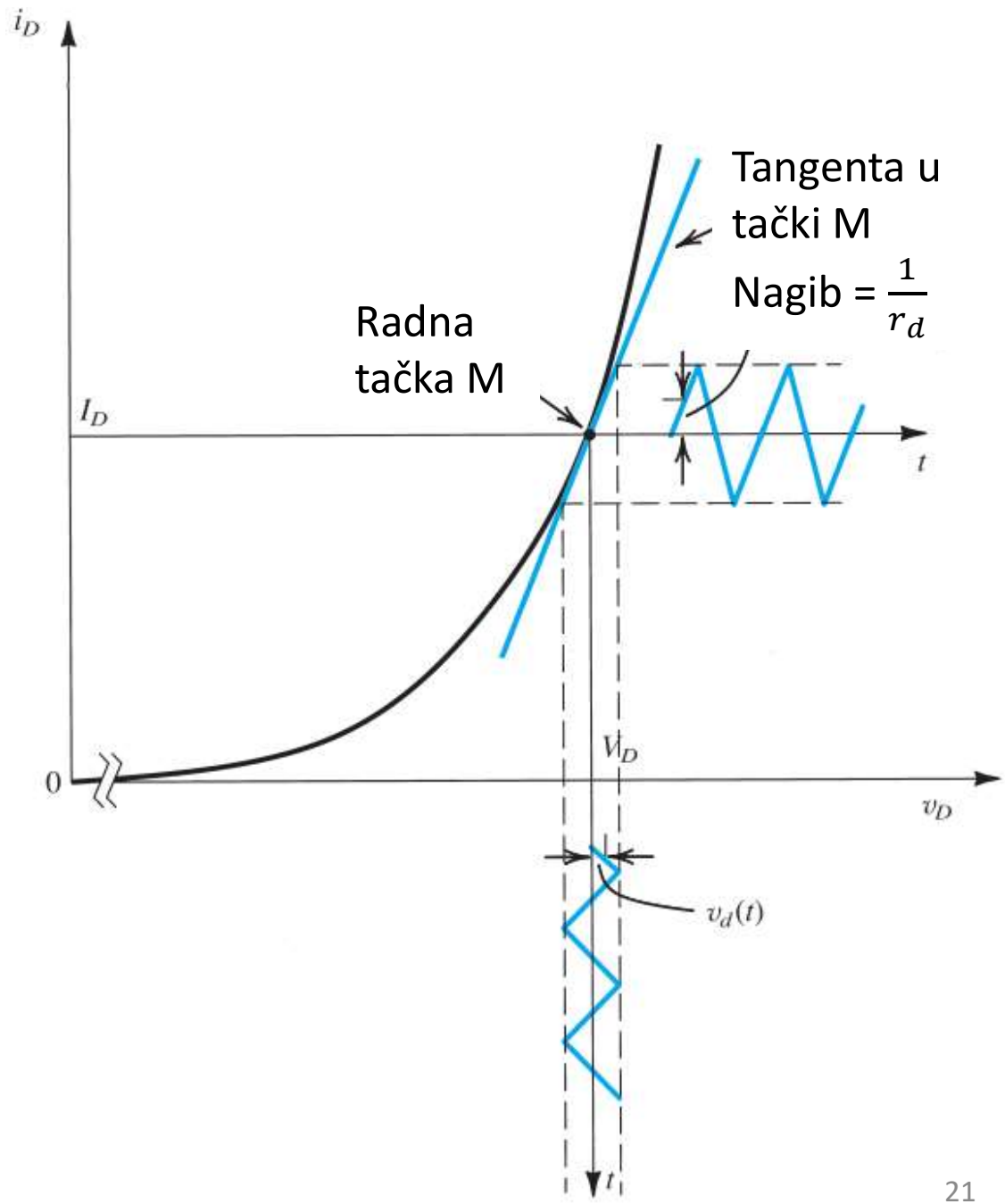
Statička otpornost, R_S, je obrnuto proporcionalna nagibu krive koja prolazi kroz koordinatini počaktak i radnu tačku. Dinamička otpornost, rd, je inverzno proporcionalna nagibu prave koja je tangenta na strujno naponsku karakteristiku u radnoj tački.



Statička i dinamička otpornost

Dinamička otpornost, **rd**, je inverzno proporcionalna nagibu prave koja je tangenta na strujno naponsku karakteristiku u radnoj tački M. Računski se može odrediti kao:

$$r_d = \left.\frac{dv_D}{di_D}\right|_{i_D = I_{DM}}$$



Statička i dinamička otpornost

Polazeći od izraza za strujno naponsku karakteristiku diode i definicije dinamičke otpornosti dobijamo da je:

$$r_d = \frac{\mathrm{dV}_D}{\mathrm{dI}_D} = \left(\frac{dI_D}{\Delta V_D}\right)^{-1}$$

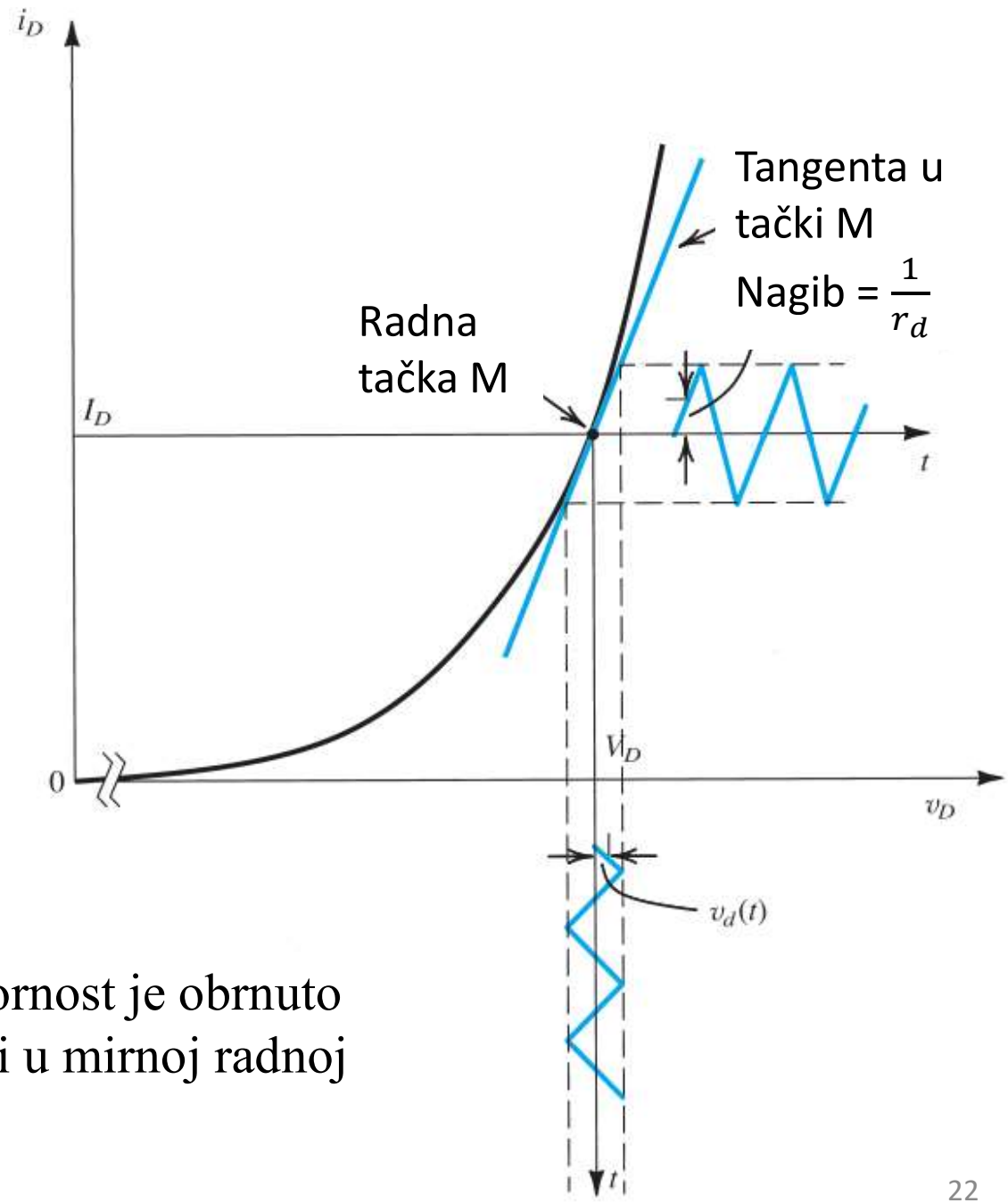
$$I_D = \mathrm{I}_S e^{V_D/V_T}$$

$$\left.\frac{dI_D}{dV_D}\right|_{I_D = I_{DM}} = \frac{\mathrm{I}_S e^{V_D/V_T}}{V_T}$$

$$r_d = \frac{1}{\frac{\mathrm{dI}_D}{\mathrm{dV}_D}} \approx \frac{1}{\frac{\mathrm{I}_S e^{V_D/V_T}}{V_T}} \approx \frac{V_T}{I_{DM}}$$

$$\boxed{r_d = \frac{V_T}{I_{DM}}}$$

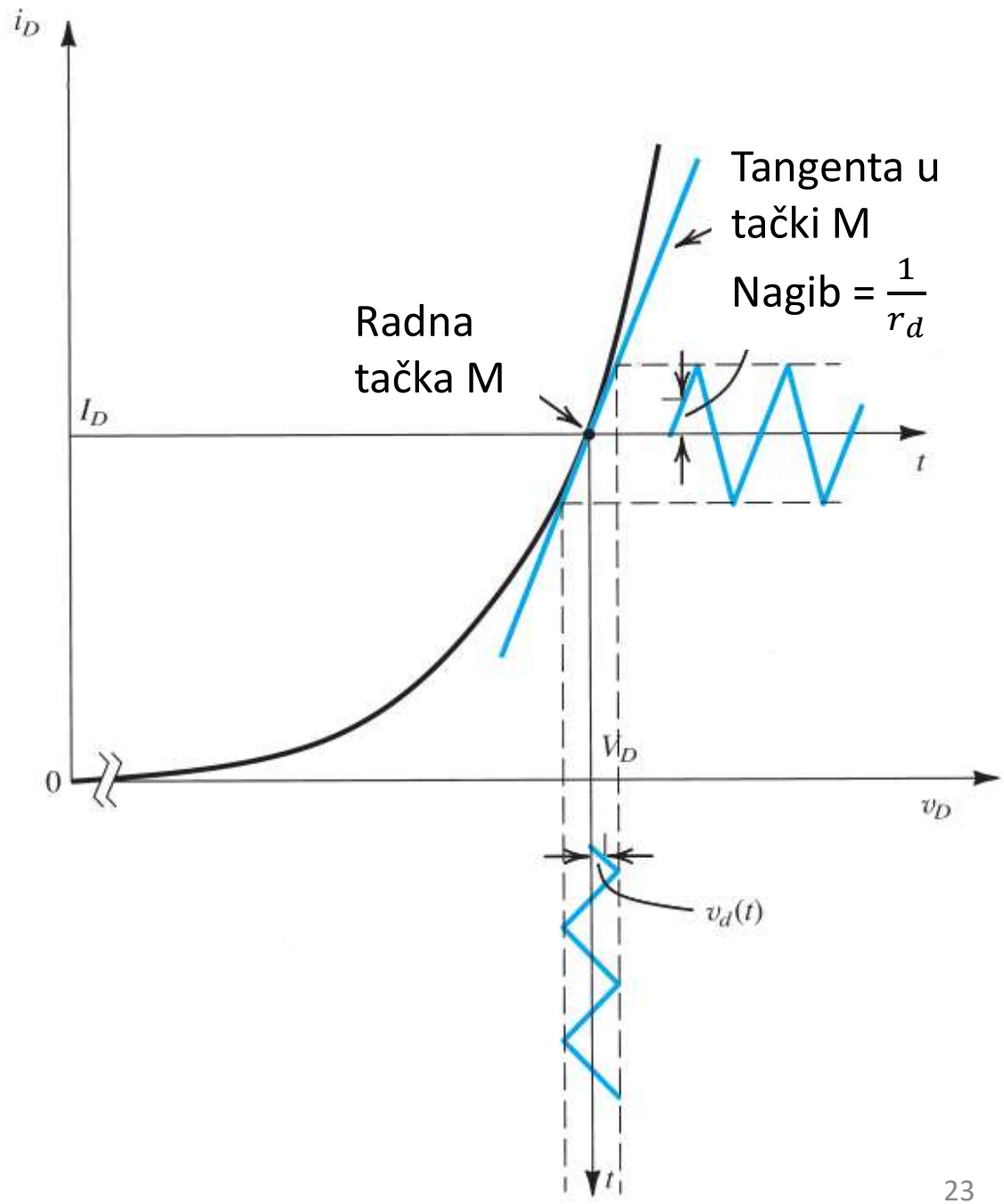
Dinamička otpornost je obrnuto srazmerna struji u mirnoj radnoj tački I_{DM}.



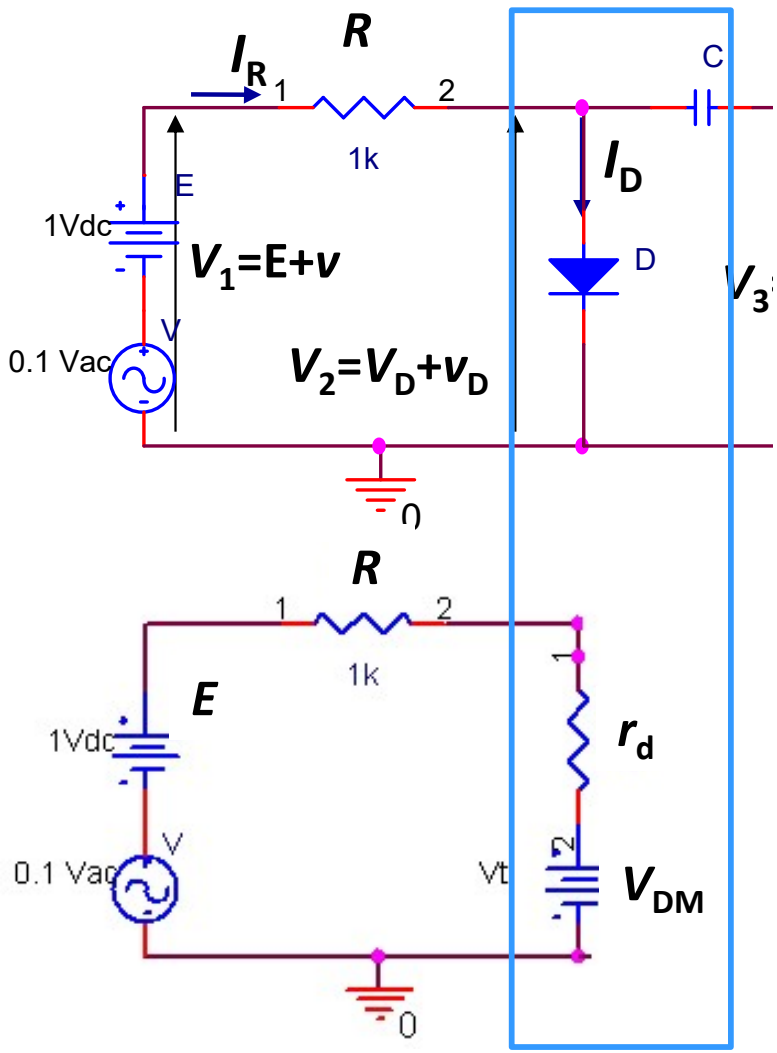
Statička i dinamička otpornost

Pod dejstvom promenjivog signala pomera se radna tačka u okolini mirne radne tačke i duž statičke karakteristike diode.

Ukoliko je promenjiva komponenta napona mala deo karakteristike duž koje se pomera radna tačka se moža aproskimirati pravom linijom. Ova linija predstavlja tangentu statičke karakteristike na mestu radne tačke.

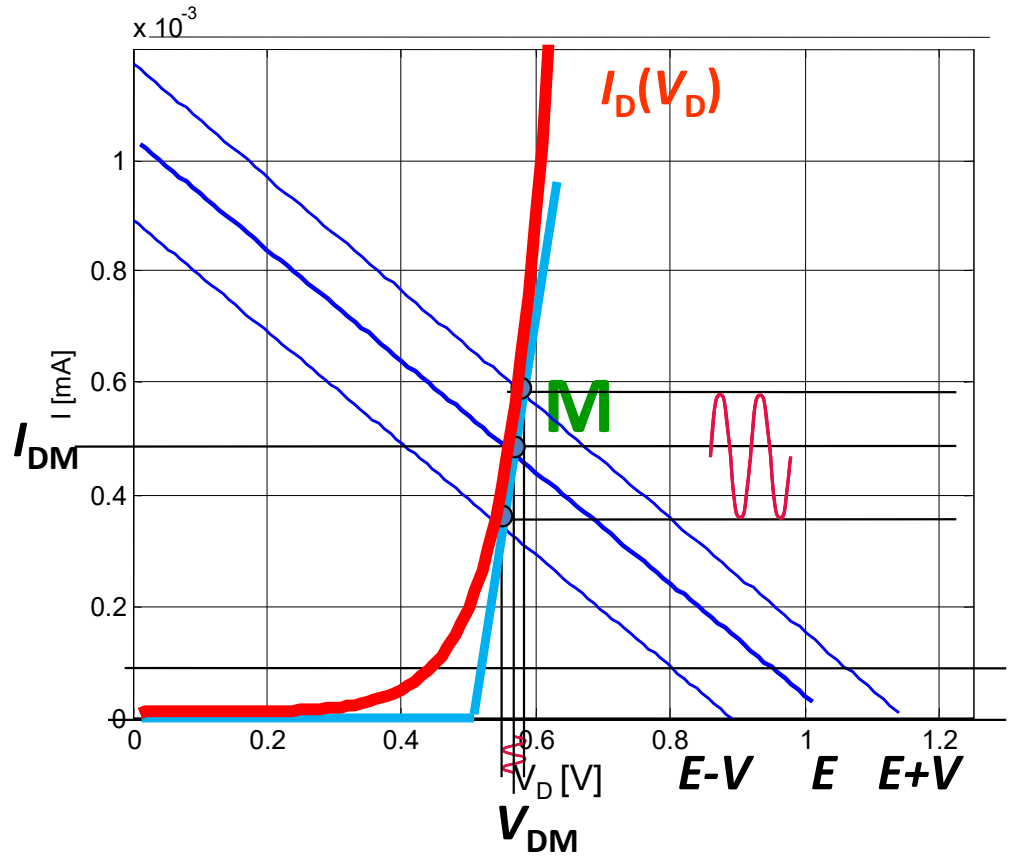


Dioda u elektronskom kolu



Linearizovan model

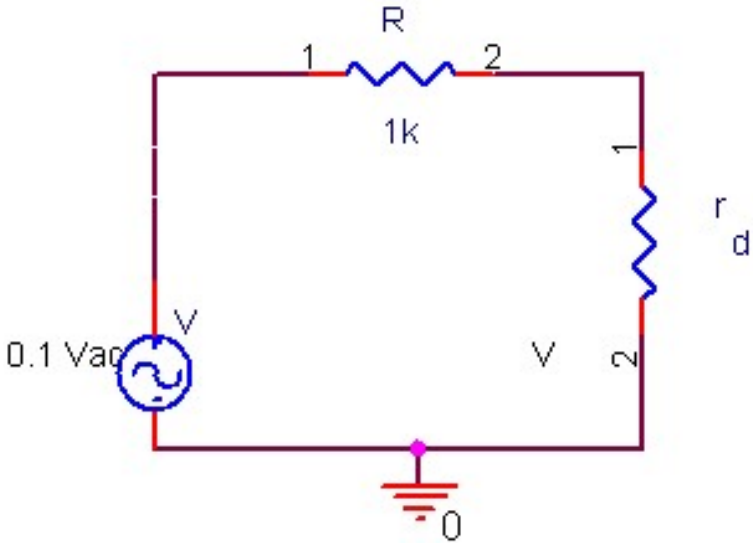
Grafička interpretacija problema



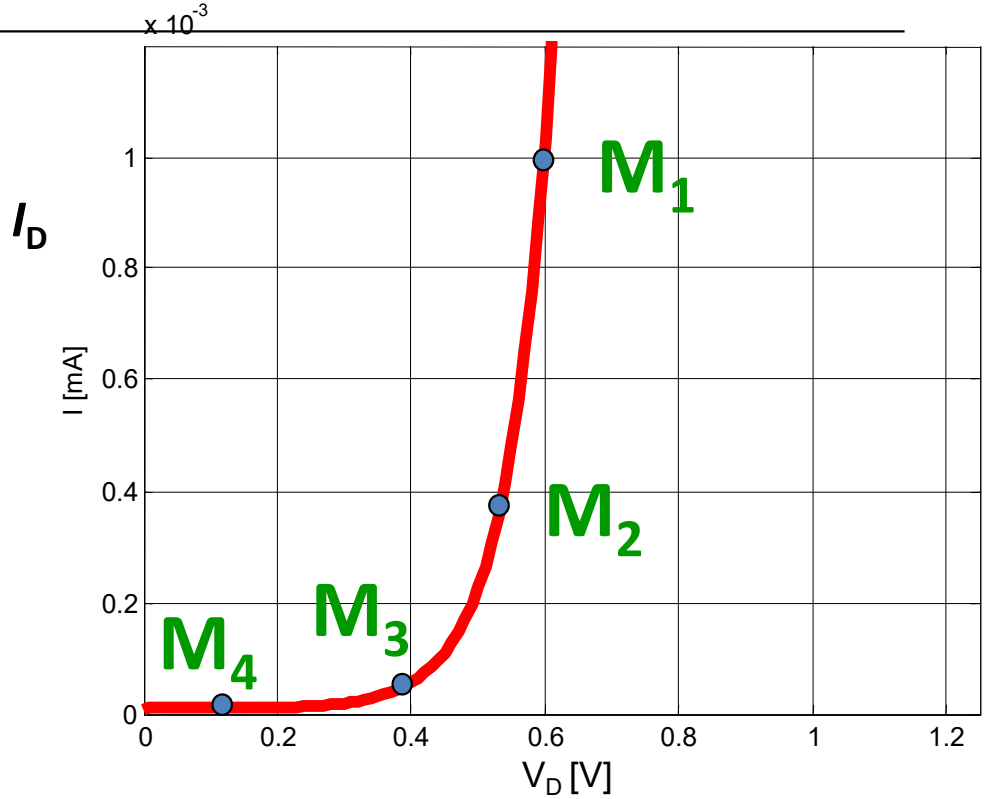
Aproksimacija dela karakteristike duž kojeg se pomera radna tačka pravom linijom znači da smo zamenili diodu otpornikom čija je otpornost

$$r_d = \left.\frac{dv_D}{di_D}\right|_{I_{DM}}$$

VAŽNO model za male signale



$$r_d \approx \frac{V_T}{I_D}$$



Dinamička otpornost zavisi od položaja mirne radne tačke!

$$r_{D1} < r_{D2} < r_{D3} < r_{D4}$$

Postoji zavisnost između jednosmerne struje i dinamičke otpornosti. Manja struja – veća otpornost

Model diode

Na pn spoju se pojavljuju dve vrste kapacitivnosti: kapacitivnost prostornog naelektrisanja i difuziona kapacitvnost. Ove kapacitivnosti su nelinearne, odnosno njihova vrednost zavisi od napona na diodi. Nelinarne kapacitivnosti se određuju kao prvi izvod količine naelektrisanja po naponu.

$$C = \frac{dQ}{dV}$$

Kapacitvnost prostornog naelektrisanja je posledica postojanja prelazne oblasti u pn spoju. Prelazna obast sadrži nepokretna naelektrisanja koja čine joni ugrađeni u kristalnu rešetku. Pod dejstvom spoljašnjeg napona menja se širina prelazne oblasti a samim tim i količina prostornog naelektrisanja koja se u njoj nalazi.

Difuziona kapacitivnost je posledica nagomilavanja manjinskih nosilaca naelektrisanja u okolini prelazne oblasti prilikom direktne polarizacije diode. Difuziona kapacitivnost opisuje promenu koncentracije pokretnih nosilaca naelektrisanja (elektrona i šupljina) u okolini prelazne oblasti usled promene napona na direktno polarisanoj diodi.

Model diode

Kapacitvnost prostornog naelektrisanja je posledica promene širine prelazne oblasti pod dejstvom napona na diodi. Količina naelektrisanja u prelaznoj oblasti koju čine joni ugrađeni u kristalnoj rešetci srazmerna je korenu inverznog napona na pn spoju V_{in}. Pri inverznoj polarizaciji ovaj napon je jednak zbiru spoljašnjeg inverznog napona V_r i napona potencijalne barijere V_o.

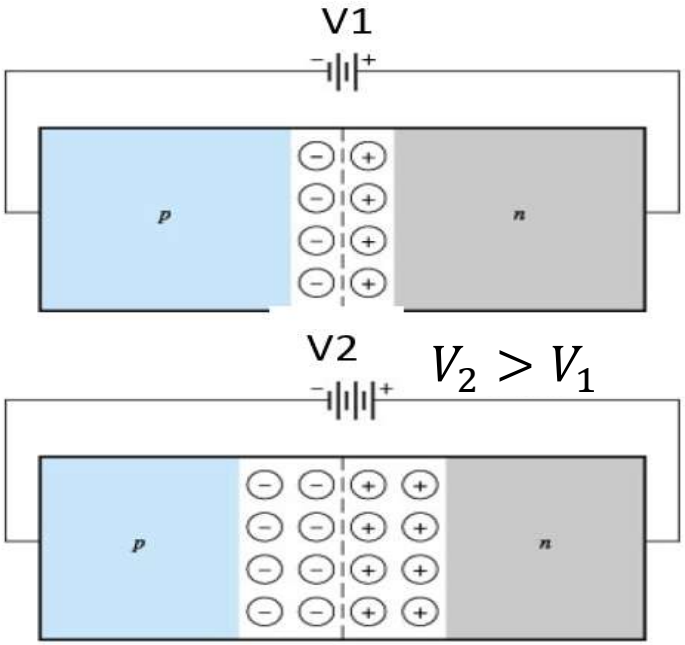
$$Q_T = \alpha\sqrt{V_{inv}} = \alpha\sqrt{V_o + V_r}$$

$$C_T = \frac{dQ_T}{dV} = \frac{\alpha}{2\sqrt{V_o + V_r}}$$

Q_T je količina vezanog naelektrisanje u prelaznoj oblasti

V_R je spoljašni napon inverzne polarizacije,

V_0 je potencijalna barijera (razlika potencijala kada dioda nije polarisana).

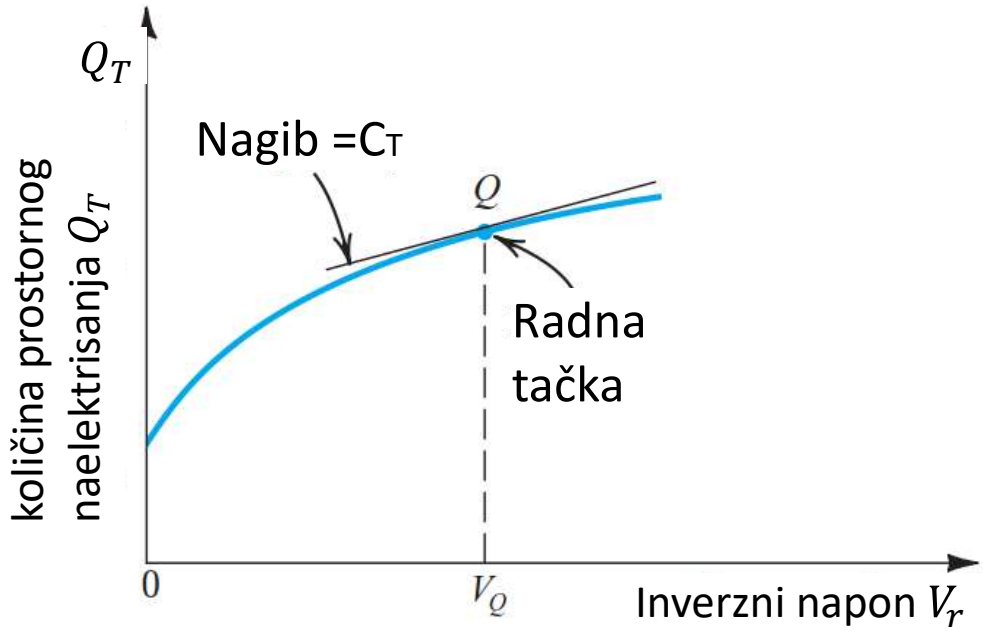


Model diode

Kapacitvnost prostornog naelektrisanja je posledica promene širine prelazne oblasti pod dejstvom napona na diodi. Ova kapacitivnost dolazi do izražaja pri inverznoj polarizaciji diode i inverzno je proporcionalna korenu napona . Najčešće se kapacitivnost prostornog naelektrisanja pri odredjenom naponu inverzne polarizacije V_r izražava u funkciji od kapacitivnosti prostornog naelektrisanja nepolarisane diode, C_{T0}.

$$C_{TO} = \left.\frac{dQ_T}{dV}\right|_{V = V_o} = \frac{\alpha}{2\sqrt{V_o}} \qquad C_T = \frac{dQ_T}{dV} = \frac{\alpha}{2\sqrt{V_o + V_r}}$$

$$\boxed{C_T = C_{T0}\sqrt{\frac{V_0}{V_0 + V_r}}}$$

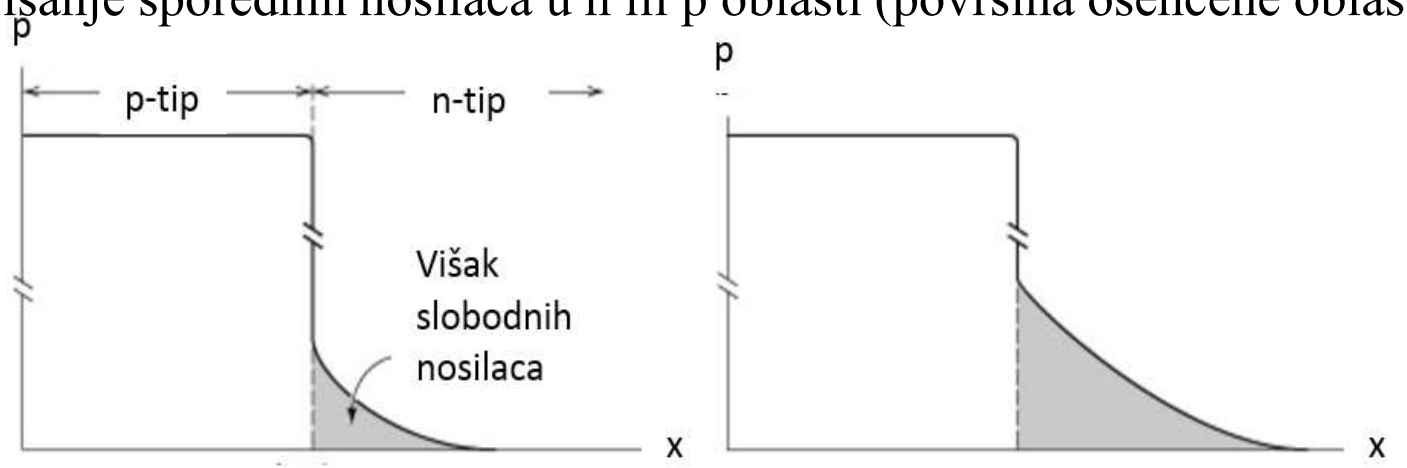


Model diode

Difuziona kapacitivnost je posledica akumuliranja manjinskih nosilaca naelektrisanja u okolini prelazne oblasti prilikom direktne polarizacije diode. Da bi se stvorio višak slobodnih nosilaca naelektrisanja potrebno je određeno vreme zbog konačnog vremena prostiranja nosilaca naelektrisanja. Sama pojava je ekvivalentna pojavi punjenju kondenzatora. Difuziona kapacitivnost dolazi do izražaja pri direktnoj polarizaciji diode. Vrednost ove kapacitivnosti je direktno srazmerna struji koja teče kroz diodu (τ u jednačini je srednje vreme života nosilaca naelektrisanja – prosečno vreme izmedju generisanja i rekombinacije slobodnih nosilaca naelektrisanja).

$$\boxed{C_D = \frac{dQ}{dV} = \frac{\tau \cdot I_D}{V_T} = \frac{\tau}{r_d}}$$

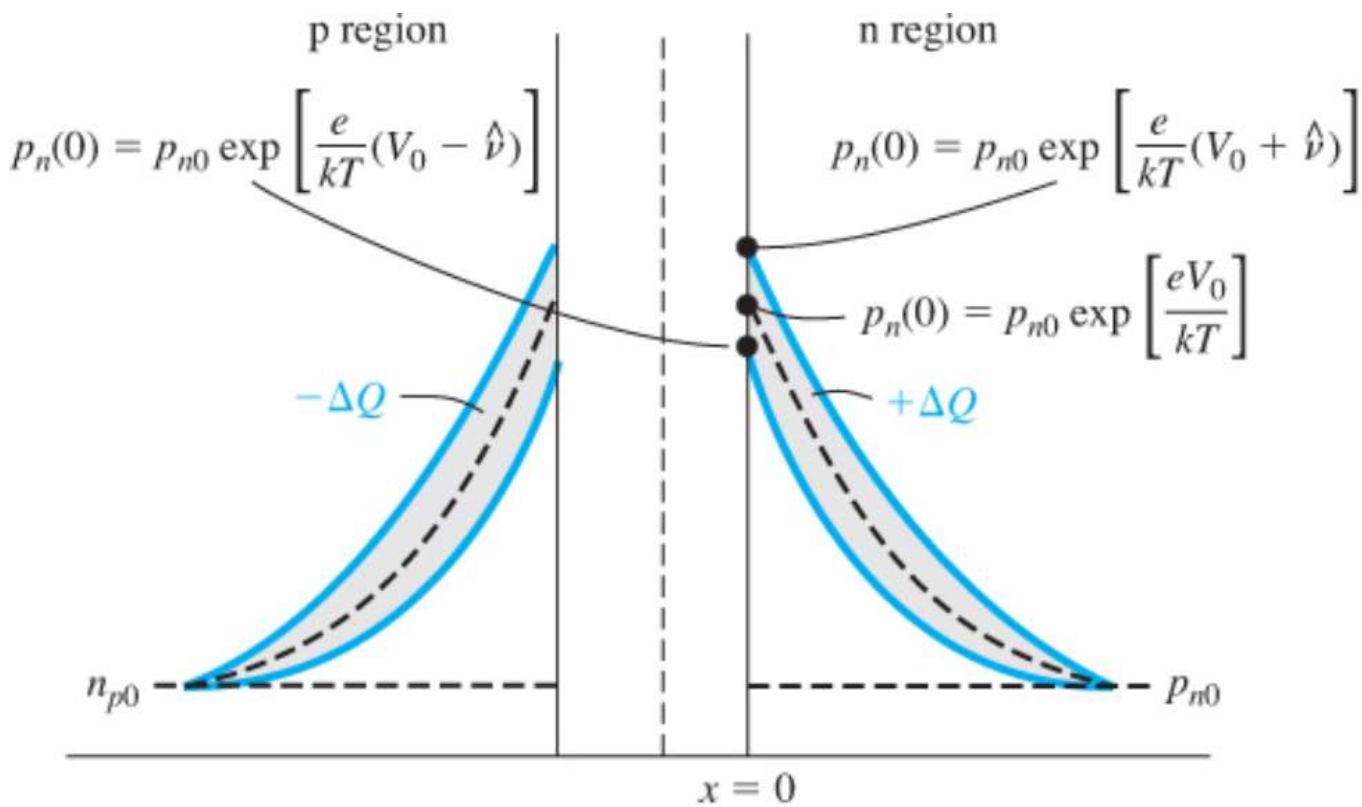
V_T jer temperaturski potencijal, r_d dinamička otpornost diode, I_D jednosmerna struja kroz diodu. Q predstavlja naelekrisanje sporednih nosilaca u n ili p oblasti (površina osenčene oblasti).



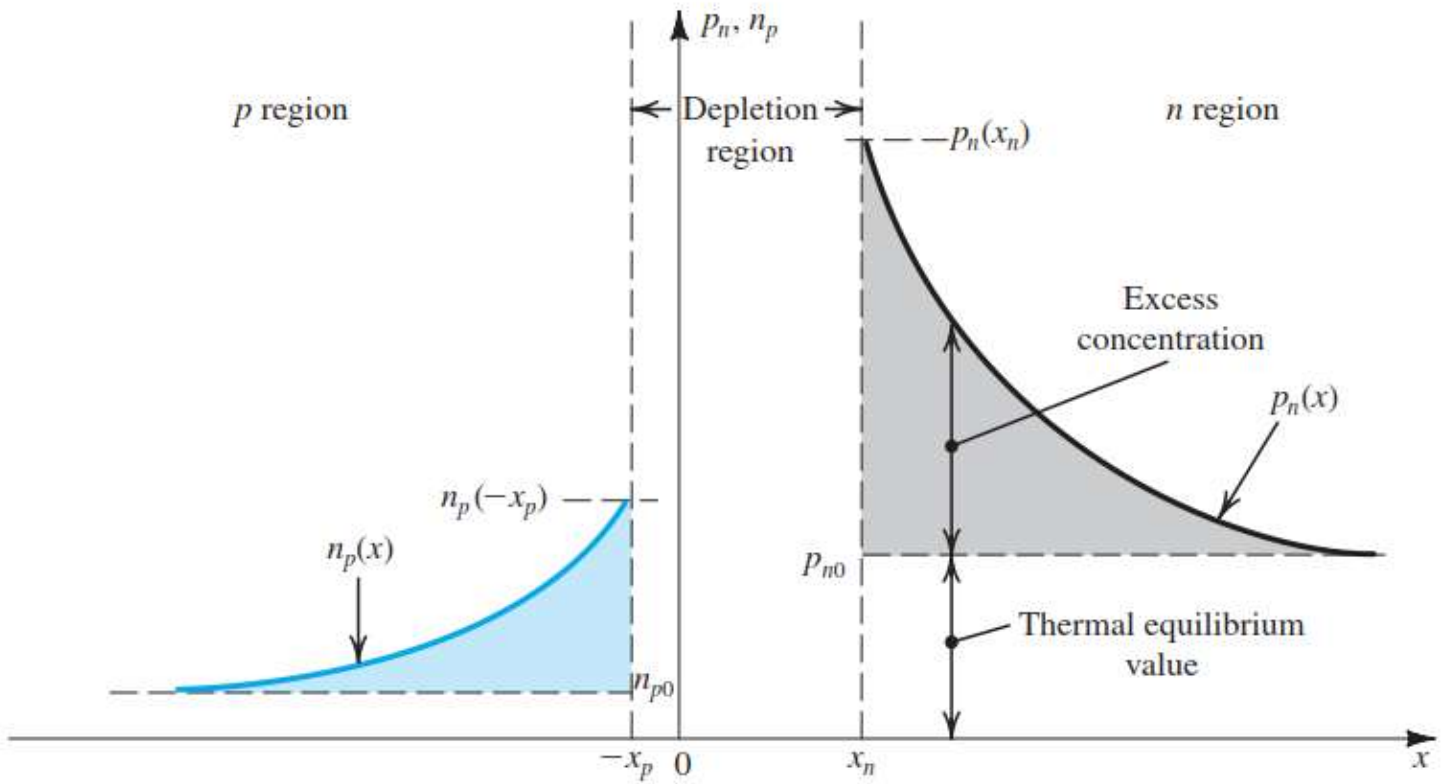
$I_D=I_1$ $I_D=I_2 > I_1$

Difuziona kapacitivnost

$$C_D = \frac{dQ}{dV} = \frac{\tau \cdot I_D}{V_T} = \frac{\tau}{r_d}$$

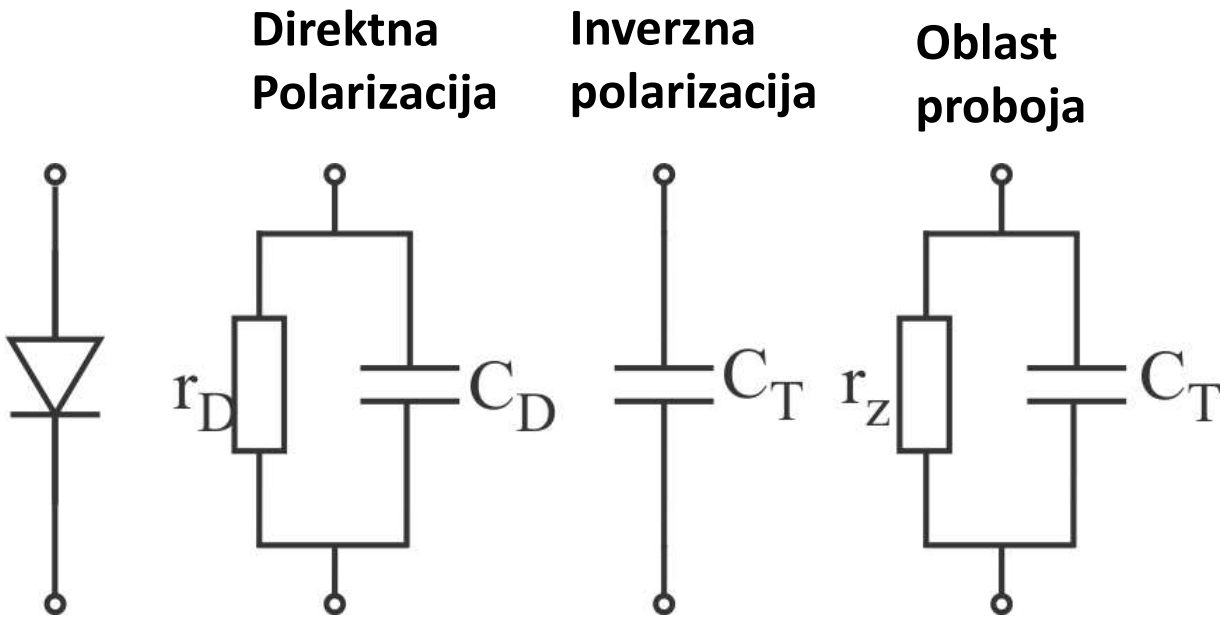


Koncentracija manjinskih nosilaca naelektrisanja (elektrona u p oblasti – levo i koncentracija šupljina u n oblasti –desno) duž pn spoja kada se menja napon polarizacije.


p_n, n_p
p region
Depletion region
n region
$p_n(x_n)$
Excess concentration
$p_n(x)$
$n_p(-x_p)$
$n_p(x)$
p_{n0}
Thermal equilibrium value
n_{p0}
$-x_p$
0
x_n
x

Model diode

Kapacitivnosti pn spoja su reda desetak pF i mogu se zanemariti pri niskim frevkencijama. Međutim, prilikom analize na visokim frekvencijama moraju se uzeti u obzir i parazitne kapacitivnosti diode. Pri direktnoj polarizaciji dominantan je uticaj difuzione kapacitivnosti a pri inverznoj polarizaciji uticaj kapacitivnosti prostornog naelektrisanja. Model diode za male signale pri visokim frekvencijama zavisiće od položaja radne tačke.



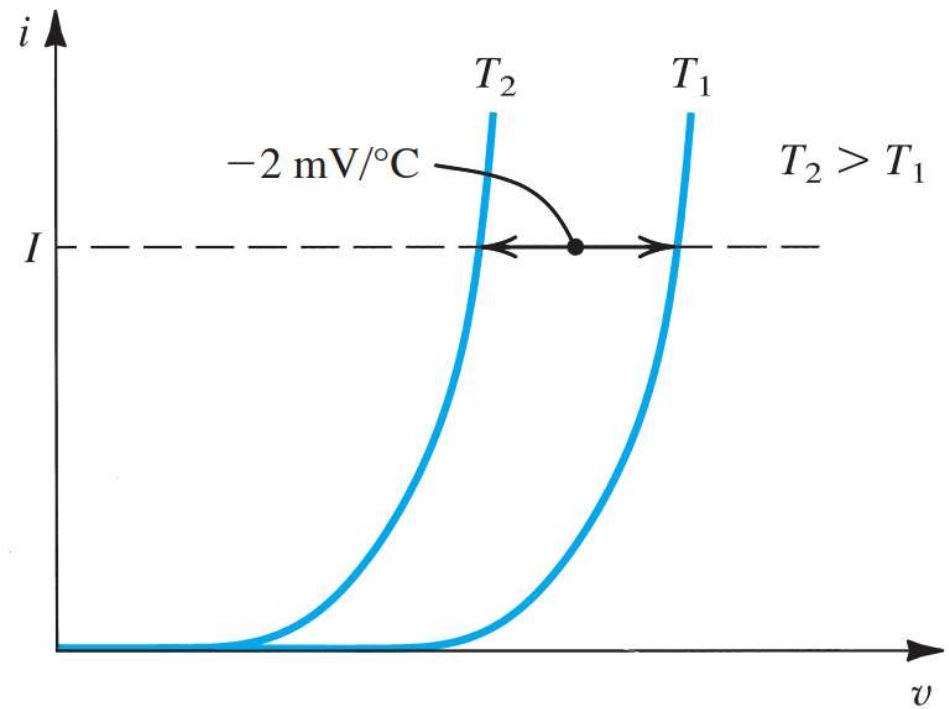
C_T je kapacitvnost prostornog naelektrisanja; C_D je difuziona kapacitvnost

Temperaturska zavisnost modela diode

Vrednost priraštaja struje ili napona diode pod dejstvom temperature zavisi od položaja radne tačke.

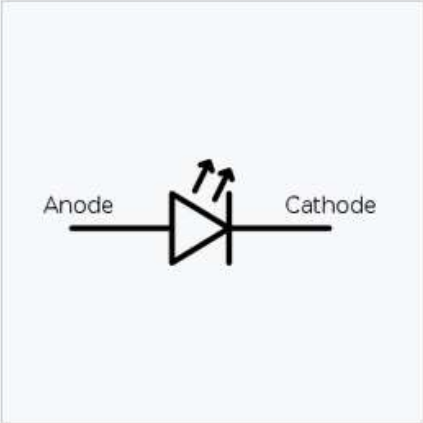
Inverzna struja zasićenja $\mathbf{I_S}$ se značajno povećava sa porastom temperature zbog porasta koncentracije šupljina i slobodnih elektrona. Kod silicijumske diode I_S se udvostruči pri porastu temperature za 10° C dok se kod germanlijumske diode udvostručuje pri porastu temperature za 7° do 8^oC.

Sa porastom temperature statička karakteristika diode se u oblasti direktne polarizacije pomera za približno **-2 mV/C**. Za isti iznos se pri porastu temperature menja i n**apon praga provođenja diode, Vγ**. Ukoliko je dioda inverzno polarisana pri porastu temperature dolazi do značajnog porasta struje.



$$I_D = \mathbf{I_S}(\mathbf{e}^{\frac{V_D}{V_T}} - 1)$$

Specijalni tipovi dioda



Led dioda

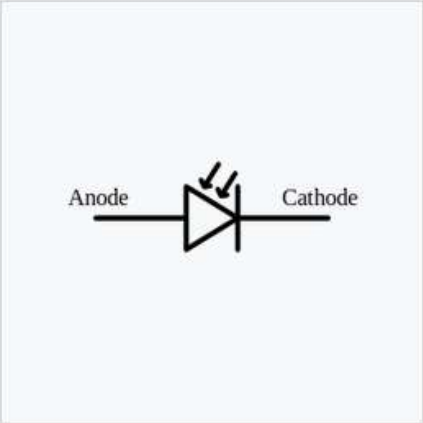
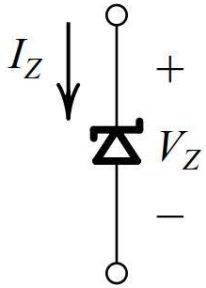
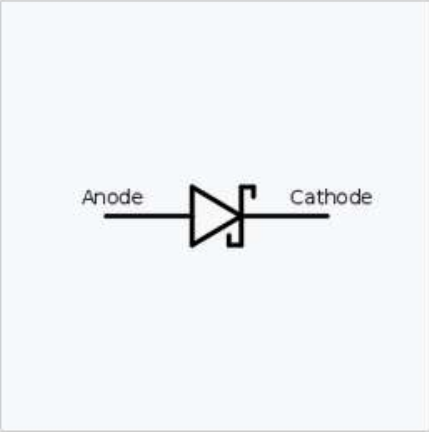


Foto dioda



Zener dioda

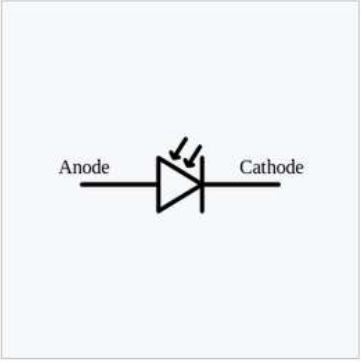
Varikap dioda



Šotki dioda

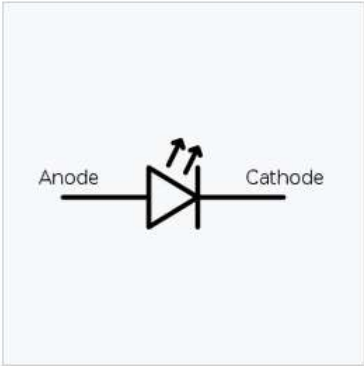
Specijalni tipovi dioda

- **Fotodiode** zasnivaju rad na činjenici da struja inverzno polarisanog pn spoja može da se kontroliše svetlosnim zračenjem. Fotoni koji dopiru do osiromašene oblasti prouzrokuju raskidanje kovelantih veza usled čega raste koncentracija slobodnih nosilaca. Kao posledica toga raste inverzna struja zasićenja koja se u ovom slučaju zove fotostruja. Ova struja je pri inverznoj polarizaciji diode srazmerna osvetljenju.



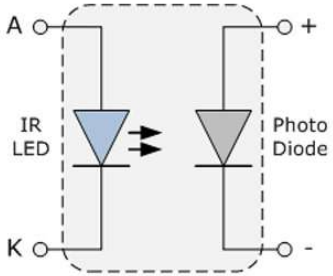
Photodiode symbol

- **LED** dioda konvertuju struju koja protiče kroz direktno polarisanu diodu u svetlost. Kada se dioda direktno polariše nosiocu naelektrisanja koji prodju kroz osiromašenu oblast postaju manjiski nosioci i tu se rekombinju (šupljine prelaze iz **p** oblasti u **n** oblast a elektroni iz **n** oblasti u **p** oblast). Usled rekombinacije izmedju šupljina i elektrona može pri odredjenim uslovima da nastane svetlosno zračenje-fotoni. LED diode i fotodiode se najčešće prave od galijum arsenida (GaAs).



LED symbol

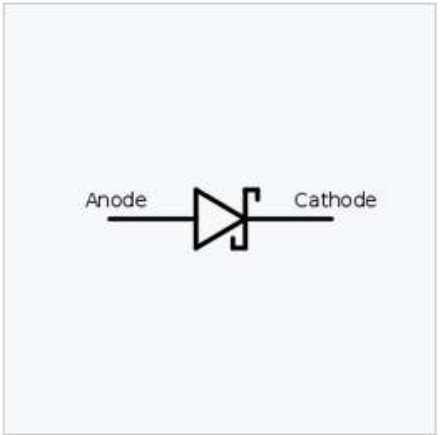
- **Optoizolator** se dobija kombinovanjem fotodiode i LED diode. LED diodom se konvertuje električni signal u svetlost, a foto diodom se konvetuje svetlost u električni signal. Optoizolator se koristi kada je potrebno ostvariti potpunu električnu izolaciju između dva elektronska kola.



Diode
Opto-isolator

Specijalni tipovi dioda

- **Šotki diode** (Shottkey dioda) predstavljaju spoj metala i poluprovodnika n tipa. Ovaj spoj se ponaša kao dioda pri čemu je metal anoda a poluprovodnik katoda. Za razliku od klasične diode kod ove diode su nosioci naelektrisanja samo elektroni. Najznačajnije prednosti šotki diode su:
  - Mnogo brže menja režim rada od obične diode zahvaljujući činjenici da postoji samo jedan tip nosilaca naelektrisanja i nema efekta gomilanja sporednih nosilaca naelektrisanja. Zahvaljujući ovom svojstvu nalaze primenu u prekidačkim izvorima napajanja i digitalnim prekidačkim kolima.
  - Prag provođenja Šotki diode je manji u odnosu na klasičnu silicijumsku diodu i iznosi između 0,3 i 0,4 V.



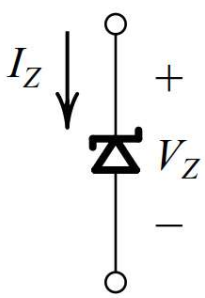
Šotki dioda

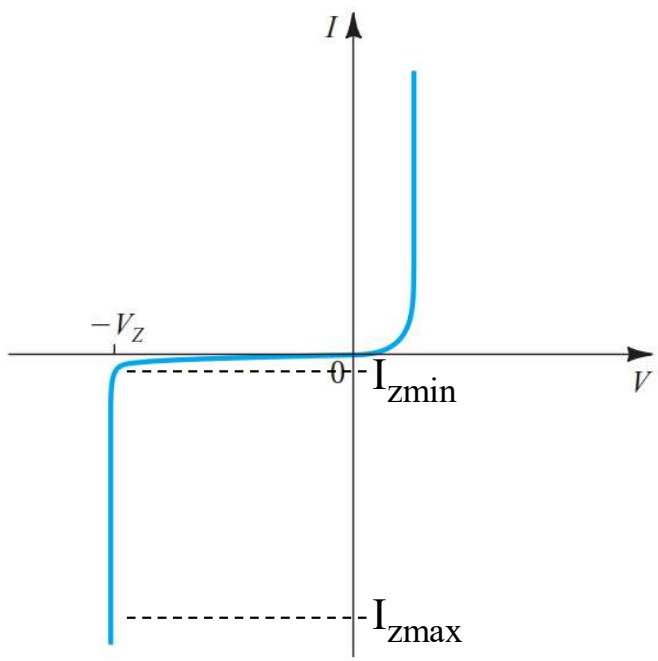
- **Varikap diode** su komponente koje se koriste kao naponom kontrolisane kapacitivnosti. Rad Varikap dioda zasniva se na činjenici da kapacitivnost prostornog naelektrisnja pn spoja zavisna od napona inverzne polarizacije. Radna oblast ove diode je inverzna polarizacija jer tada ekvivalentna impedansa komponente približno jednaka kapacitivnosti prostornog naelektrisanja.

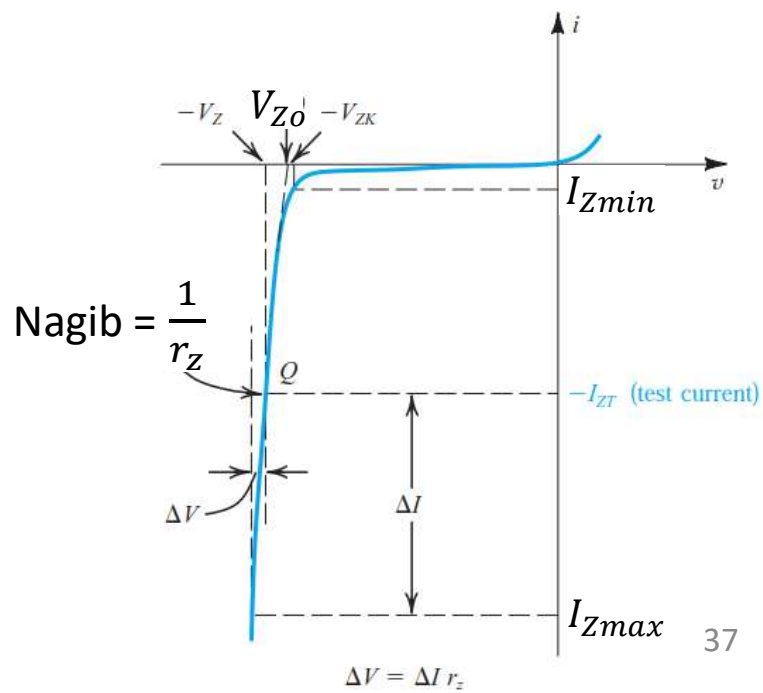
Varikap dioda

Diode referentnog napona se koriste za obezbeđivanje konstantnog napona u kolu ili na potrošaču. Da bi ispunile ovu funkciju njihova strujno naponska karakteristika treba da bude što strmija u radnoj obalsti.

Diode refrentnog napona rade u oblasti proboja. **Cenerova dioda** primenjuje Cenerov proboj koji nastaje na p-n spoju kada je velika koncentracija primesa. Probojni napon cener diode je znatno manji u odnosu na standardnu diodu. Radna oblast ove diode je defnisana opsegom struja $I_{Zmin}<I_Z<I_{Zmax}$. Minimalna vrednost struje u radnoj oblasti, I_{Zmin}, zavisi od karakteristike diode i odgovara struji pri naponu pri kome počinje proboj. Maksimalna vrednost struje u opsegu regulacije, I_{Zmax} odredjena je maksimalnom disipacijom na zener diodi ($P_{Dmax} = I_{Zmax}V_Z$).



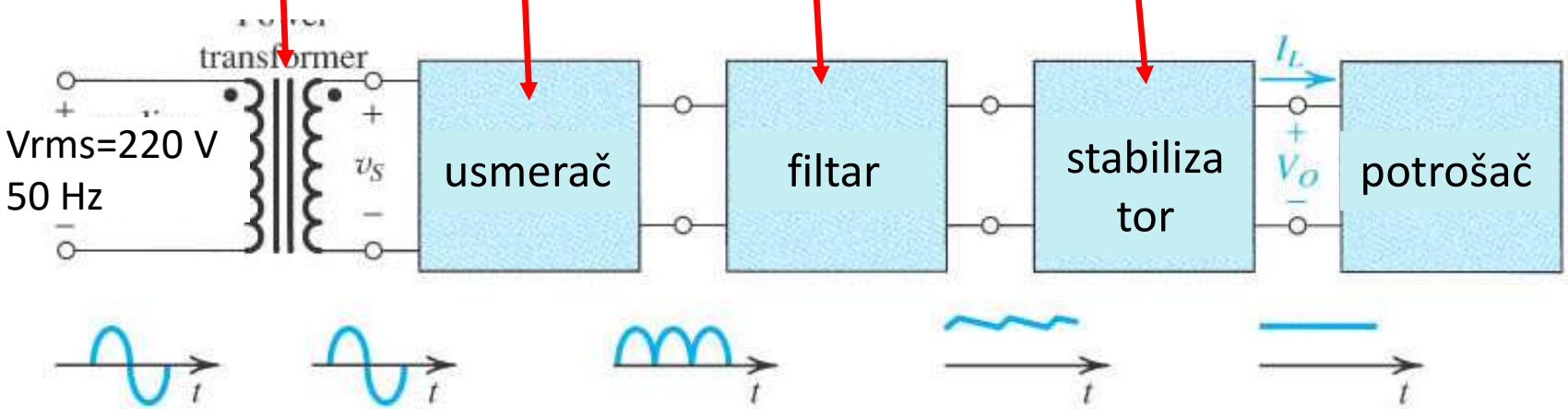




Izvori jednosmernog napajanja

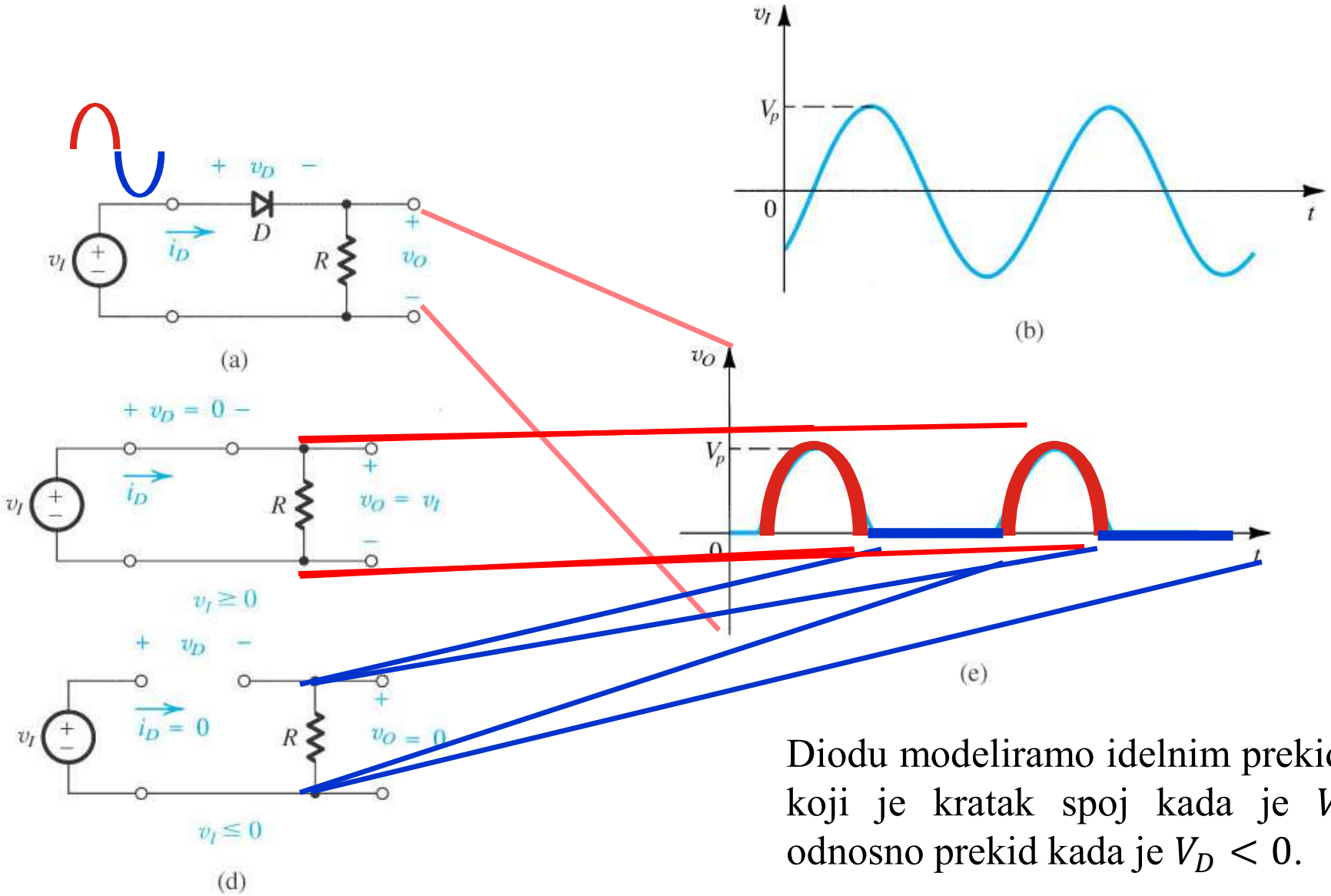
Da bi se od mrežnog napona dobio jednosmerni, željene vrednosti, potrebno je:

1. Smanjiti njegovu vrednost (transformator)
2. Usmeriti ga ili napraviti jednosmerni napon (usmerač)
3. Filtrirati ili ukloniti promenjivu komponentu (filter)
4. Stabilisati ga ili učiniti nezavisnim od promena uslova rada (stabilizator)



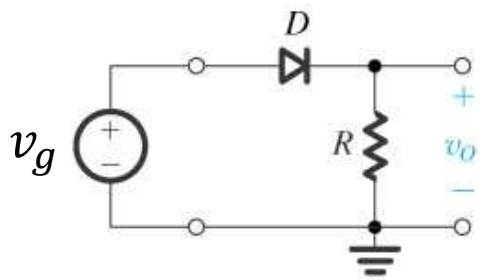
Usmeravanje naizmeničnog napona

Usmeravanjem se od naizmeničnog napona pravi jednosmerni. Kola koja imaju ovu sposobnost nazivaju se *usmerači*. Zasnovani su na primeni dioda zbog njihove osobine da provode struju samo u jednom smeru.



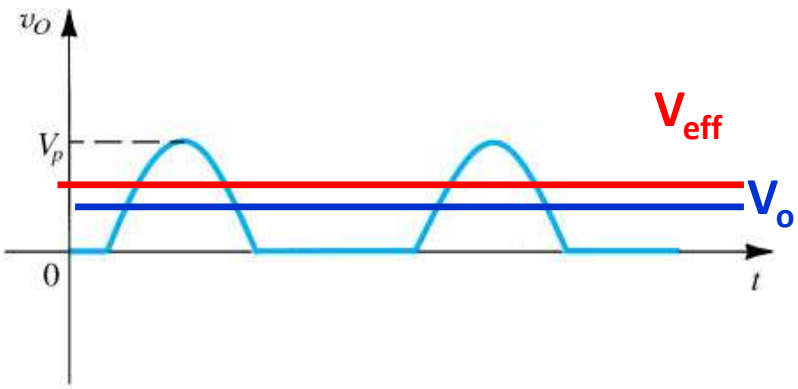
Diodu modeliramo idelnim prekidačem , koji je kratak spoj kada je $V_D > 0$, odnosno prekid kada je $V_D < 0$.

Jednostrano usmeravanje



$$v_g = V_m \sin(\omega t)$$

$$v_o = \begin{cases} V_m \sin(\omega t) & \sin(\omega t) > 0 \\ 0 & \sin(\omega t) < 0 \end{cases}$$



Na izlazu usmerača dobija se pulsirajući jednosmerni napon. Srednja vrednost ovog pulsirajućeg napona je **jednosmerni izlazni napon, Vo**.

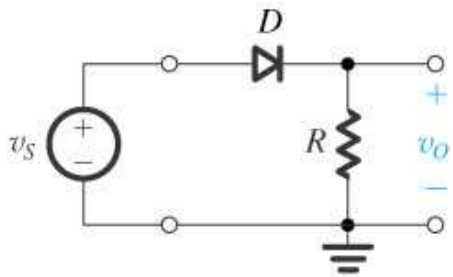
$$V_o = \frac{1}{T}\int_0^{T/2} V_m \cdot sin(\omega t)dt = \frac{1}{\omega T}\int_0^{\pi} V_m \cdot sin(\theta)d\theta$$

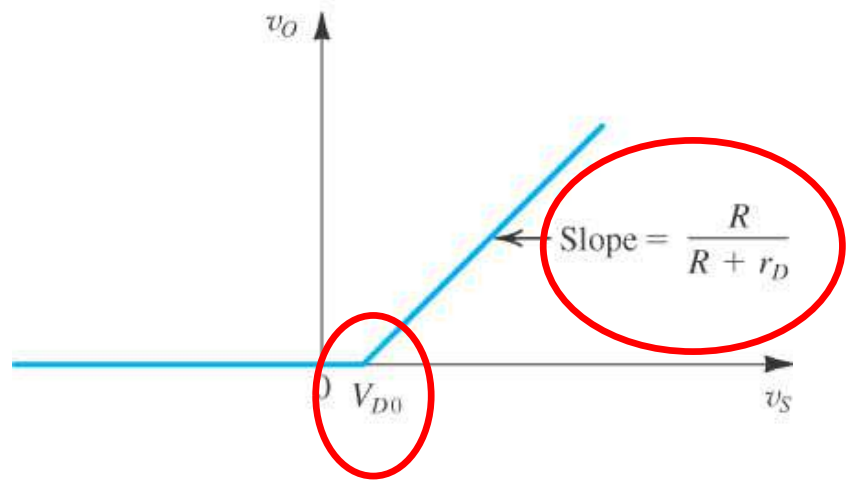
$$V_o = \frac{V_m}{2\pi}\int_0^{\pi} sin(\Theta)d\Theta = \frac{1}{2\pi}V_m \cdot (-\cos(\pi) + \cos(0)) = \frac{V_m}{\pi}$$

$$\boxed{V_o = \frac{V_m}{\pi}}$$

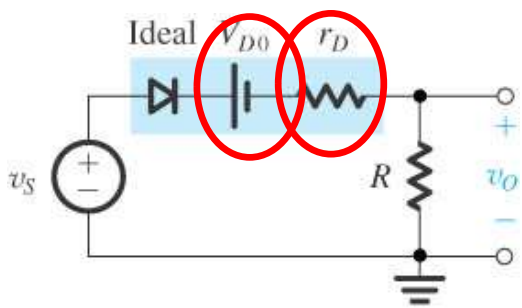
Jednostrano usmeravanje

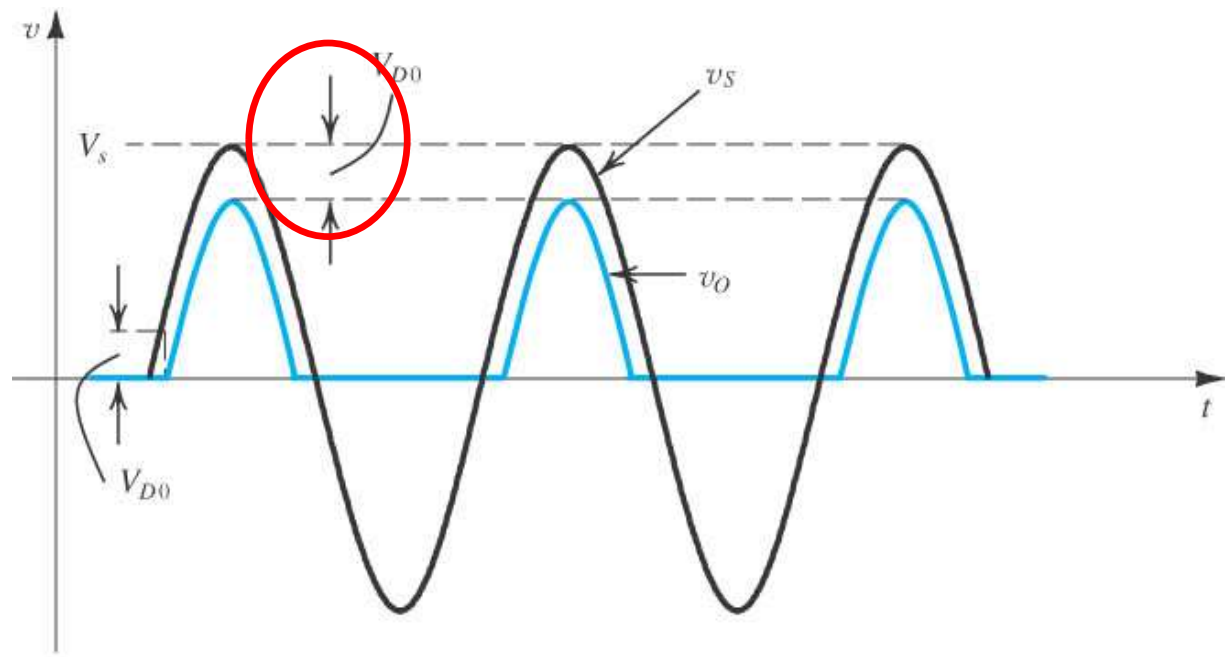
Da bi se uradila preciznija analiza usmerača potrebno je koristiti tačniji model diode. Izlazni napon je umanjen za pad napona na diodi. Ova pojava dolazi do izražaja kada je amplituda ulaznog napona V_m mala.





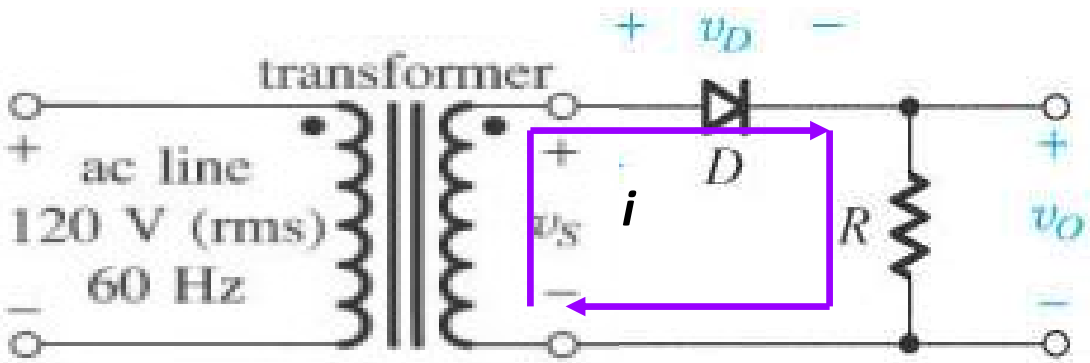
Linearni model realne diode



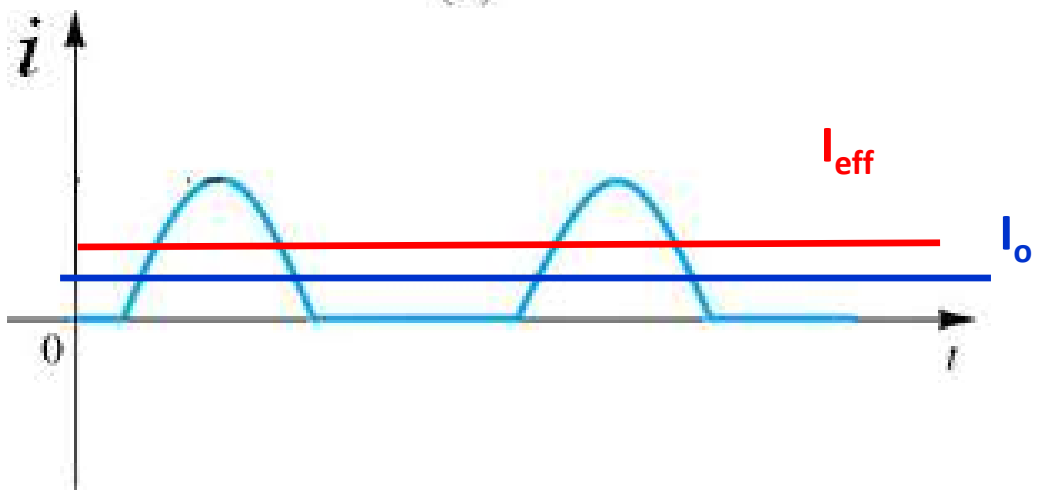


Jednostrano usmeravanje

Kroz sekundar transformatora protiče i jednosmerna struja, čime se kvare performanse transformatora usled pojave premagnjećenja jezgra

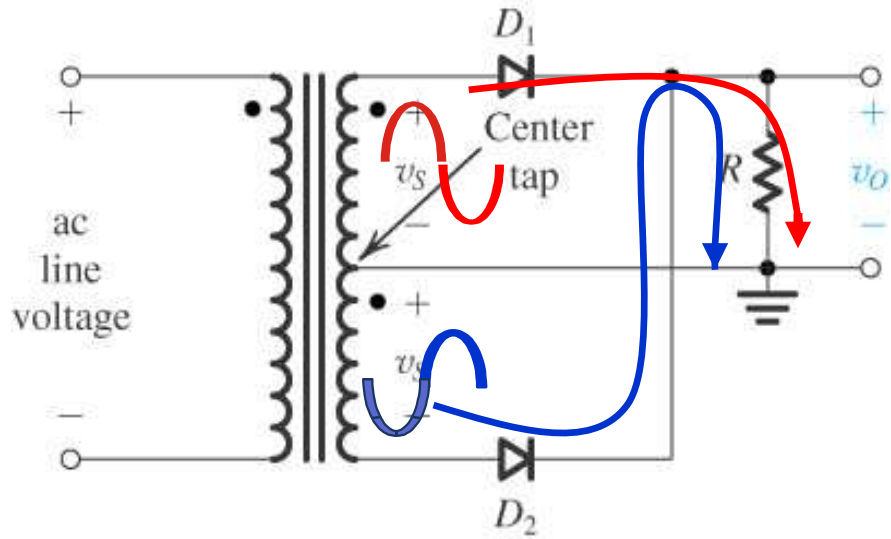


(a)



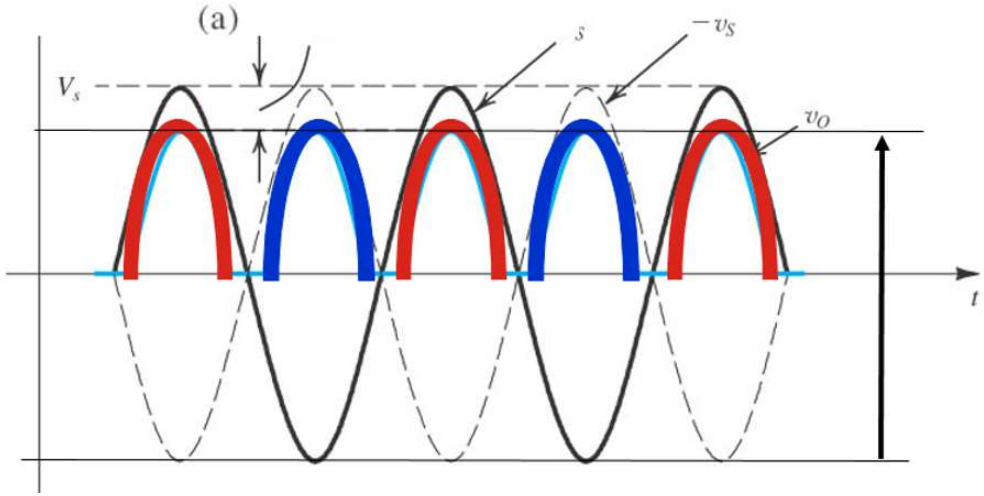
Dvostrani usmerač

Sekundar mrežnog transformatora se može motati tako da se sastoji od dva identična namotaja. **Srednja tačka namotaja** koja spaja dva identična namotaja se obično vezuje za masu. Naponi na krajevima sekudara transformatora su u svakom trenutku iste amplitude a suprotne faze.

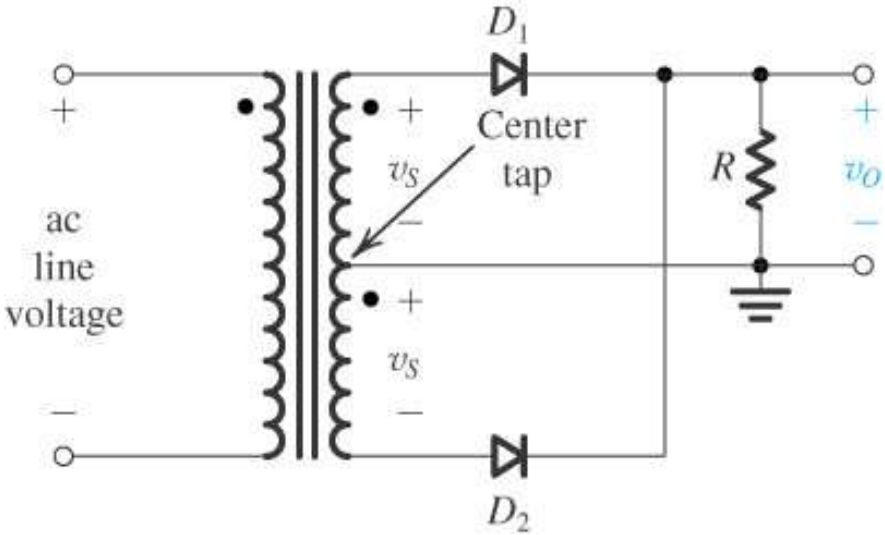


(a)

Efekat je kao da smo spoji dva jednostrana usmerača. Svaka od dve diode provodi jednu poluperiodu signala, D_1 pozitivnu a druga D_2 negativnu.



Dvostrano usmeravanje



$$v_i = V_\mathbf{m}\mathbf{sin}(\boldsymbol{\omega} t)$$

$$v_\mathbf{o} = \begin{cases} V_\mathbf{m}\mathbf{sin}(\boldsymbol{\omega} t) & \mathbf{sin}(\boldsymbol{\omega} t) > 0 \\ -V_\mathbf{m}\mathbf{sin}(\boldsymbol{\omega} t) & \mathbf{sin}(\boldsymbol{\omega} t) < 0 \end{cases}$$

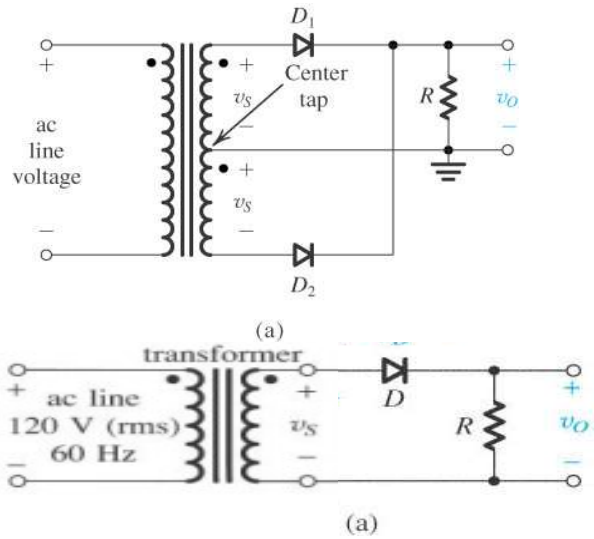
$$V_o = \frac{2}{T}\int_{\mathbf{0}}^{T/2} V_m \cdot sin(\boldsymbol{\omega} t)dt - \frac{2}{T}\int_{T/2}^{T} V_m \cdot sin(\boldsymbol{\omega} t)dt$$

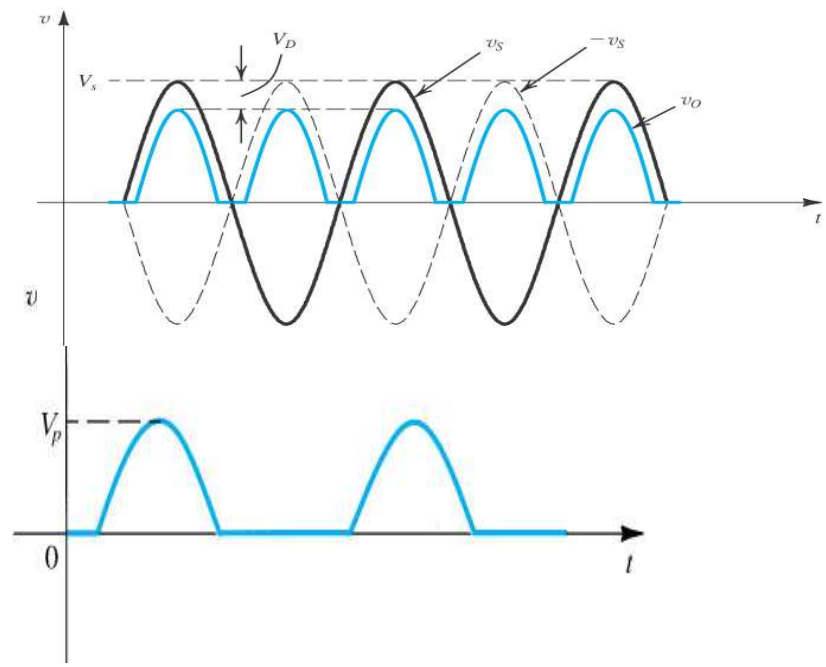
$$V_o = \frac{V_m}{2\pi}\int_{\mathbf{0}}^{\boldsymbol{\pi}} sin(\Theta)d\Theta - \frac{V_m}{2\pi}\int_{\pi}^{2\boldsymbol{\pi}} sin(\Theta)d\Theta = \frac{V_m}{\pi} + \frac{V_m}{\pi} = \frac{2 \cdot V_m}{\pi}$$

Jednosmerna komponenta napona u dvostranom usmeraču je:

$$\boxed{V_o = \frac{2 \cdot V_m}{\pi}}$$

Poređenje dvostranog i jednostranog usmerača





Prednosti i nedostaci dvostranog u odnosu na jednostrani usmerač:

+ Ukupna jednosmerna komponenta udvostručena

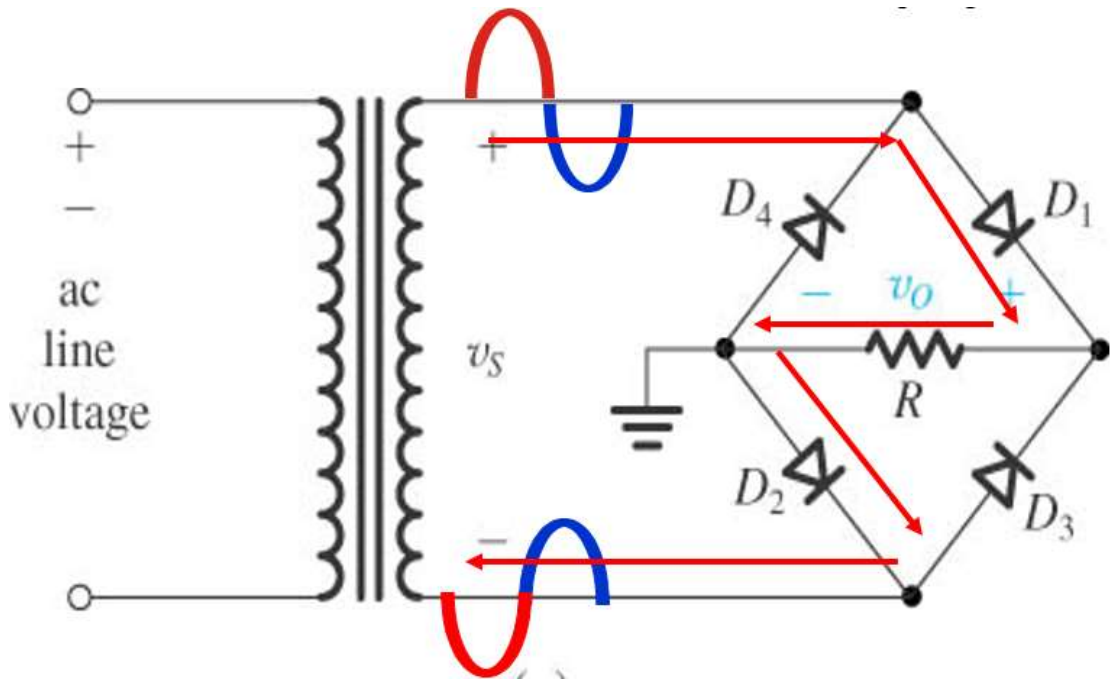
+ Na potrošaču su samo parni harmonici napona (manja izobličenja)

+ Kroz sekundar ne protiče jednosmerna komponenta struje

- Sekundar mora da ima simetrični izlaz
- Najveći inverzni napon na diodi je $\approx 2V_m$ (dvostruka amplitude ulaznog napona) što je duplo veća vrednost u odnosu na jednostrani usmerač.

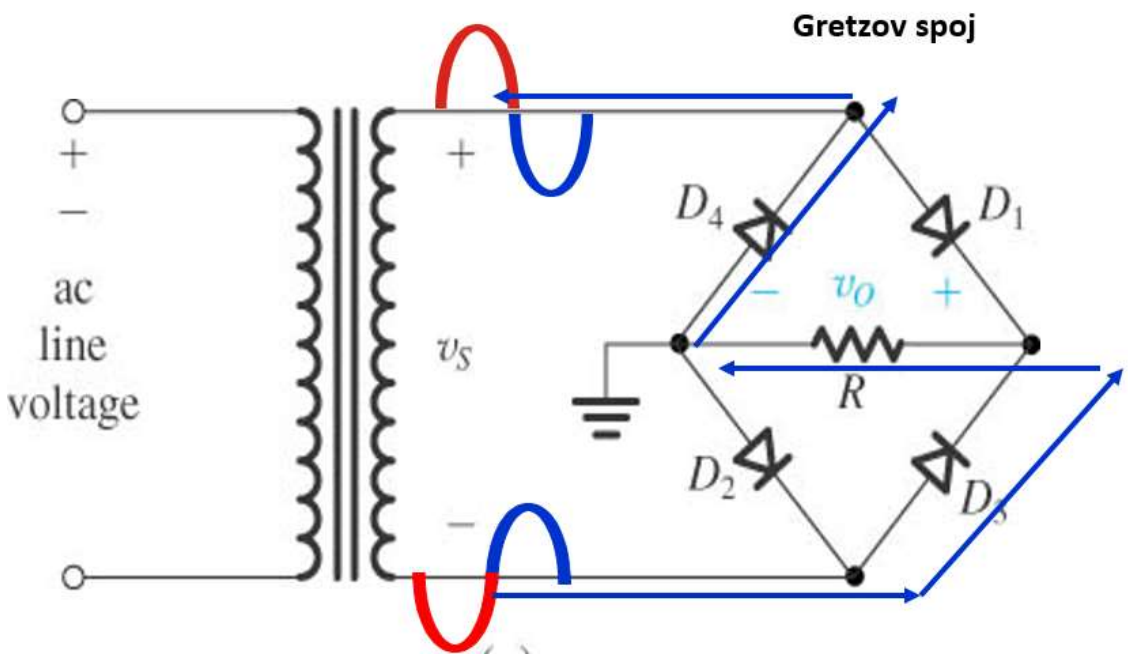
Grecov spoj (Gretz)

Mostni ispravljač funkcioniše na takav način da dve od četiri diode u mostu vode istovremeno. Tokom pozitivne poluperiode diode D1 i D2 su direktno polarisane dok su diode D3 i D4 inverzno polarisane i ne vode. U tom slučaju struja protiče od gornjeg kraja sekundara preko D1, R, D2 do donjeg kraja sekundara.

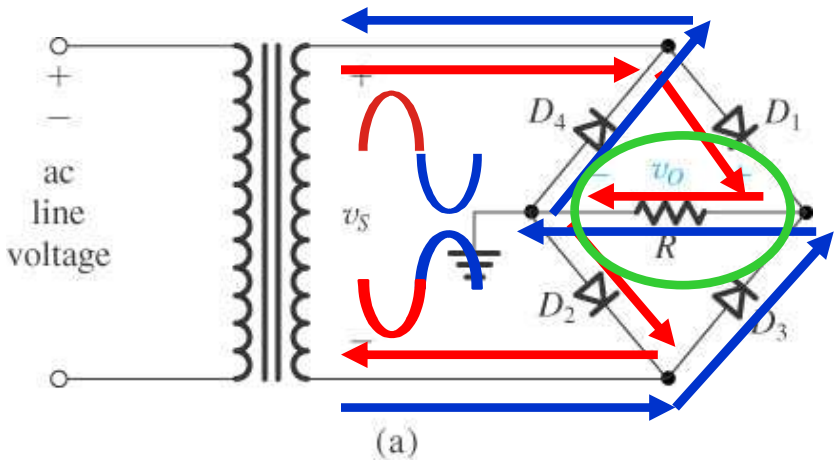


Grecov spoj (Gretz)

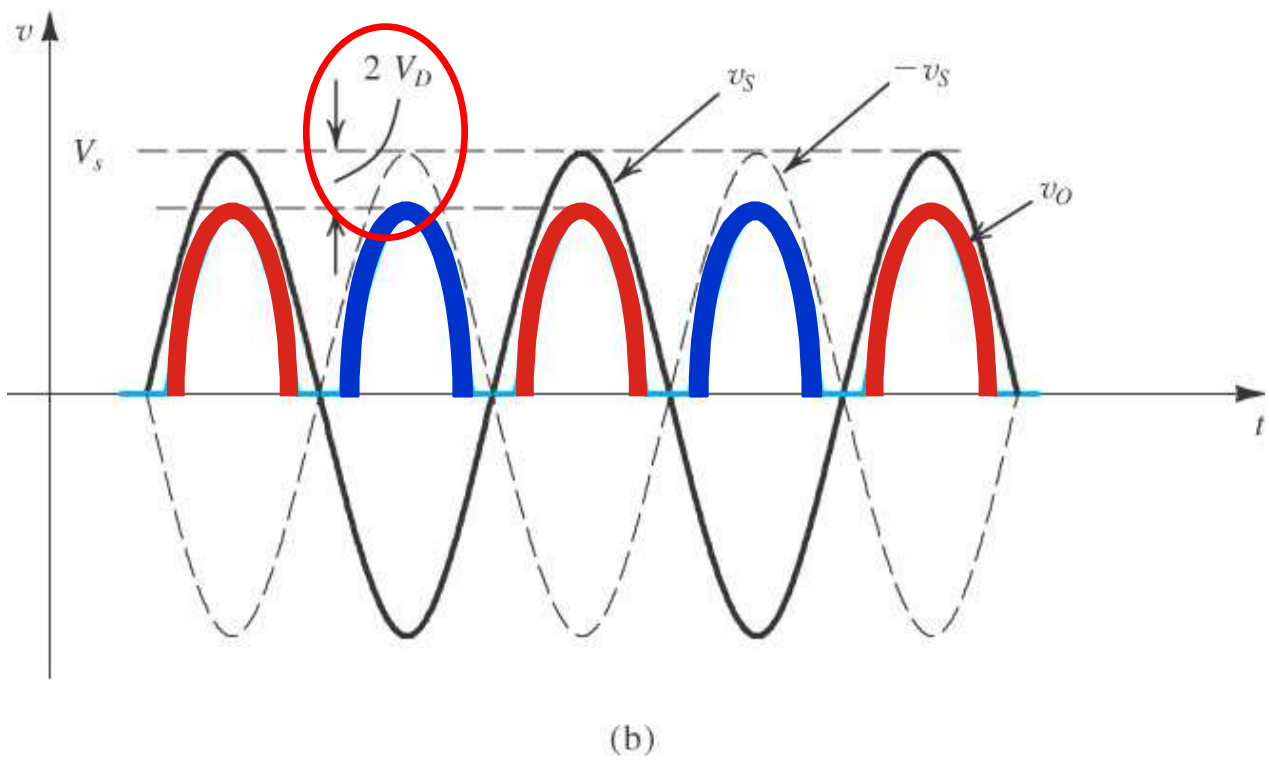
U toku sledeće poluperiode polaritet napona na transformatoru biće suprotan (označen plavom bojom). Tada će D3 i D4 biti direktno polarisane a diode D1 i D2 inverzno polarisane. Sada struja teče od donjeg kraja seknudara preko D3, R i D4 do gornjeg kraja sekudara.



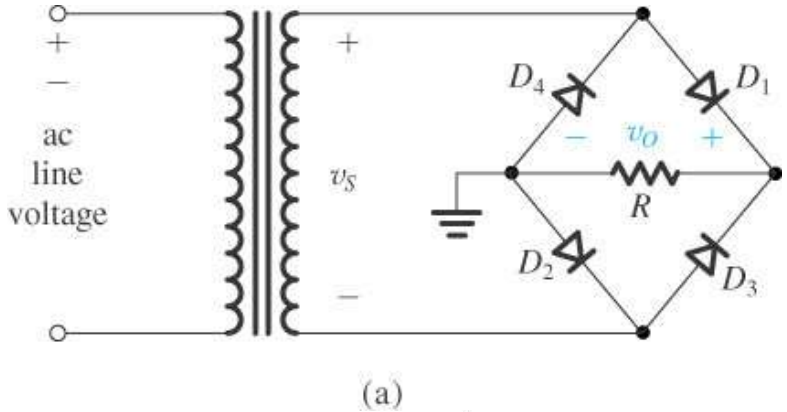
Dvostrano usmeravanje



Gretzov spoj

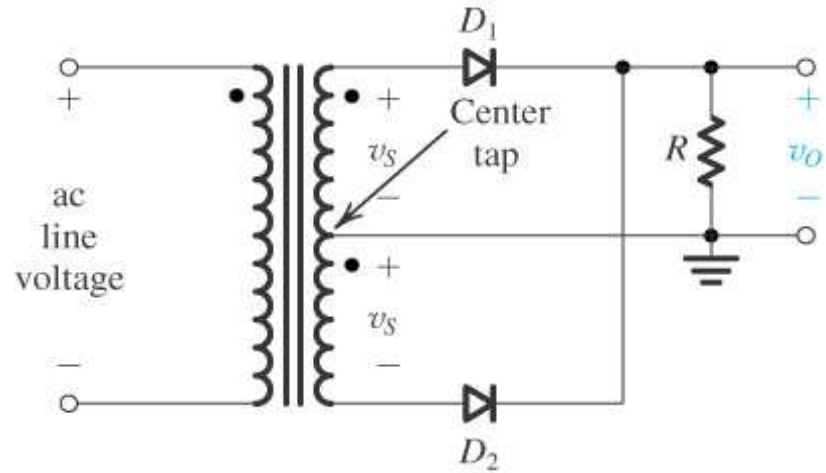


Dvostrano usmeravanje

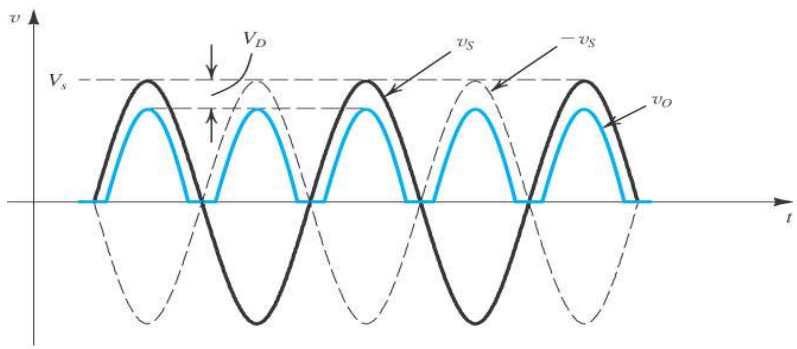


(a)

v.s.



(a)



(c)

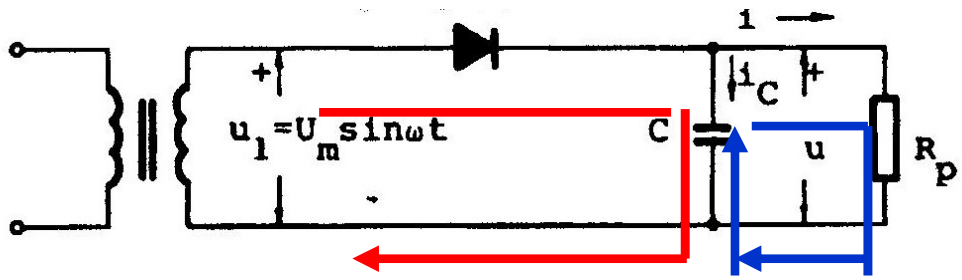
Prednost mostnog ispravljača u odnosu na običan dvostrani usmerač:

+ Sekundar NE mora da ima simetrični izlaz

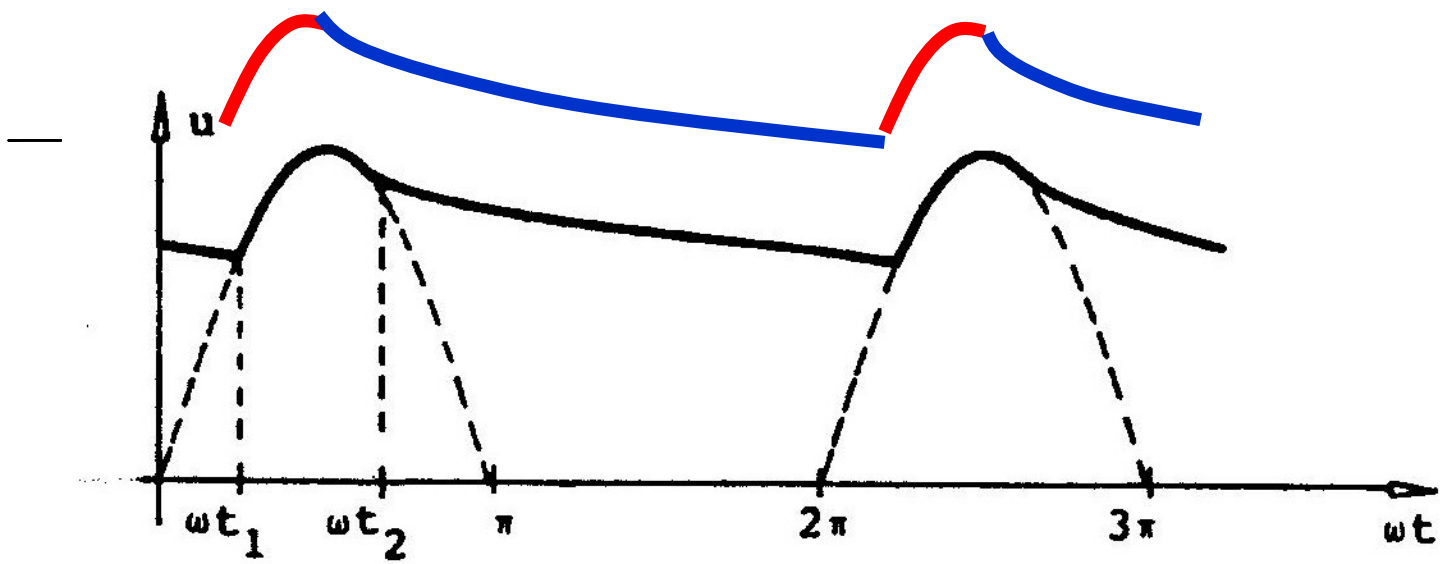
+ Najveći inverzni napon na diodi je V_m a ne 2 V_m !!!

Filtriranje usmerenog napona

Kapacitivni filtar

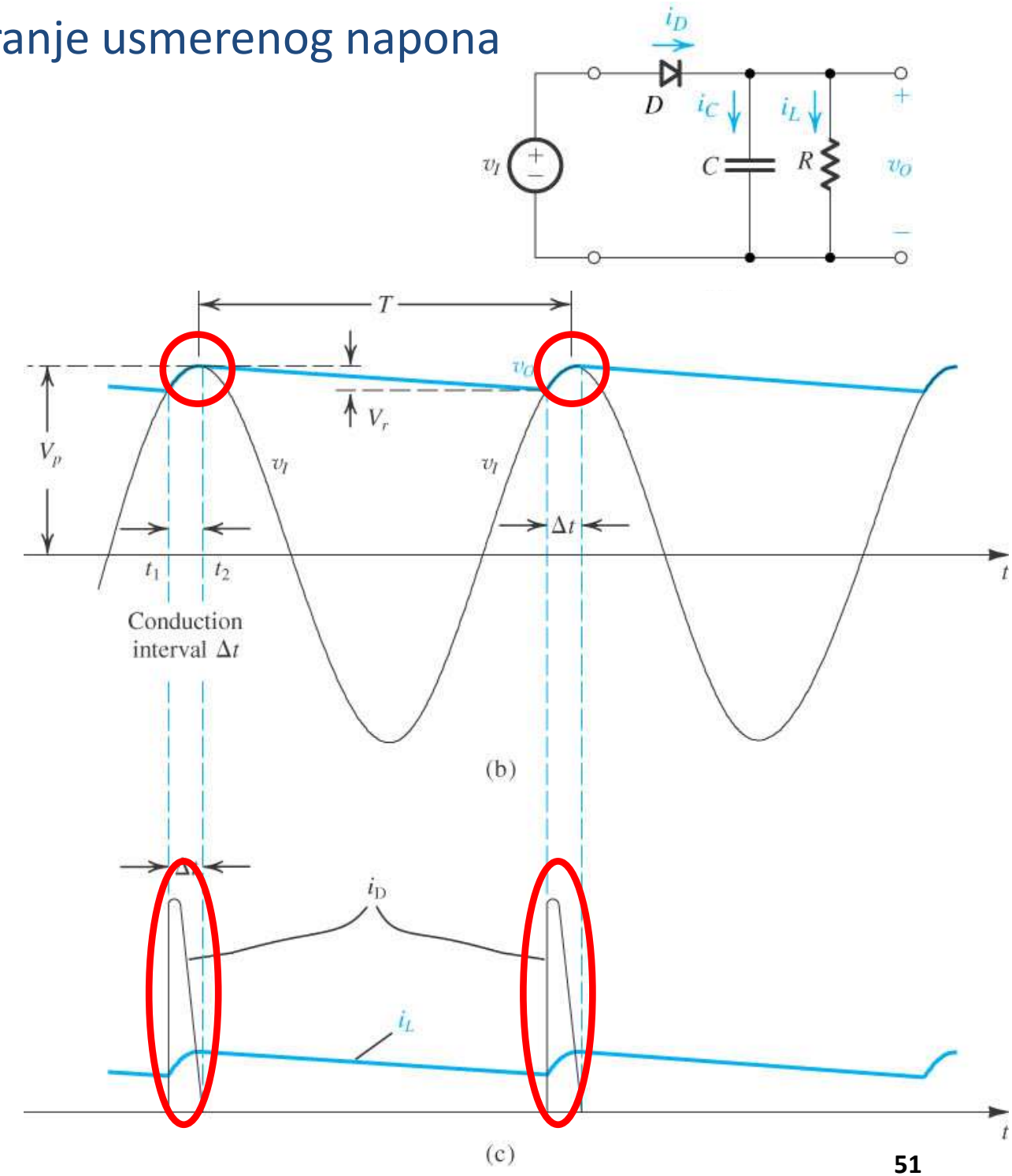


Najjednostavniji kapacitivni filtar je kondenzator vezan paralelno sa potrošačem. Dioda funkcioniše kao prekidač preko kojeg se puni kondenzator. Ukoliko je napon na transformatoru veći od trenutnog napona na kondenzatoru dioda provodi i predstavlja zatvoreni prekidač. Tokom intevala kada je napon na kondenzatoru veći od napona na transformatoru dioda ne vodi odnoso predstavlja otvoreni prekidač (plava linija). U suprotnom kada je napon na kondenzatoru manji dioda vodi (crvena linija).



Kapacitivni filtar

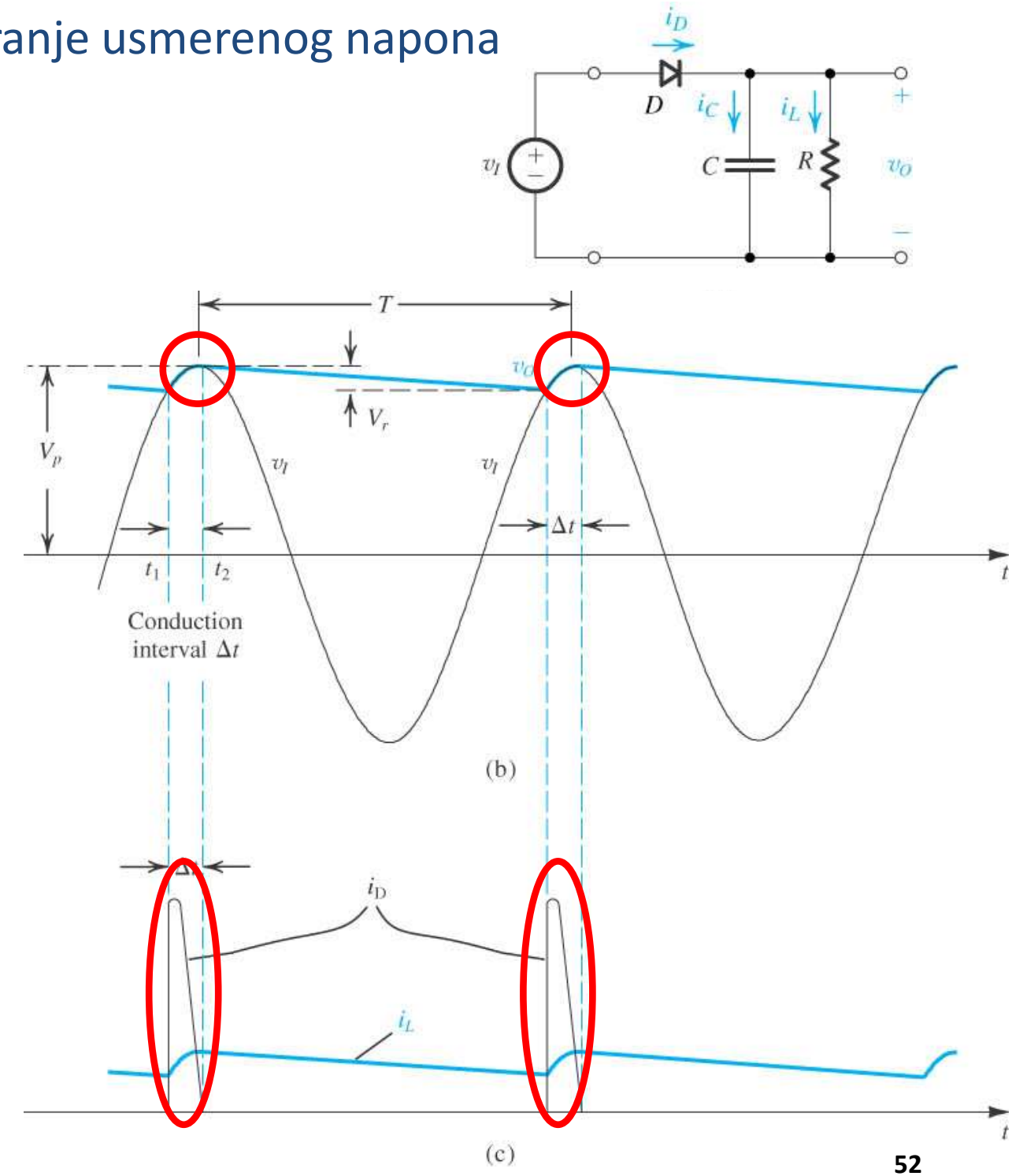
Dioda vodi samo u kratkom intervalu kada je anoda na višem potencijalu od katode (zaokruženo crvenom linijom). Funkcionisanje kola se zasniva na činjenici da je vremeska konstanta punjenja kondenzatora ($\tau_2 = C \cdot r_d$) mnogo manja od vremenske konstantne pražnjenja ($\tau_2 = C \cdot R$). r_d je otpornost direktno polarisane diode, koja je mnogo manja od otpornosti otpornika R. Kao posledica toga vremenski intervali punjenja biće mnogo kraći od vremenskog intervala pražnjenja.



Kapacitivni filtar

Interval vremena tokom koga se kondenzator puni predstavlja isečak sinusnog signala (zaokružen crvenim krugom).

Sa druge strane period vremena tokom koga se kondenzator prazni je eksponenecijalna funkcija (karakteristična za RC kola).



Filtriranje usmerenog napona

Vremenska zavisnost izlaznog napona tokom vremenskog intervala u kom dioda ne vodi odgovara vremenskoj zavisnosti napona RC kola:

$$V_{out}(t) = V_m \cdot e^{-\frac{t}{R_p C}}$$

Ukoliko se primeni razvoj eksponencijalne funkcije u Tajlorovom razvoju:

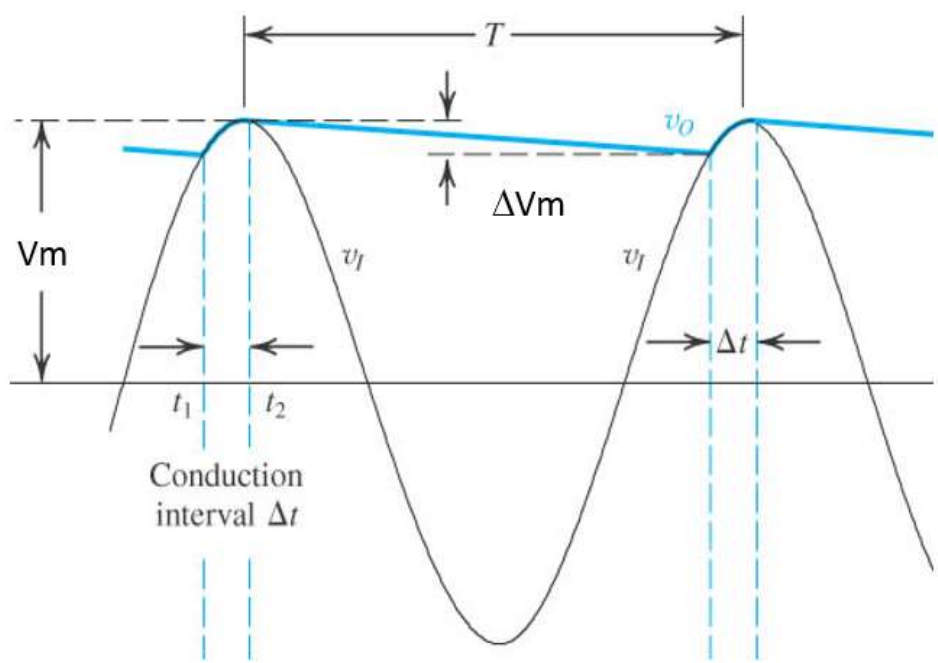
$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \ldots$$

i zanemare sabirci čiji je stepen veći od jedan dobija se:

$$V_{out}(t) \approx V_m \cdot \left(1 - \frac{t}{R_p C}\right)$$

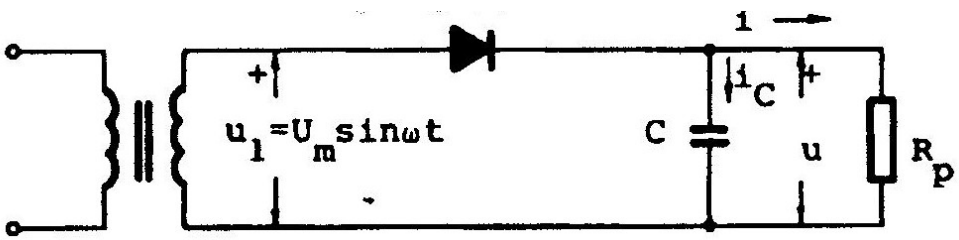
Minimalni napon na kondenzatoru biće u trenutku T-Δt:

$$V_{\min} \approx V_m \cdot \left(1 - \frac{T - \Delta t}{R_p C}\right)$$



Filtriranje usmerenog napona

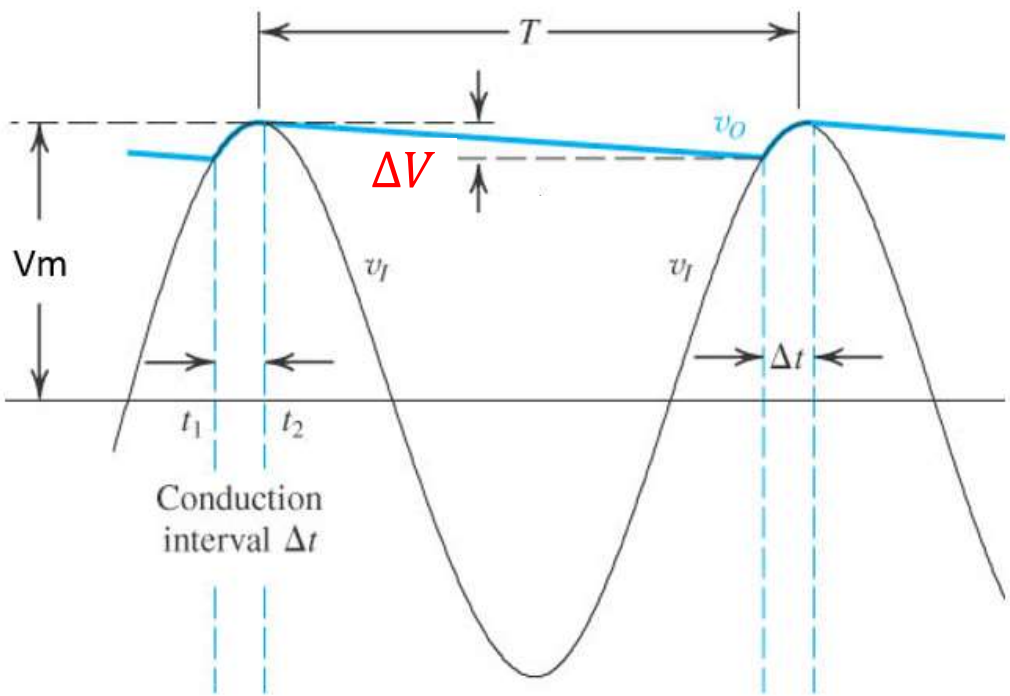
Razlika između masimalnog i minimalnog napona na kondenzatoru naziva se **talasnost filtra (ripple)**.



$$\Delta V \approx V_m - V_{\min}$$

$$\Delta V \approx \frac{V_m \cdot (T - \Delta t)}{R_p \cdot C}$$

$$\Delta t << T \Rightarrow \Delta V \approx \frac{V_m \cdot T}{R_p \cdot C}$$

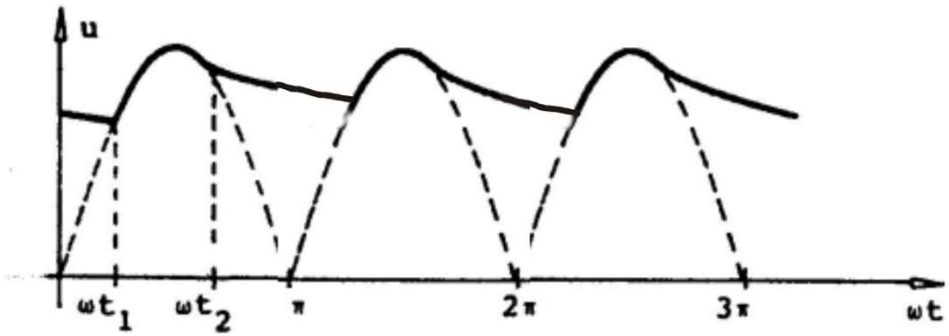


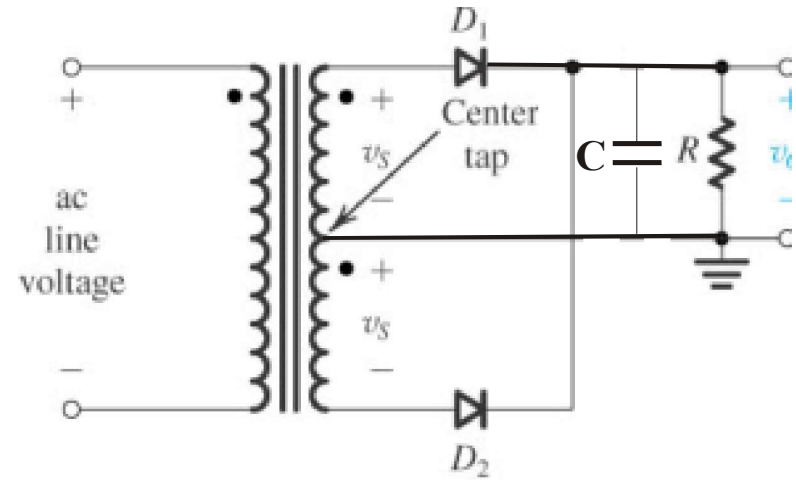
Δt je period vremena u toku koga dioda vodi

$$\boxed{\Delta V \approx \frac{V_m}{R_p \cdot C \cdot f}}$$

Talasnost filtra, ΔV, je obrnuto srazmerna kapacitivnosti kondenzatora i otpornosti potrošača.

Kapacitivni filtar – dvostrano





Frekvencija napona na izlazu dvostranog usmerača je dvostruko veća od frekevencije mrežnog napona.

$$\Delta V \approx \frac{V_m}{R_p \cdot C \cdot 2 \cdot f}$$

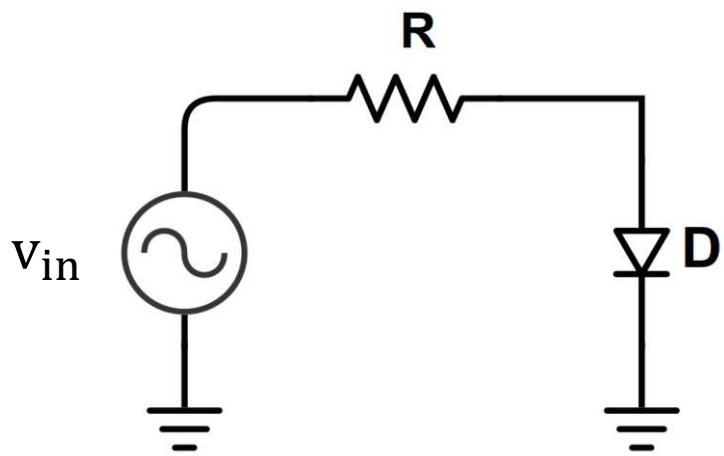
f je frekvencija mrežnog napona, 50 Hz.

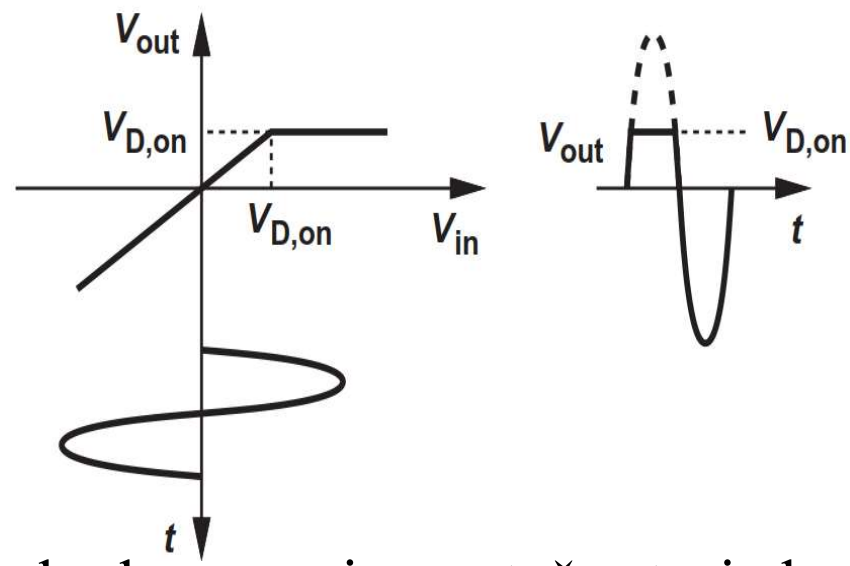
Talasnost je dva puta manja za iste vrednosti C i R. To praktično znači da je za istu vrednost talasnosti moguće upotrebiti kondenzator dvostruko manje kapacitivnosti.

Limiteri – ograničavači napona

Limiter je kolo kojim se ograničva maksimalna vrednost napona na izlazu. Ovo kolo propušta bez slabljenja sve signale čija je vrednost napona manja od zadate vrednosti. Koriste se kada postoji mogućnost da prevelika vrednost ulaznog signala promeni radnu tačku pojačavača kao i kod oscilatora. Limiteri se često realizuju diodama zbog njenih prekidačkih svojstava i zato što za razliku od tranzistora ne unose dodatna izobličenja.

$$v_{out} = \begin{cases} v_{in} & za \quad v_{in} < V_D \\ V_D & za \quad v_{in} > V_D \end{cases}$$

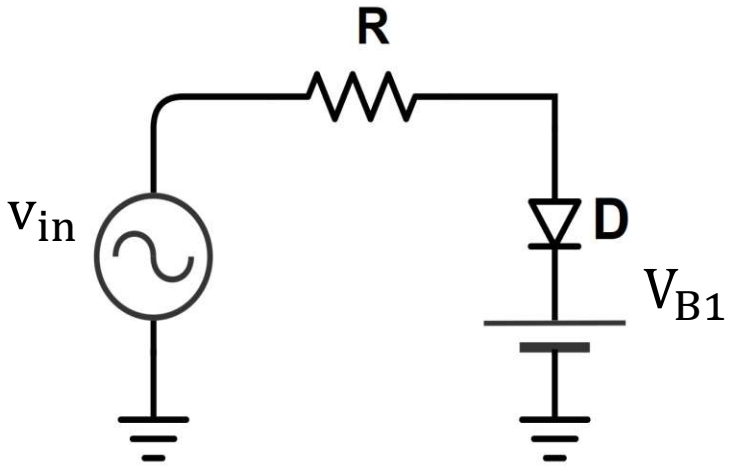


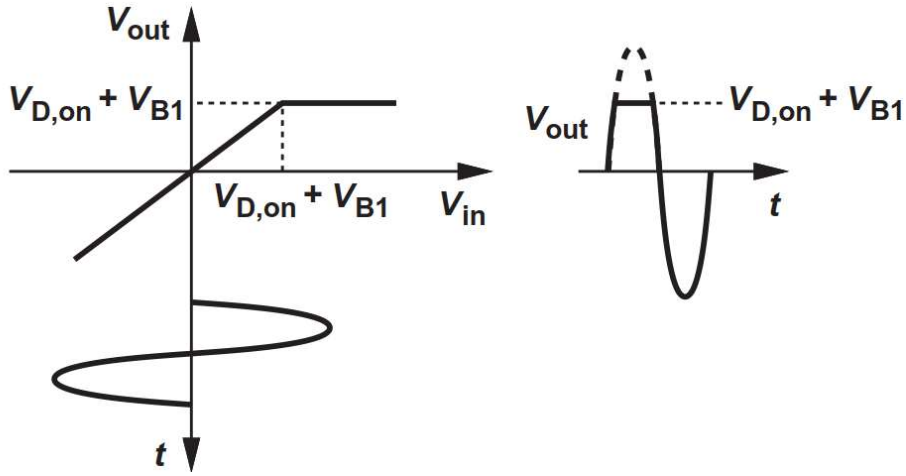


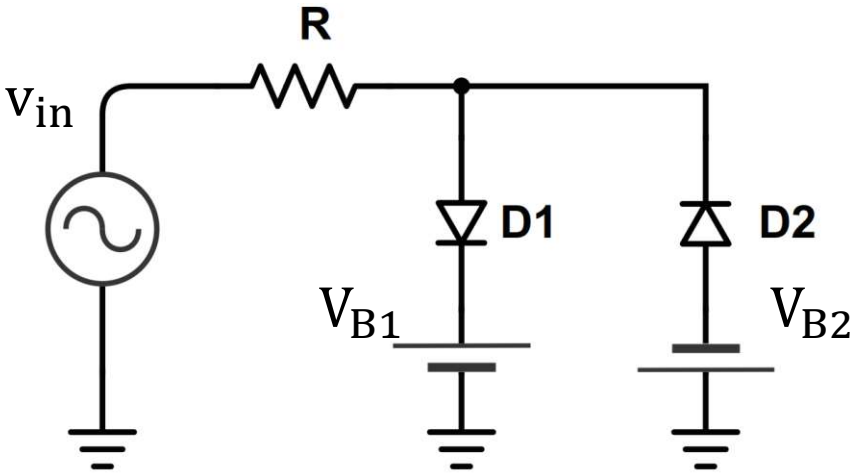
Kada dioda ne vodi izlazni napon je jednak ulaznom, jer ne teče struja kroz otpornik. Kada dioda provede izlazni napon je jednak naponu direktno polarisane diode.

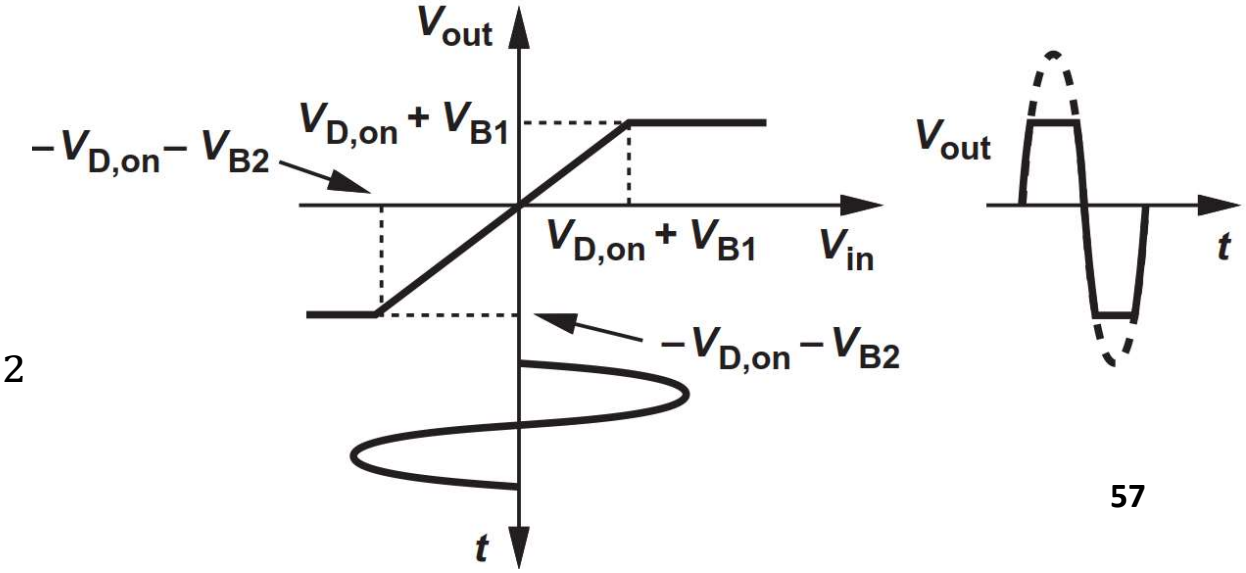
Dodavanjem jednosmernog naponskog generatora na red sa diodom dobija se limiter sa proizvoljnim ograničavajućim naponom. Na slikama su prikazane prenosne karakteristike kola ($V_{out} = f(V_{in})$ i talasni oblici napona.

$$v_{out} = \begin{cases} v_{in} & za \quad v_{in} < V_D + V_{B1} \\ V_D + V_{B1} & za \quad v_{in} > V_D + V_{B1} \end{cases}$$



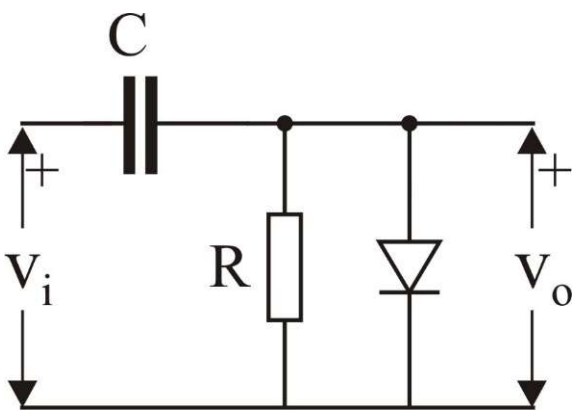


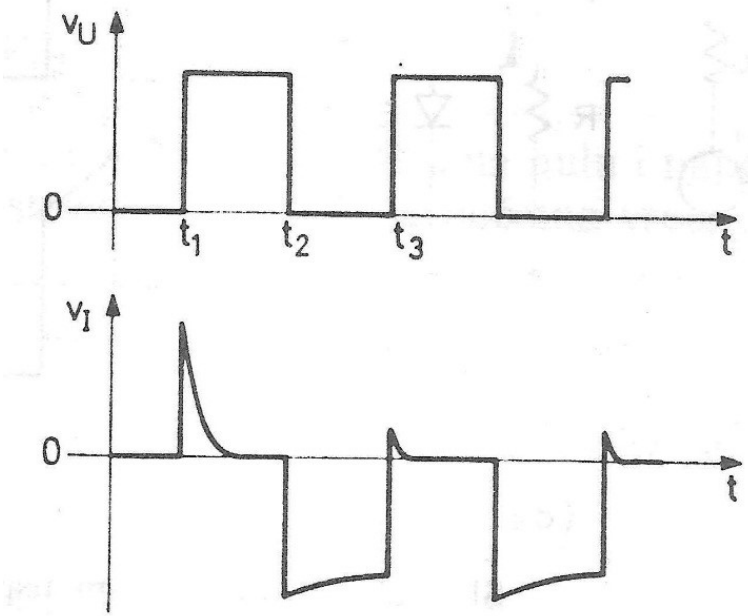




Uspostavljači nivoa (clamper)

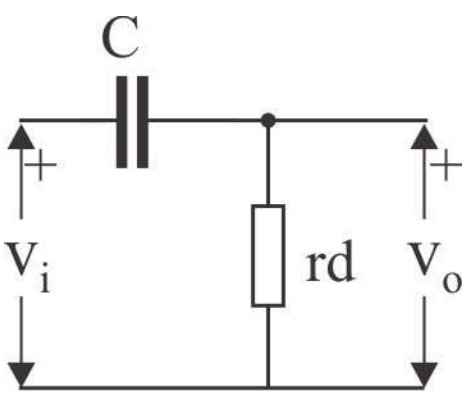
Ova kola se koriste za obradu periodičnih signala. Njima se ne menja oblik signala već samo jednosmerna komponenta signala. Osnovni pricip rada zasniva se na različitoj vrednosti vremenske konstante u toku procesa punjenja i procesa pražnjenja kapacitivnosti. Nakon nekoliko perioda signala kondenzator se napuni i vrednost napona na njemu se nadalje vrlo malo menja. Praktično se kondenzator tada ponaša kao baterija.

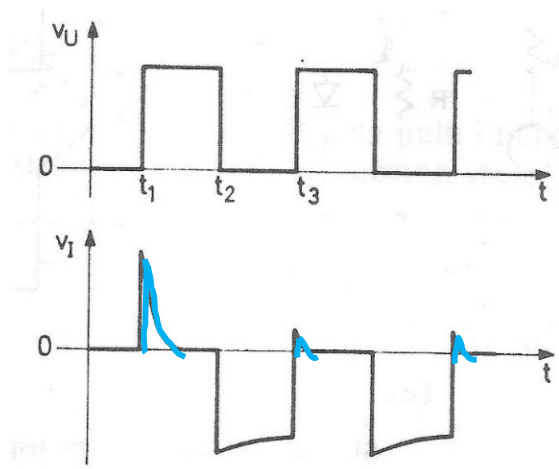




Uspostavljači nivoa (clamper)

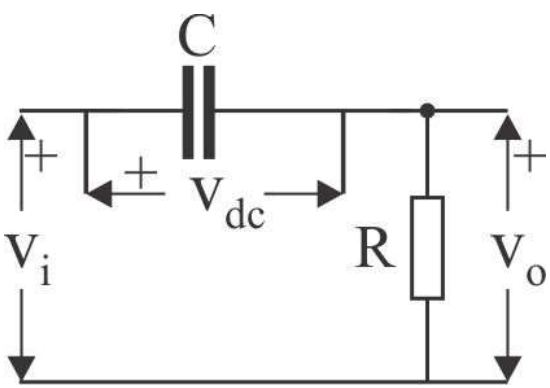
- Nakon završetka prelaznog režima naizmenično se ponavljaju vremenski interval u toku koga se kondenzator puni i vremenski interval u toku koga se kondenzator prazni. Pri tome se u toku intervala punjenja povećava napon na kondenzatoru za isti iznos za koji se smanji napon na kondenzatoru tokom perioda pražnjenja.
- Kada je ispunjeno $V_i > V_o + V_C$ dioda vodi i konenzator se puni, odnosno povećava se napon na kondenzatoru. Vremenska konstanta punjenja kondenzatora je mala i iznosi: $\tau_1 = C \cdot (r_D || R) \approx C \cdot r_D$
  r_D je otpornost direktno polarisane dioda i ona je veoma mala i možemo smatrati da važi $R \gg r_D \quad \Rightarrow \quad r_D || R \approx r_D$. Vremenska konstantna je veoma mala pa je i brzina punjenja kondenzatora velika a period punjenja kratko traje.

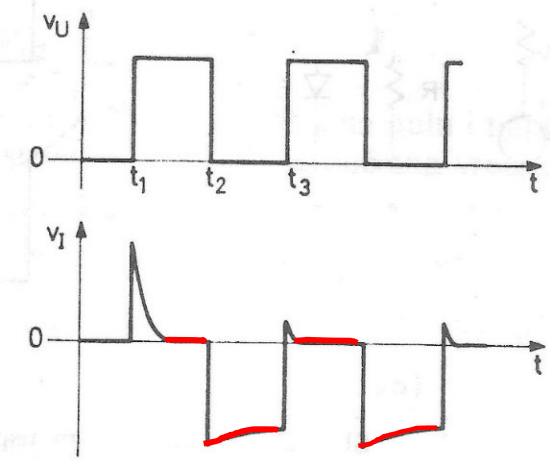




Uspostavljači nivoa (clamper)

- Vremenski intervali u toku kojih se kondenzator prazni se periodično ponavljaju i traju sve dok je ispunjeno $V_i < V_{dc} + V_o$. Brzina kojom se kondenzator prazni zavisi od vremenske konstante pražnjenja koja iznosi $\tau_2 = C \cdot R$. S obzirom da je $R \gg r_d$ sledi da je vremenska konstanta pržnjenja mnogo veća od vremenske konstante punjenja. Ukoliko je vremenska konstanta pražnjenja znano veća od periode signala promene napona tokom intervala pražnjenja su zanemarive.

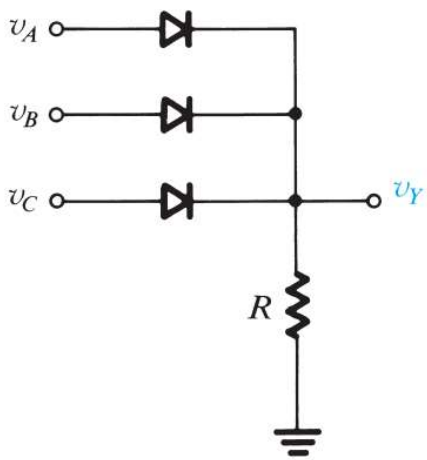




Logička kola sa diodama

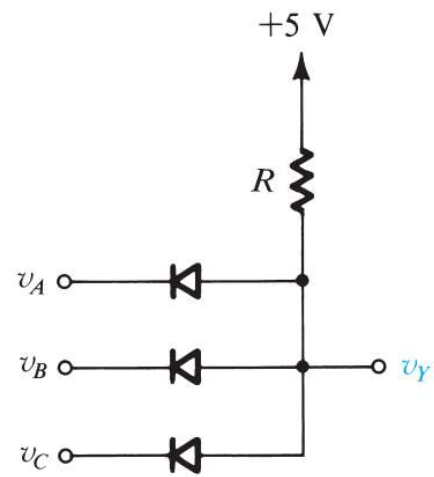
U prekidačkim kolima postoje dva diskretna nivoa napona koja predtavljaju logičku nulu i logičku jedinicu.

Diodno logičko ILI kolo



$$Y = A + B + C$$

Diodno logičko I kolo



$$Y = A \cdot B \cdot C$$

Ukoliko je na sva tri ulaza dovedena logička nula, ni jedna od dioda neće voditi i na izlazu je nizak naponski nivo odnosno logička nula. Ukoliko je na bilo koji od ulaza dovedena logička jedinica odgovarajuća dioda će provesti i napon na izlazu će biti

$$V_{out} = V(1) - V_D$$

što odgovara logičkoj jedinici.

Ukoliko je na sva tri ulaza dovedena logička jedinica, ni jedna od dioda neće voditi i na izlazu je visok visok nivo – logička jedinica. Ukoliko je na bilo koji od ulaza dovedena logička nula odgovarajuća dioda će provesti i napon na izlazu će biti

$$V_{out} = V(0) + V_D$$

što odgovara logičkoj nuli.

Osnovna pitanja

1. Strujno naponska karakteristika diode i oblasti rada diode (8,9)
2. Linearizovani modeli diode za velike signale (15,16,17)
3. Dinamička otpornost diode (grafička predstava, izvodjenje jednačine - 21,22)

Ostala ispitna pitanja

1. Kapacitvnost prostornog naleketrisanja, modeli diode za visoke frekvencije (27,28,32)
2. Difuziona kapacitivnost, modeli diode za visoke frekvencije (29,32)
3. Foto dioda, LED, optoizolator (35)
4. Šotki dioda, Varikap dioda, Zener dioda (36,37)
5. Jednostrani i dvostrani usmerač (električne šeme, talasni oblici napona, izraz za jednosmerni napon, poredjenje 39,40,43-45)
6. Limiteri i uspostavljači nivoa (56-59)