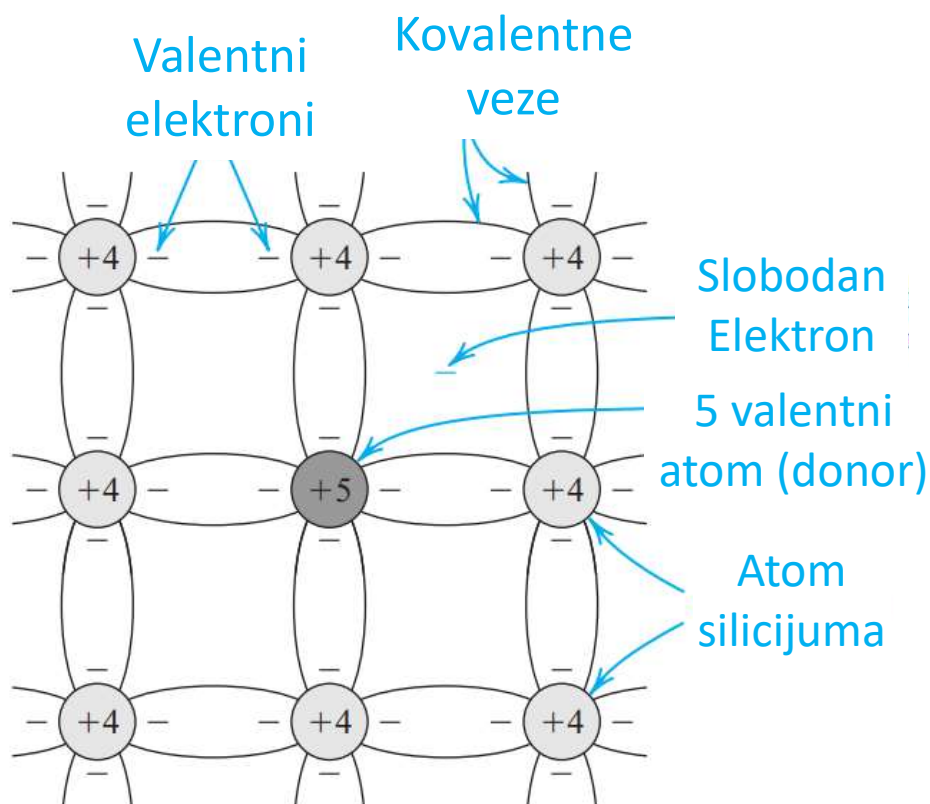


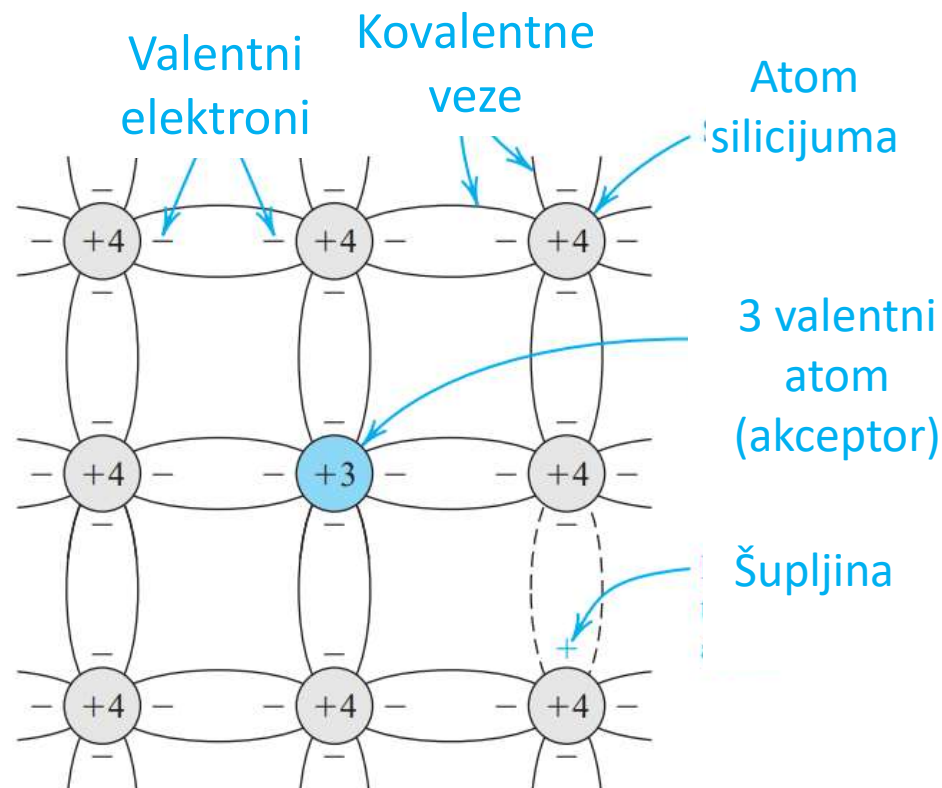
**Kola sa diodama**

- Kod čistog poluprovodnika broj slobodnih elektrona jednak je broju šupljina (nepopunjena kovalentna veza).
- **Poluprovodnik n** tipa dobija se unošenjem male koncentracije 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 naelektrisanja u poluprovodniku p tipa su šupljine.

### Poluprovodnik n tipa

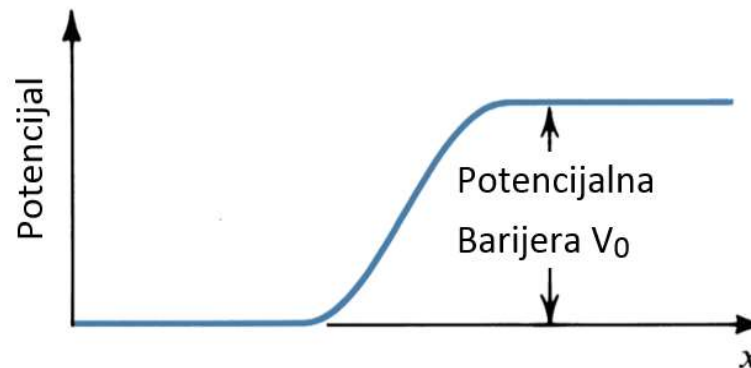
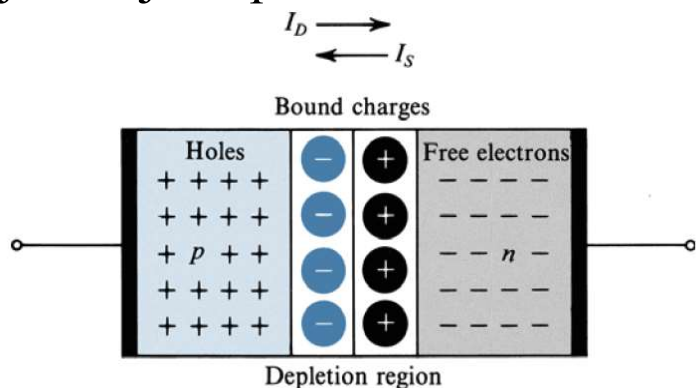


### Poluprovodnik p tipa



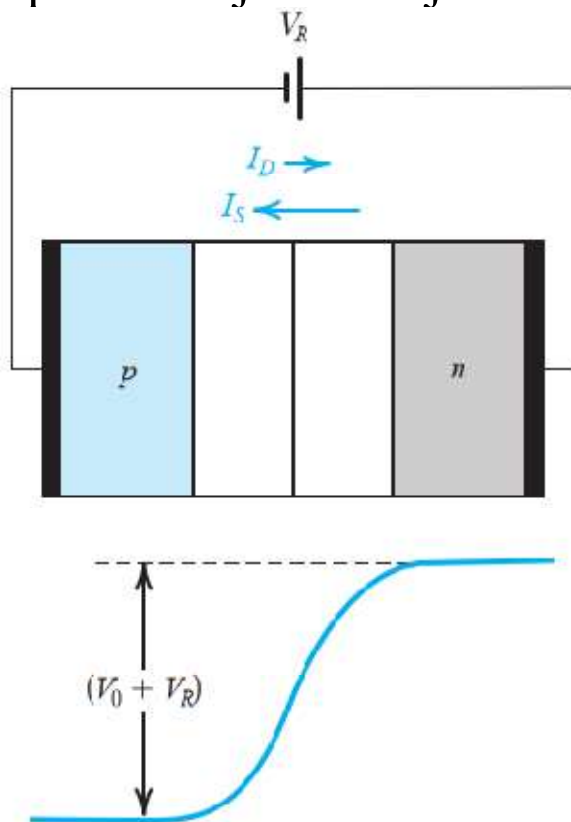
## Model diode

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 nosilaca naelektrisanja. Difuzija je kretanje slobodnih nosioca naelektrisanja iz oblasti veće koncentracije ka oblasti manje koncentracije. Elektroni će se kretati iz n oblasti prema 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 naelektrisanja. Razlika potencijala koja se pri tome formira naziva se potencijalna barijera.



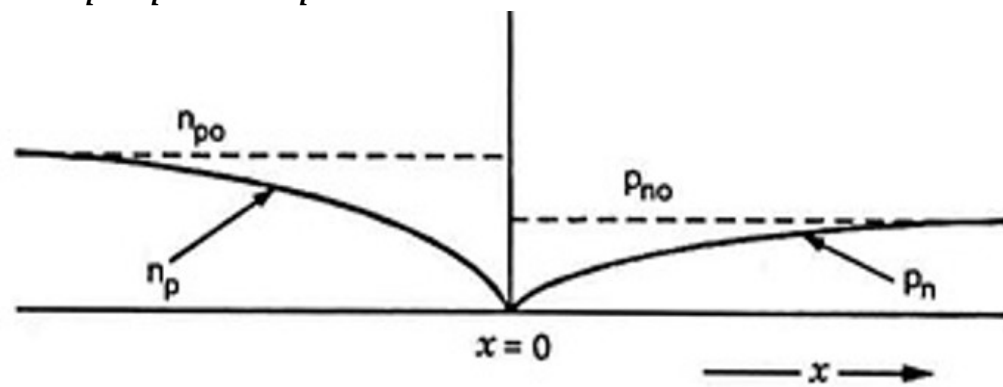
## Model diode

Kada je spoljni 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 oblasti se povećava usled kretanja glavnih nosilaca naelektrisanja (elektrona iz  $n$  oblasti i šupljina iz  $p$  oblasti) od pn spoja ka spoljnim priključicima. Spoljni napon deluje na takav način da podstiče kretanje sporednih nosilaca na elektrisanja (elektrona iz  $p$  oblasti i šupljina iz  $n$  oblasti) kroz osiromašenu oblast. Usled toga dolazi do opadanja koncentracije sporednih nosilaca uz granicu osiromašene oblasti. Već pri malim vrednostima spoljašnjeg napona ( $V_r < 4 V_T$ ) njihova koncentracija je praktično jednaka nulu. Odavde proističe da će pri daljem porastu napona inverzne polarizacije  $V_r$  struja ostati nepromenjena.



$$p_n(l_n) = p_{no} \cdot e^{\frac{V}{V_T}} \quad \text{Koncentracija manjinskih nosilaca na granici prelazne oblasti}$$

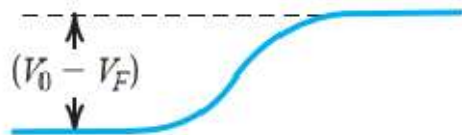
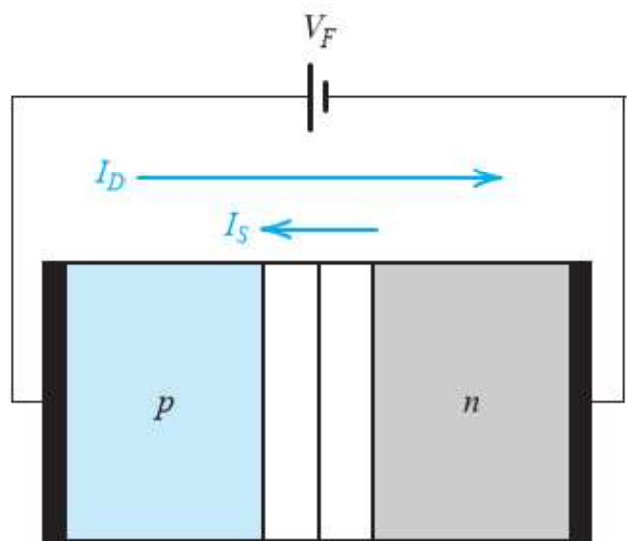
$$n_p(l_p) = n_{po} \cdot e^{\frac{V}{V_T}}$$



Koncentracija manjinskih nosilaca naelektrisanja duž pn spoja

## Model diode

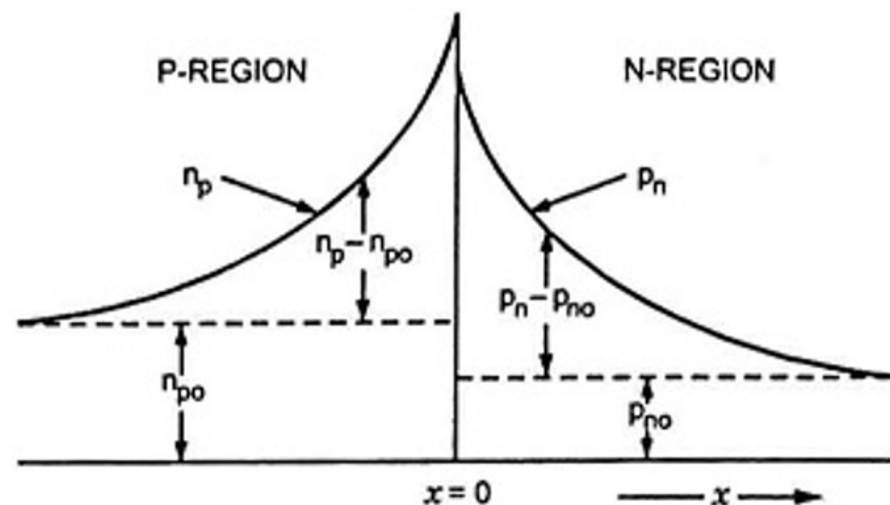
Kada je p oblast na višem potencijalu od n oblasti kažemo da je **dioda direktno polarisana**. U tom slučaju je spoljašnji napon ima suprotan polaritet u odnosu na električno polje osiromašene oblasti. Spoljašnji napon podstiče kretanje većinskih nosioci naelektrisanja (šupljina u p oblasti i elektroni u n oblasti) kroz osiromašenu oblast. Usled toga dolazi do gomilanja ovih nosilaca naelektrisanja uz granicu osiromašene oblasti. Nakon što pređu u drugu oblast većinski nosioci postaju manjinski nosioci naelektrisanja i usled difuzije nastavljaju da se kreću u istom smeru.



$$p_n(l_n) = p_{no} \cdot e^{\frac{V}{V_T}}$$

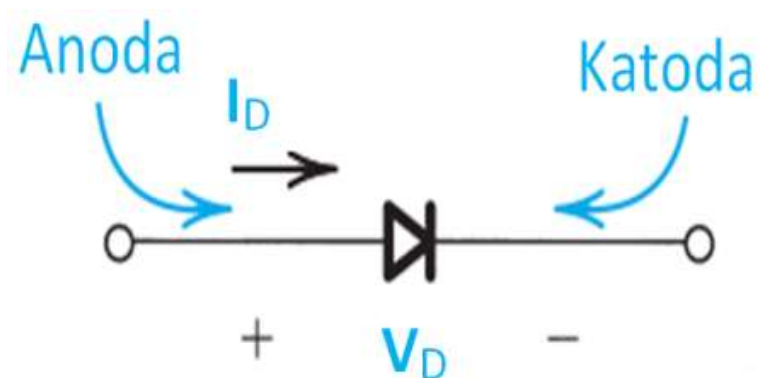
$$n_p(l_p) = n_{po} \cdot e^{\frac{V}{V_T}}$$

Koncentracija manjinskih nosilaca na granici prelazne oblasti



Koncentracija manjinskih nosilaca naelektrisanja duž pn spoja

### -Diode (strujno naponska karakteristika)

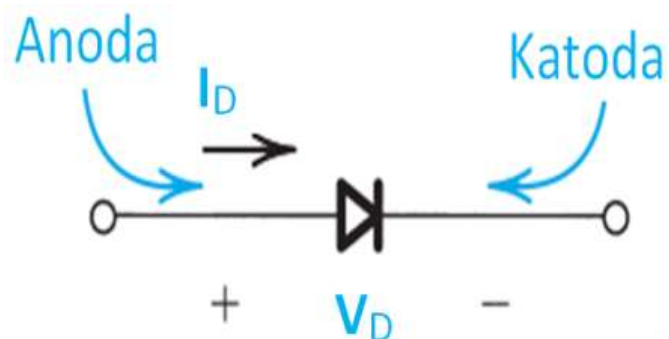


Dioda je elektronska komponenta sa dve elektrode koje se nazivaju: *anoda* i *katoda*. Napravljena je na bazi pn spoja.

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)



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

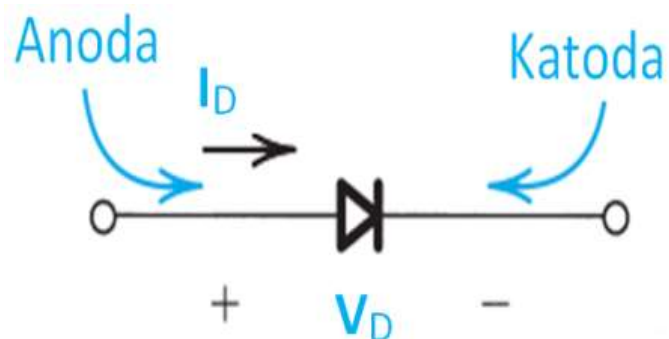
$V_T$  je *temperaturski potencijal*

$$V_T = \frac{kT}{q} \Big|_{T=300\text{K}} = 0.026\text{V} = 26\text{mV}$$

$I_S$  je *inverzna struja zasićenja*, za Si diodu reda nA a za Germanlijumsku reda  $\mu\text{A}$ .

$\eta$  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 potencijal mogu se primeniti sledeće aprisimacije:

pri direktna polarizaciji za  $V_D \gg V_T$   $I_D \approx I_S \cdot e^{\frac{V_D}{\eta \cdot V_T}}$

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



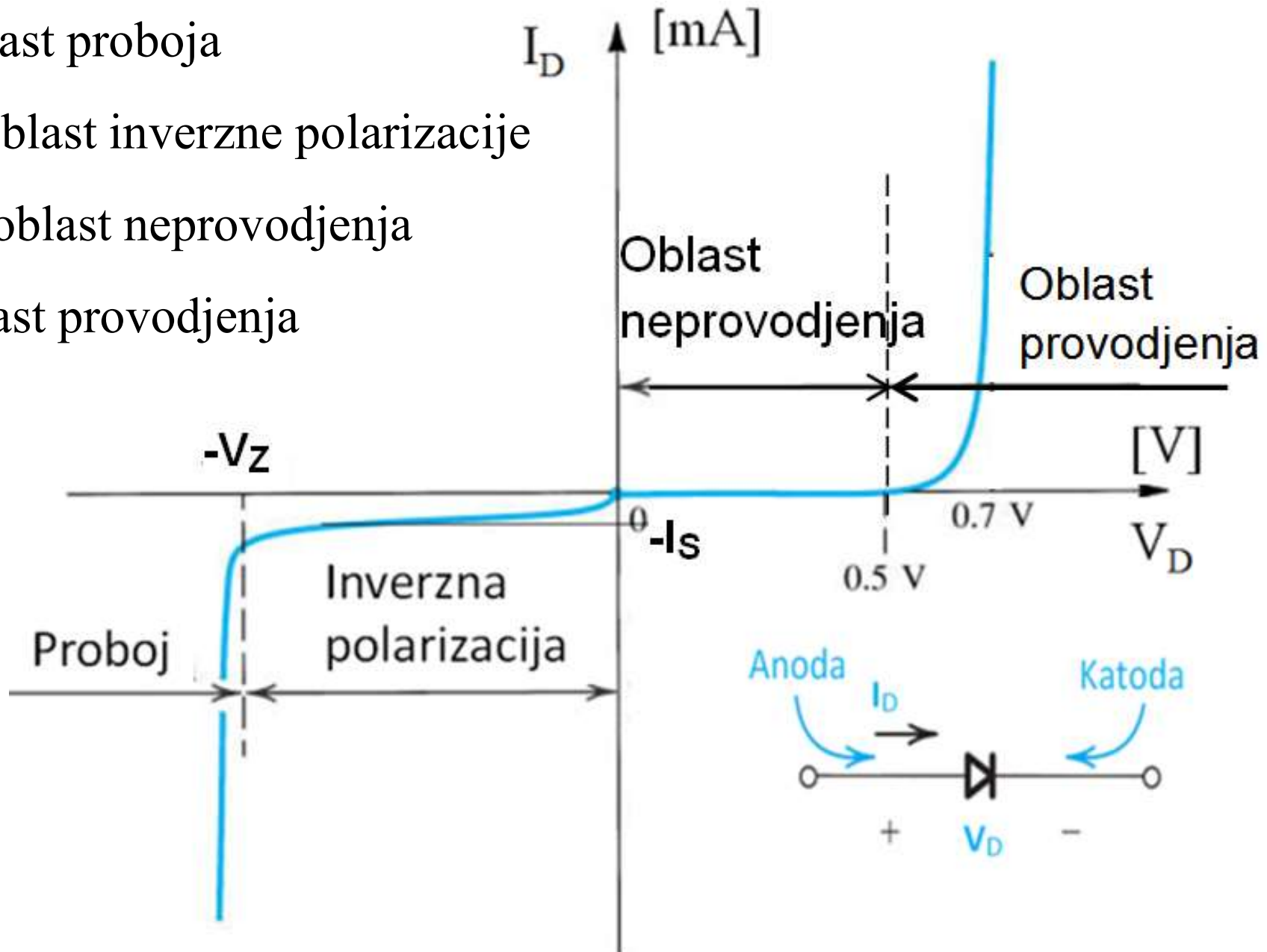
## Oblasti rada diode:

$V_D < V_Z$  oblast proboja

$V_Z < V_D < 0$  oblast inverzne polarizacije

$0 < V_D < V_\gamma$  oblast neprovodjenja

$V_D > V_\gamma$  oblast provodjenja



## Analiza kola sa diodama u jednosmernom režimu

---

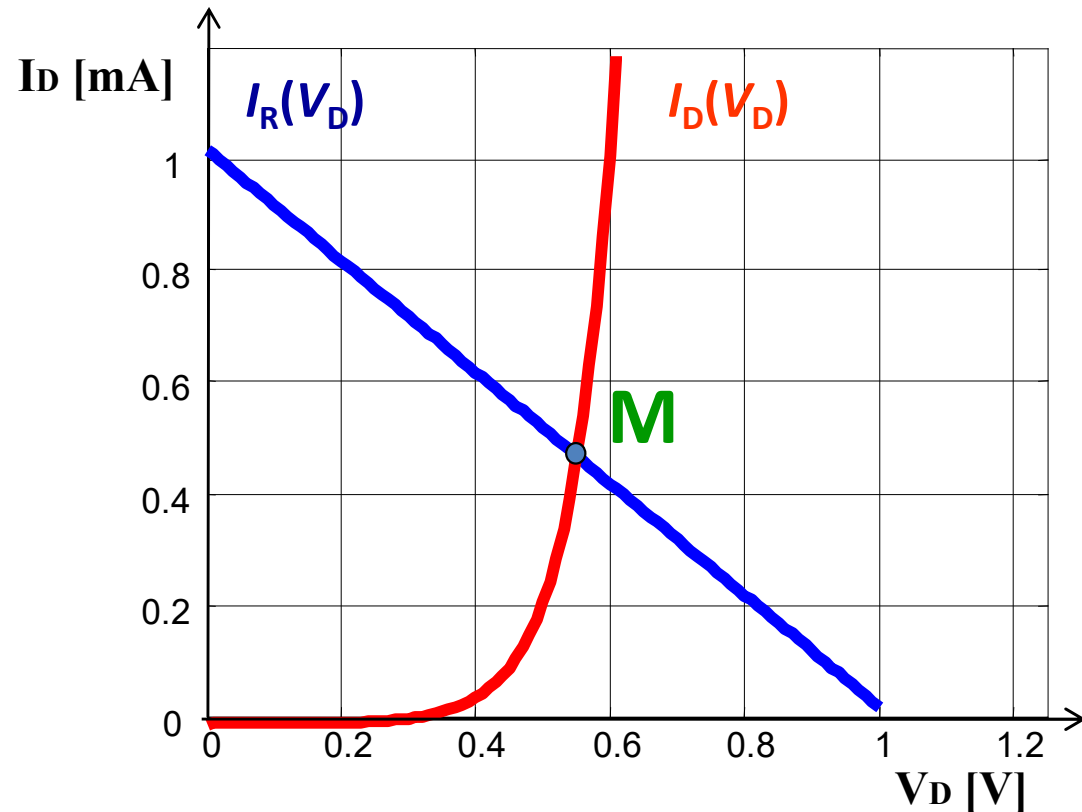
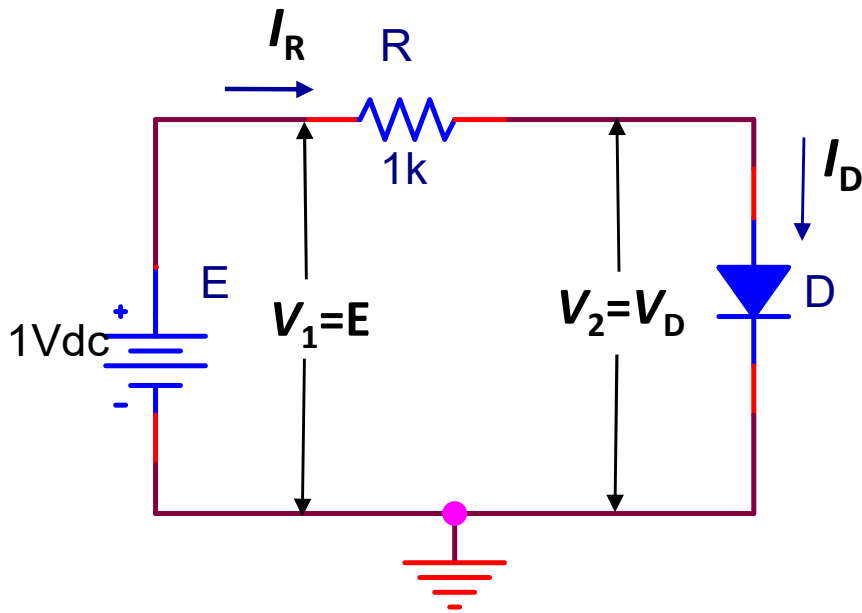
Analiza kola sa diodama složenija je u odnosu na analizu linearnih kola zato što je dioda nelinearna komponenta. Kola sa diodama se mogu analizirati na jedan od sledeća tri načina:

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

# Dioda u elektronskom kolu DC režim

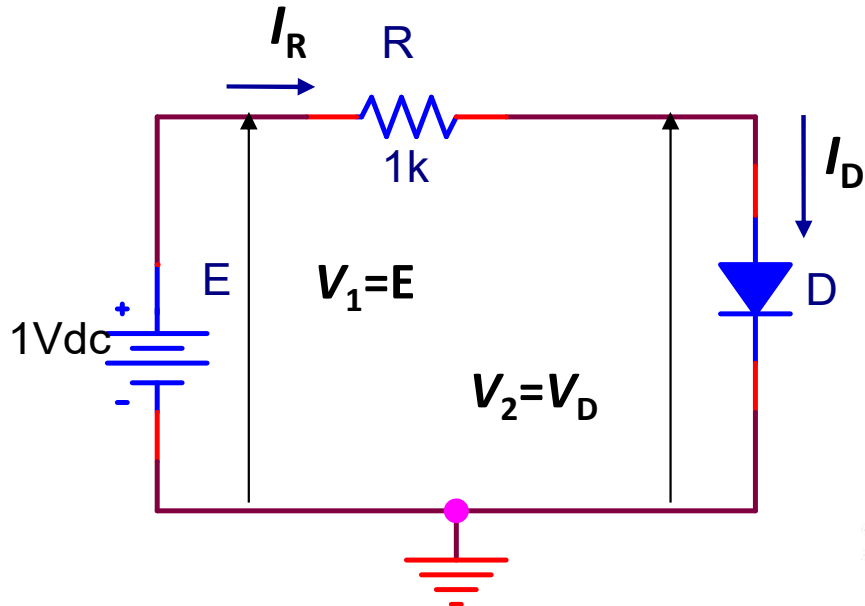
## Grafička analiza kola

Grafička analiza kola je primenjiva kada može da se uspostavi relacija između struje kroz diodu i napona na diodi u funkciji spoljnjih elemenata. Ovaj postupak je praktično primenjiv samo na veoma jednostavnim kolima.



# Dioda u elektronskom kolu DC režim

## Grafička analiza kola



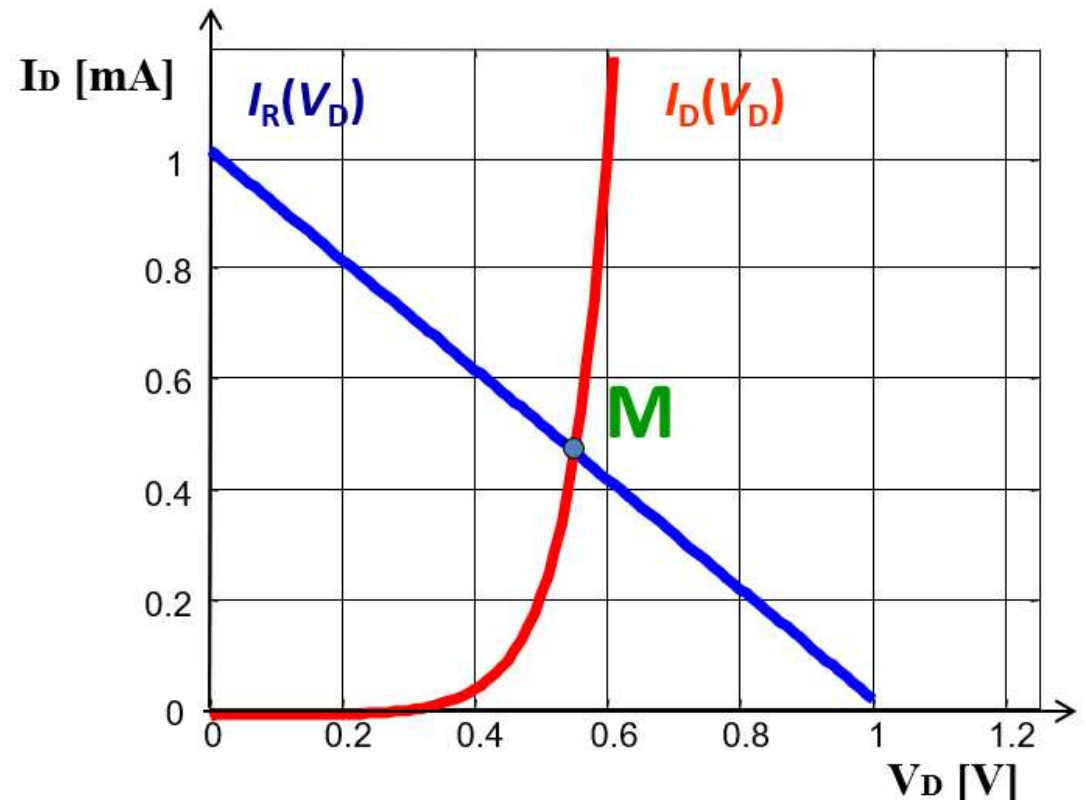
Radna prava se dobija primenom Kirhofovog zakona za napon.

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

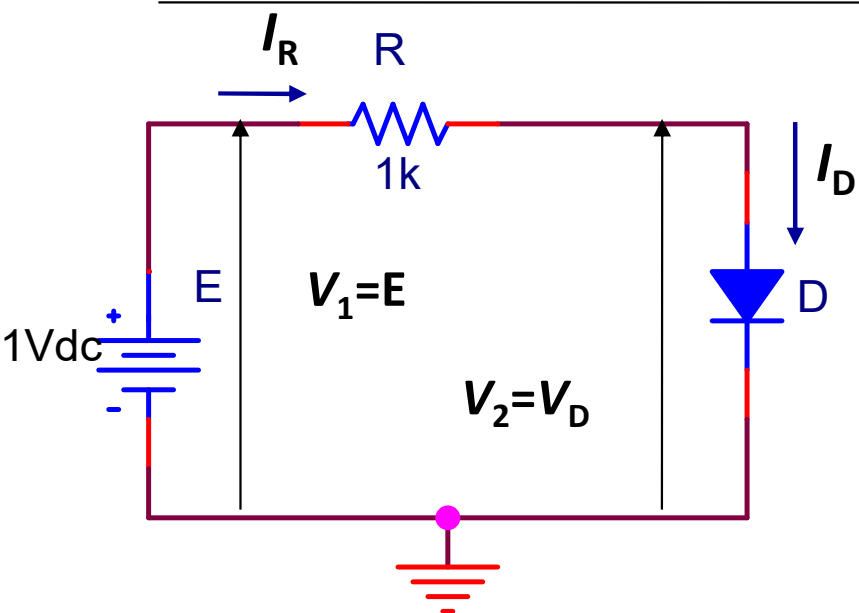
$$I_D = I_R = \frac{E - V_D}{R}$$

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

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).



## Analiza matematičkim modelom diode



S obzirom da je strujno naponska karakteristika diode poznata kolo sa diodama se može analizirati i matematički. Kirhofovi zakoni za struje i napone su univerzalni pa važe i za kola koja sadrže nelinearne komponente kao što je dioda.

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

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

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

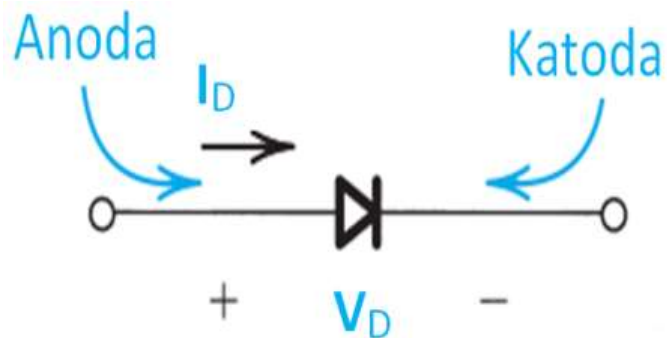
---

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

## 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**.

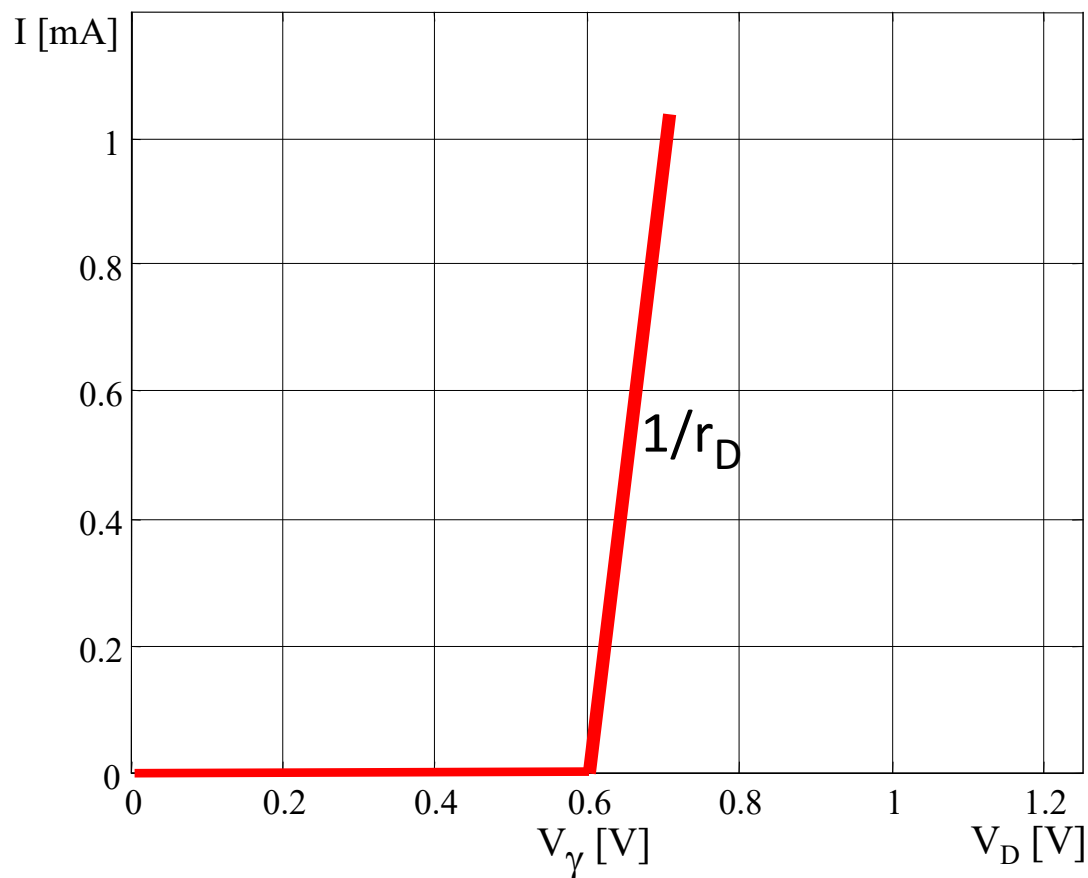
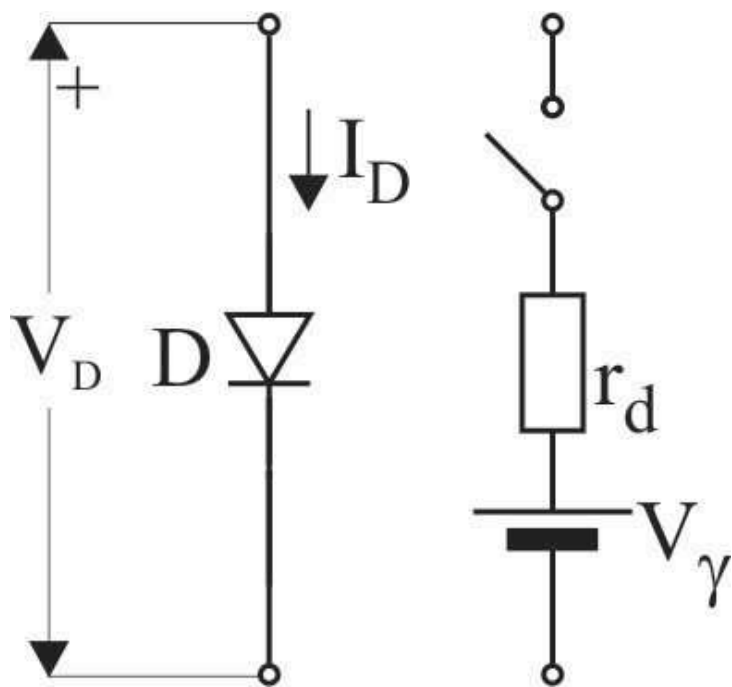


## Model diode za velike signale

### 1) Model diode – linearizovan

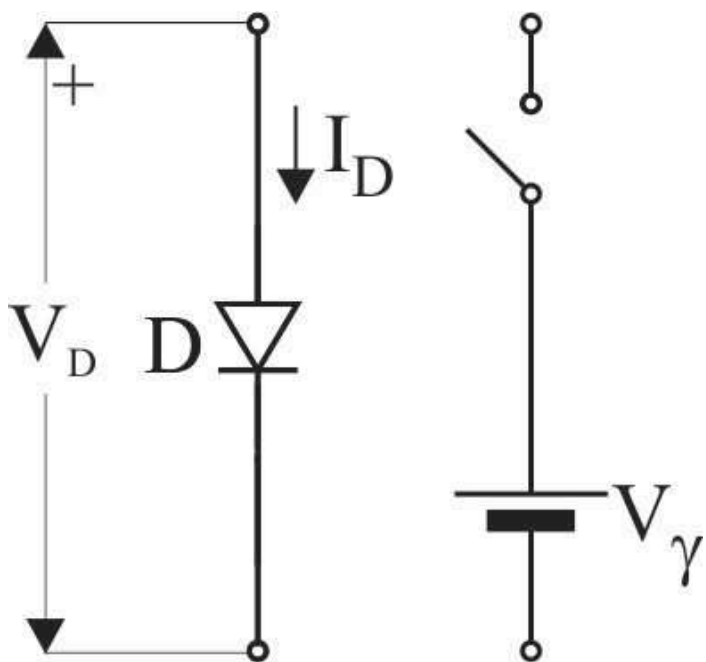
$$I_D = 0 \quad \text{za } V_D < V_\gamma$$
$$I_D = \frac{V_D - V_\gamma}{r_d} \quad \text{za } V_D > V_\gamma$$

Dioda se modelira kao redna veza jednosmernog naponskog generatora  $V_\gamma$  i otpornika  $r_d$ .

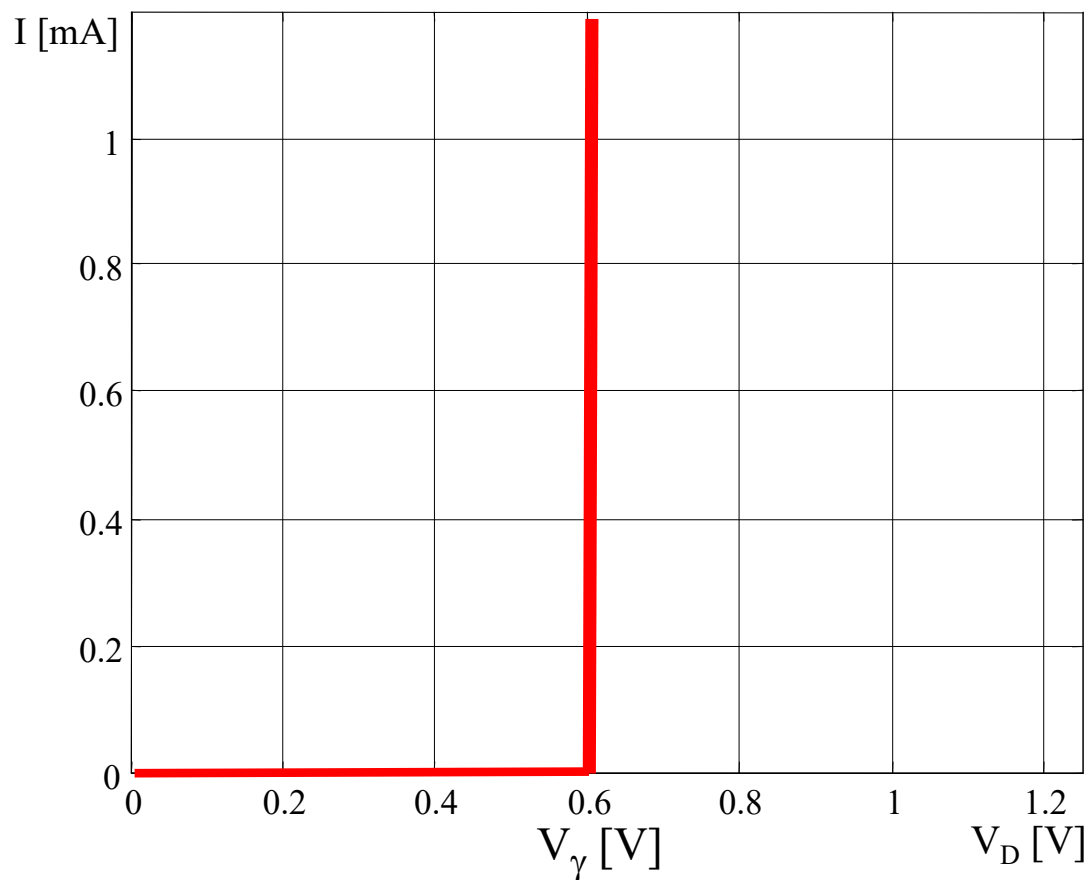


## Model diode za velike signale

### 2) Model konstantnog napona



$V_\gamma$  je napon praga, koji za silicijumsku diodu iznosi oko 0,6 V a za germanijumsku oko 0,2 V



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

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

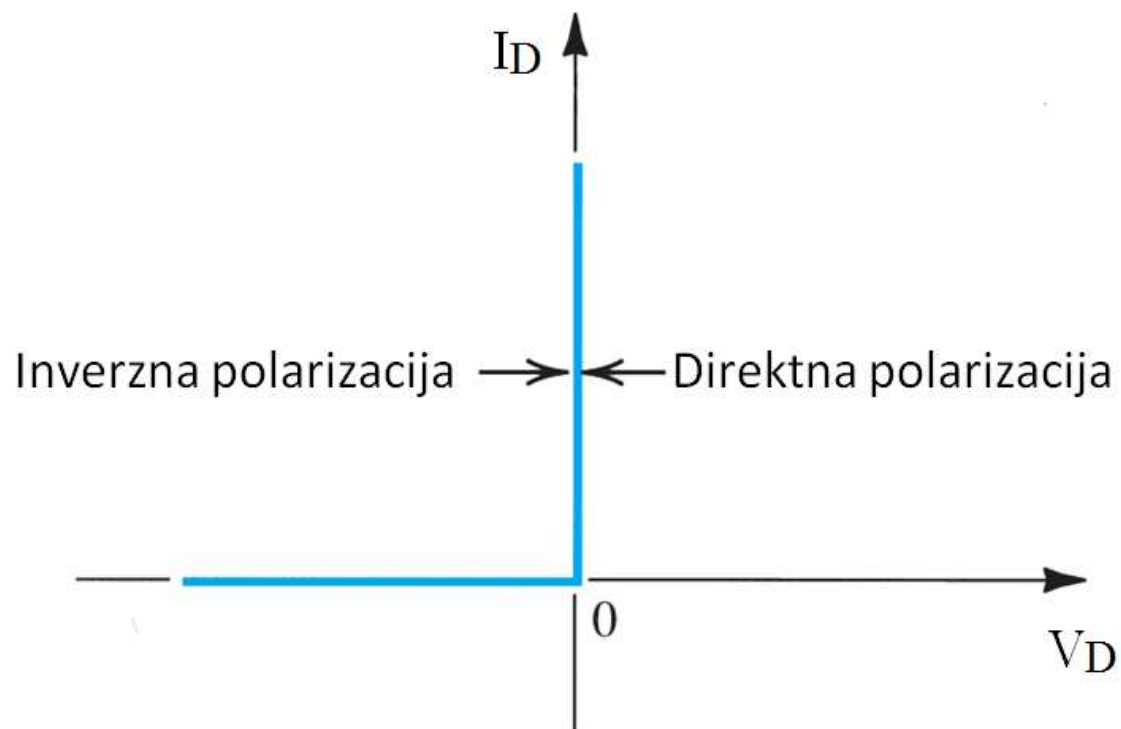


## Model diode za velike signale

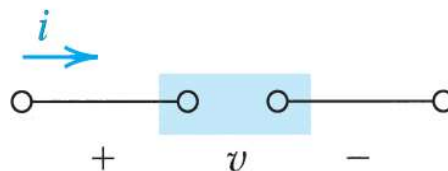
### 3) Model **idealne diode**

$$V_D < 0 \Rightarrow I_D = 0$$

$$I_D > 0 \Rightarrow V_D = 0$$

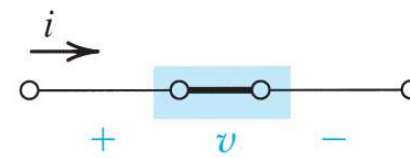


Prekid



$$v < 0 \Rightarrow i = 0$$

Kratak spoj



$$i > 0 \Rightarrow v = 0$$

## Model diode

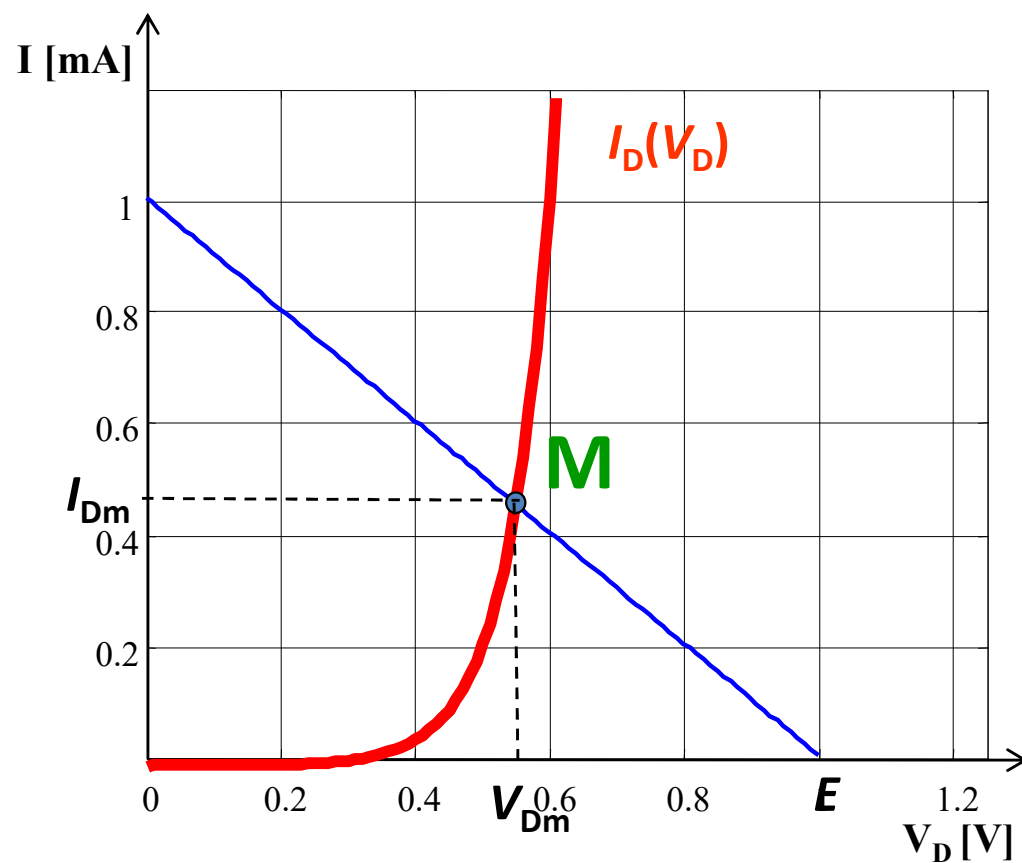
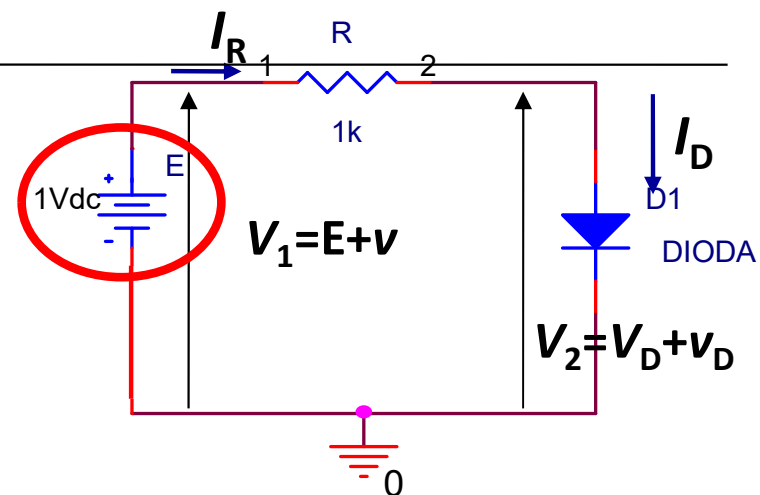
---

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

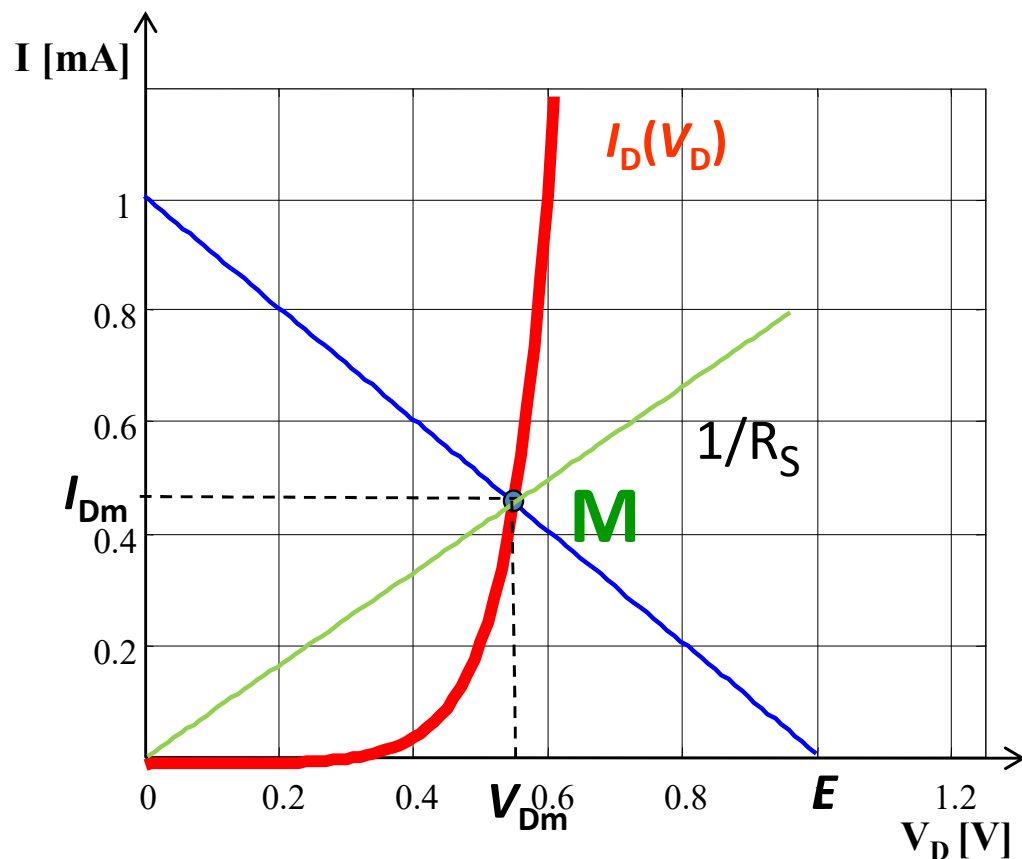
Uloga jednosmernog izvora napajanja je da obezbede odgovarajuću **mirnu radnu tačku** komponente (označena sa M). Mirnu radnu tačku diode čine jednosmerna struja kroz diodu i jednosmerni napon na diodi. Radna tačka treba da se nalazi u odgovarajućoj oblasti rada i da bude u što linearnijem delu karakteristike.



## Statička i dinamička otpornost

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

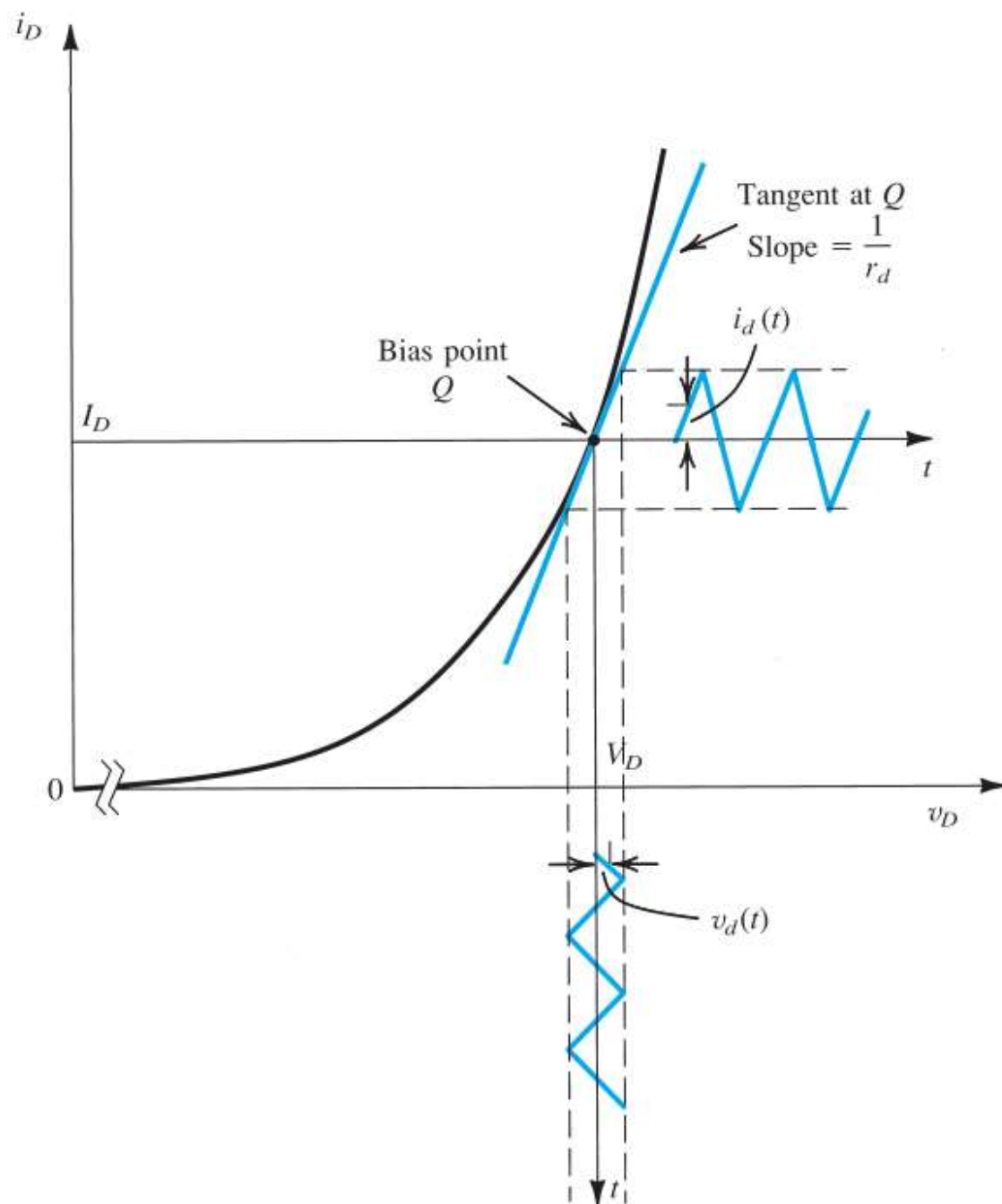
Statička otpornost,  $R_S$ , je obrnuto proporcionalna nagibu krive koja prolazi kroz koordinatni početak i radnu tačku. Dinamička otpornost,  $r_d$ , je inverzno proporcionalna nagibu prave koja je tangenta na strujno naponsku karakteristiku u radnoj tački.



## Statička i dinamička otpornost

**Dinamička otpornost,  $r_d$ ,** je inverzno proporcionalna nagibu prave koja je tangenta na strujno naponsku karakteristiku u radnoj tački (označena sa  $Q$  na slici).

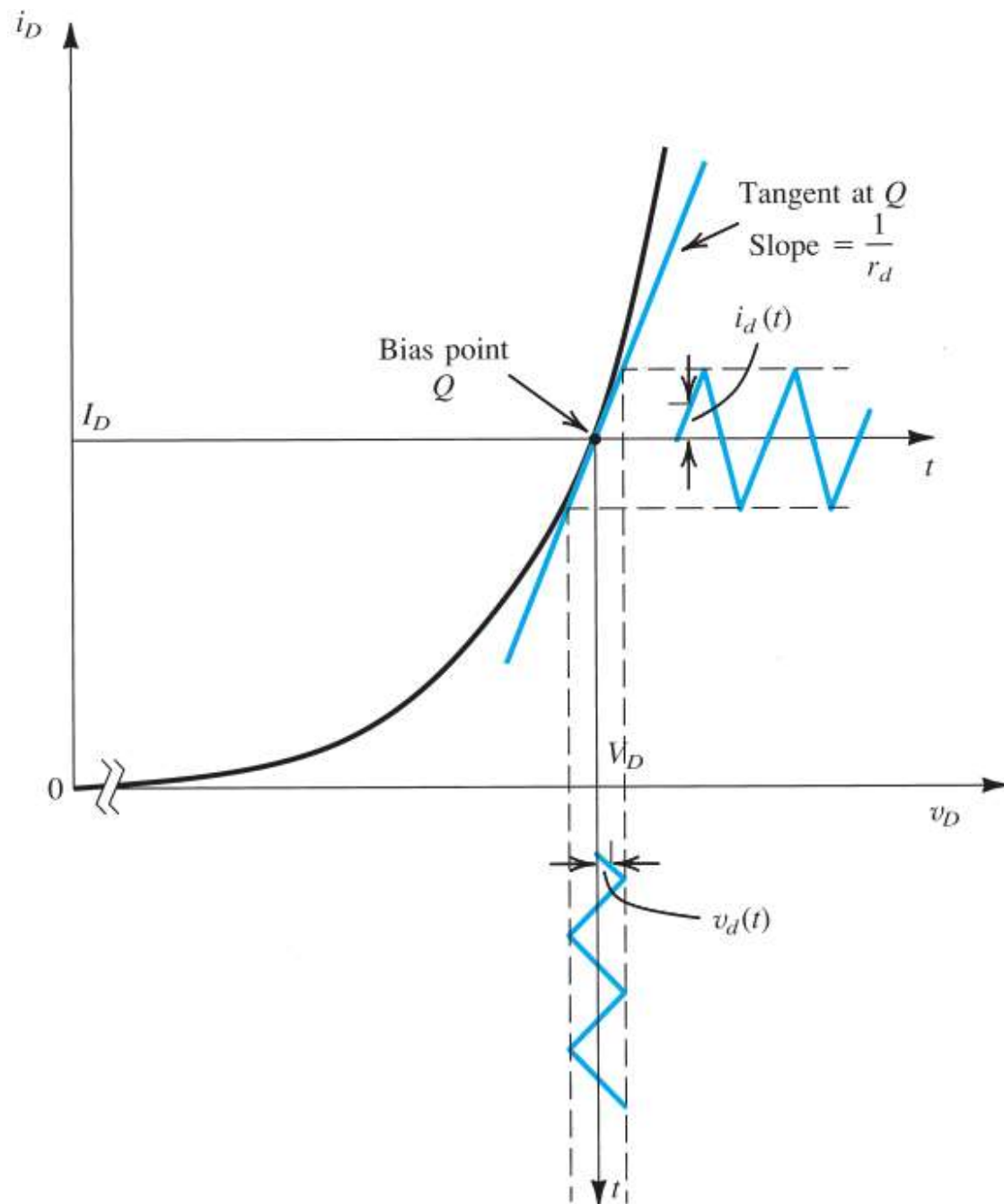
$$r_d = \left. \frac{dv_D}{di_D} \right|_{I_{DM}}$$



## Statička i dinamička otpornost

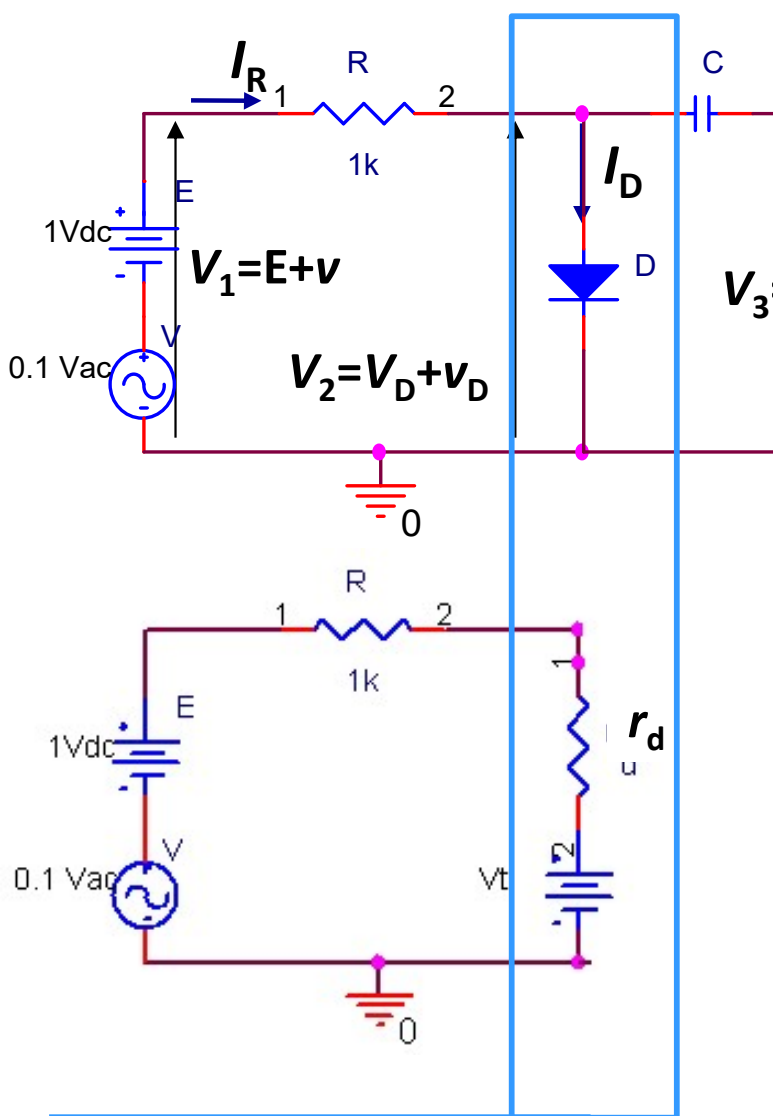
Ukoliko je promenjiva komponenta napona mala deo karakteristike duž koje se pomera radna tačka se može aproksimirati pravom linijom. Ova linija predstavlja tangentu statičke karakteristike na mestu radne tačke.

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

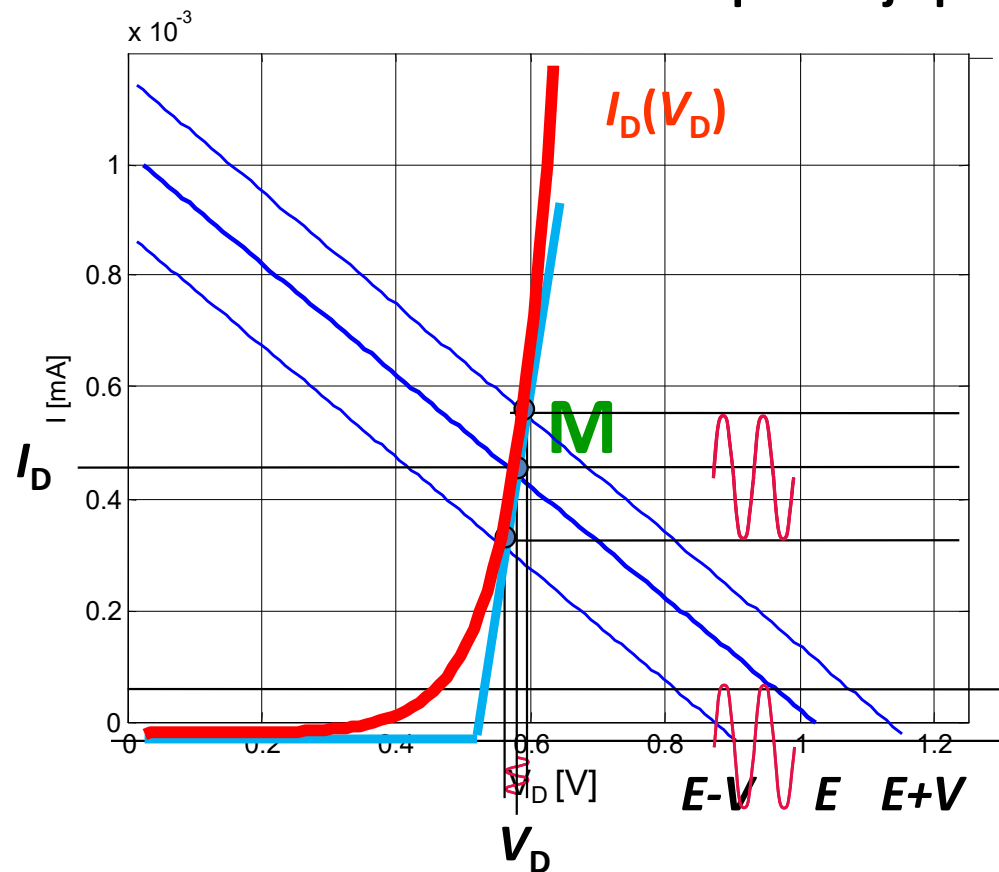


# Dioda u elektronskom kolu

## Grafička interpretacija problema



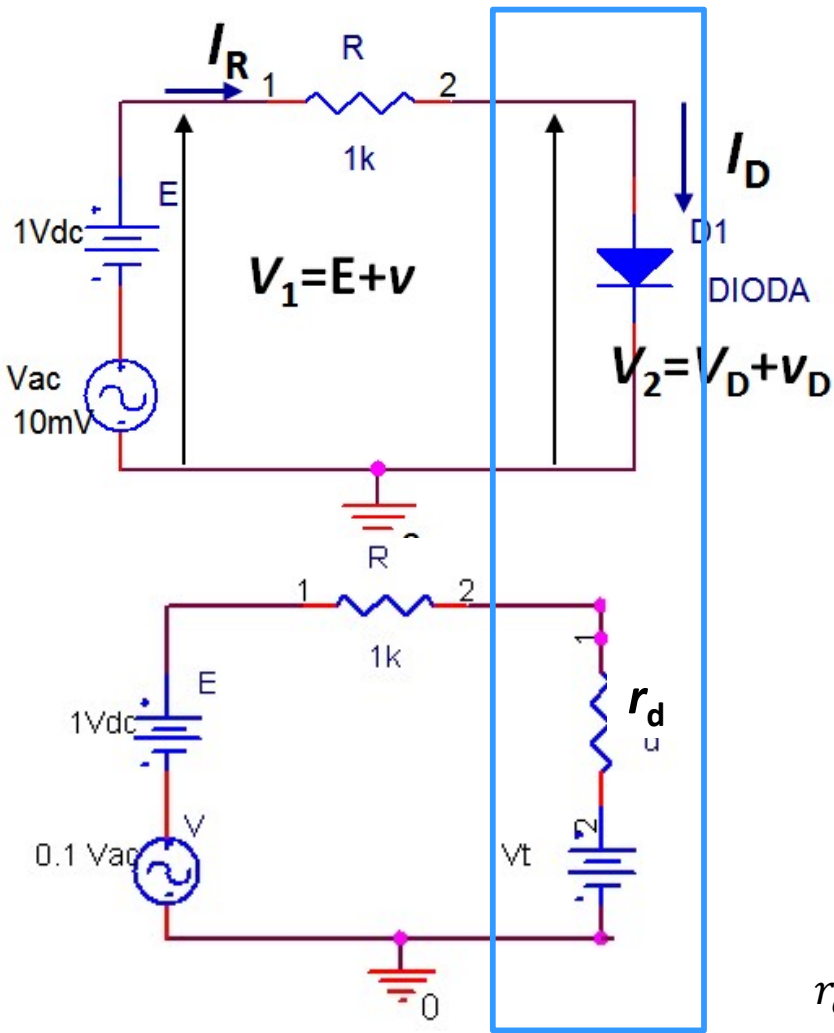
Linearizovan model



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

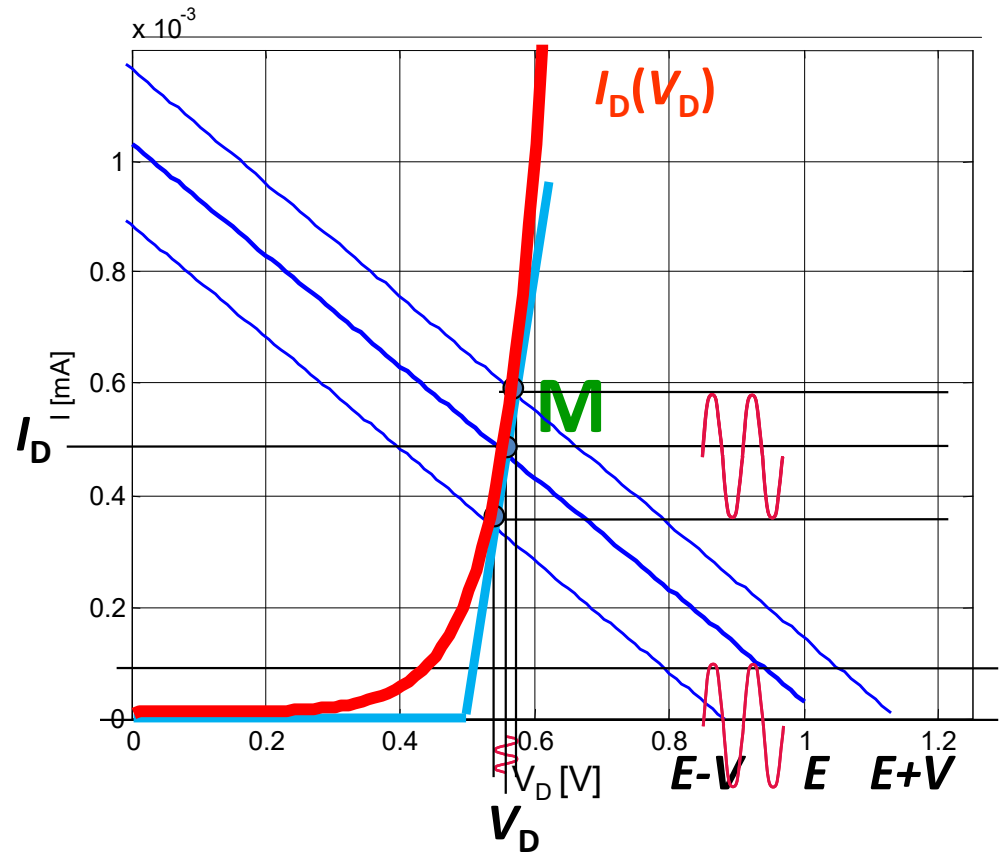
$$r_d = \left. \frac{dv_D}{di_D} \right|_{I_{DM}}$$

# Dioda u elektronskom kolu



Linearizovan model

## Grafička interpretacija problema



$$r_d = \frac{dV_D}{dI_D} \approx \frac{\Delta V_D}{\Delta I_D}$$

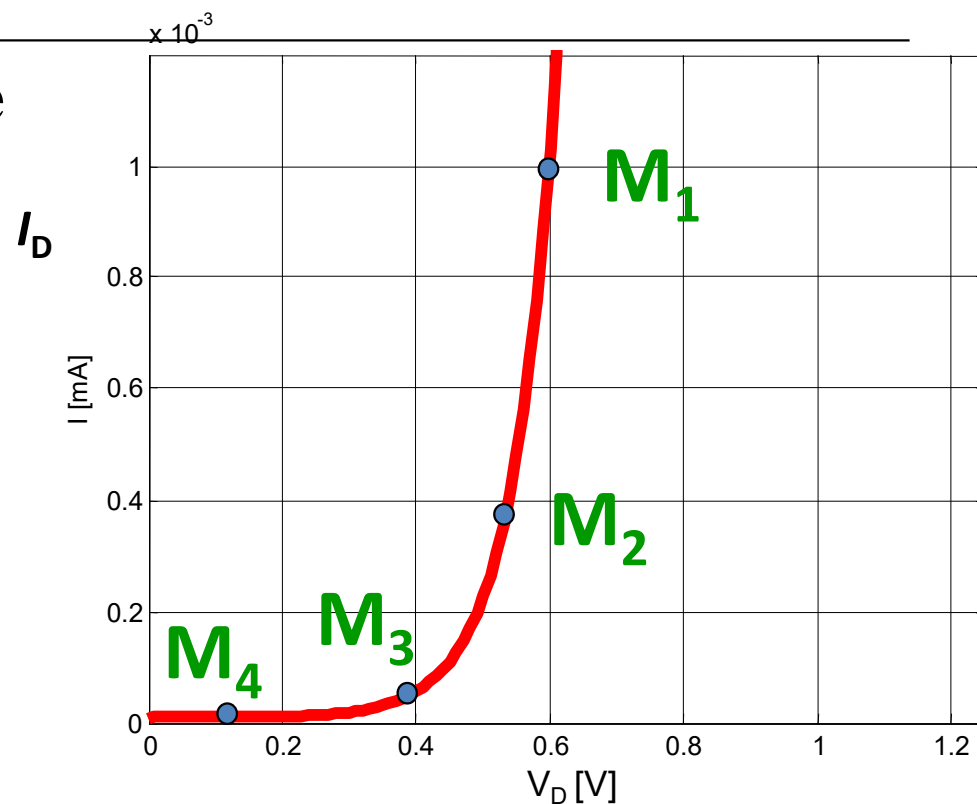
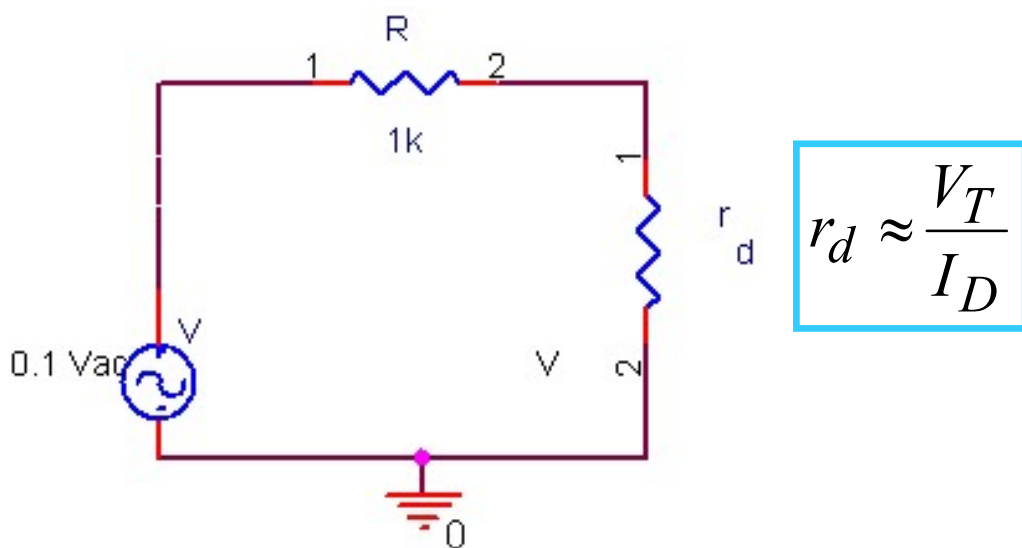
$$r_d = \frac{1}{\frac{dI_D}{dV_D}} \approx \frac{1}{\frac{I_S e^{V_D/V_T}}{V_T}} \approx \frac{V_T}{I_D}$$

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



## Model diode

### VAŽNO model za male signale



Dinamička otpornost zavisi od položaja mirne radne tačke!

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

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

## Model diode

---

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

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

**Kapacitivnost prostornog naelektrisanja** je posledica postojanja prelazne oblasti koja se ponaša kao izolator koji je sa dve strane okružen oblastima mnogo veće provodnosti

**Difuziona kapacitivnost** je posledica nagomilavanja manjinskih nosilaca naelektrisanja u okolini prelazne oblasti prilikom direktne polarizacije diode.

## Model diode

**Kapacitivnost 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.

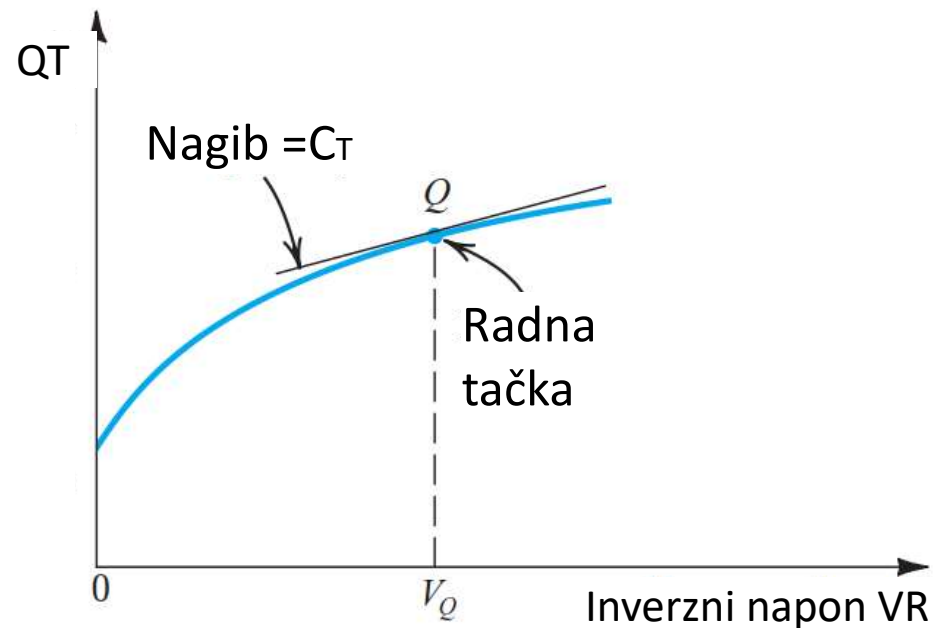
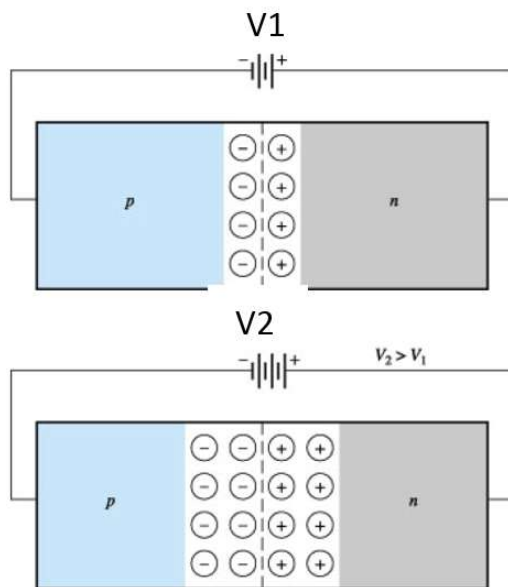
$$Q_T = \alpha \cdot \sqrt{V_O + V_R} \quad C_T = \frac{dQ_T}{dV} \quad C_{T0} = \left. \frac{dQ_T}{dV} \right|_{V=V_O} \quad C_T = \frac{C_{T0}}{\sqrt{1 + \frac{V_R}{V_O}}}$$

$Q_T$  je količina vezanog naelektrisanje u prelaznoj oblasti

$C_{T0}$  je kapacitivnost prostornog naelektrisanja kada dioda nije polarisana,

$V_R$  je spoljašnji napon inverzne polarizacije,

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

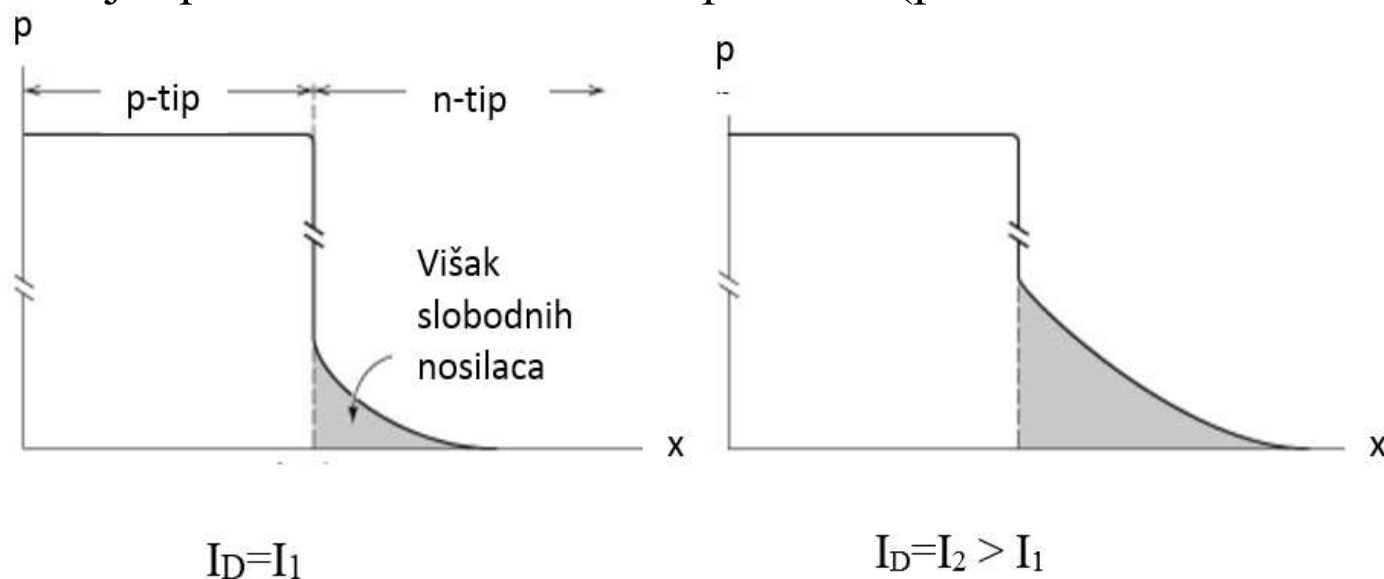


## Model diode

**Difuziona kapacitivnost** je posledica akumuliranja 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 punjenja kondenzatora. Difuziona kapacitivnost dolazi do izražaja pri direktnoj polarizaciji diode. Vrednost ove kapacitivnosti je direktno srazmerna struji koja teče kroz diodu ( $\tau$  u jednačini je vreme preleta).

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

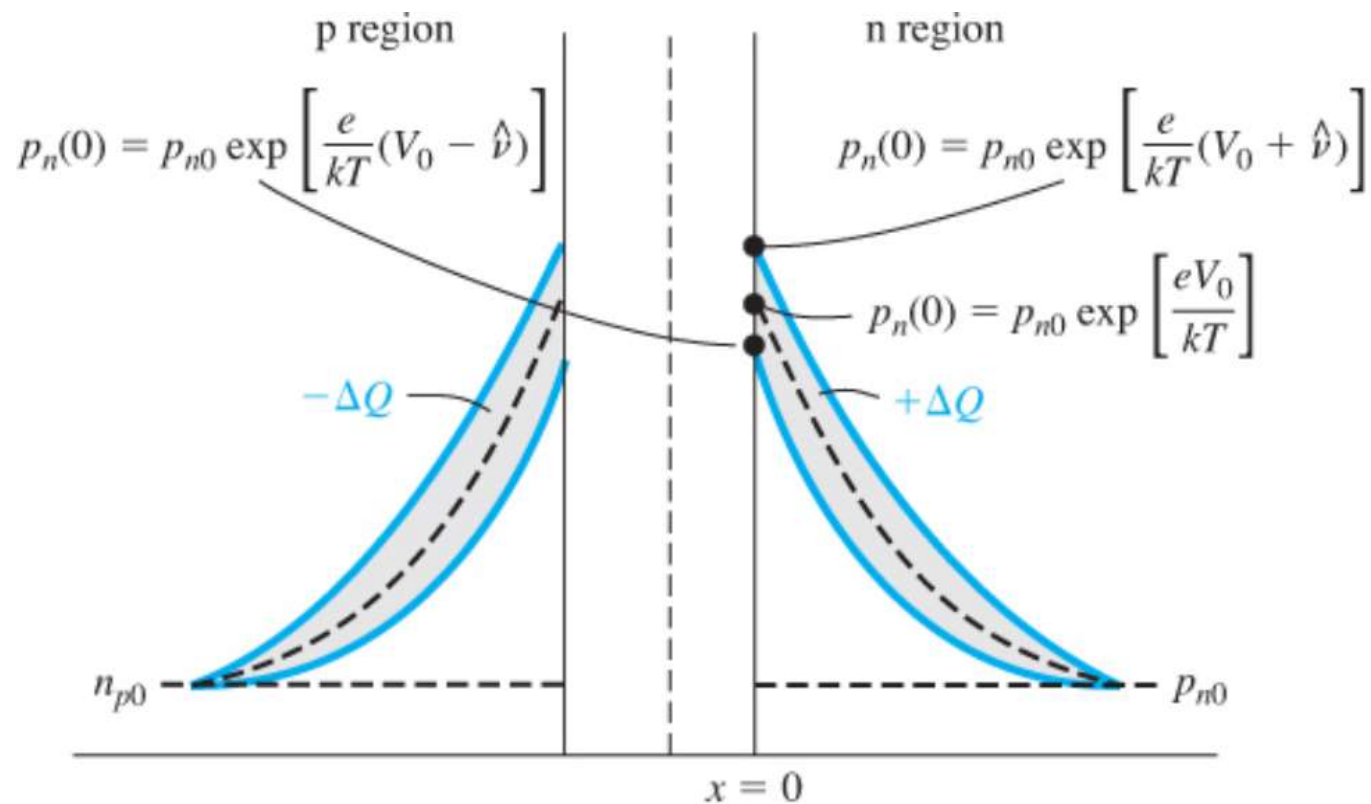
$V_T$  je temperaturski potencijal,  $r_d$  dinamička otpornost diode,  $I_D$  jednosmerna struja kroz diodu.  $Q$  predstavlja naelektrisanje sporednih nosilaca u n ili p oblasti (površina osenčene oblasti).



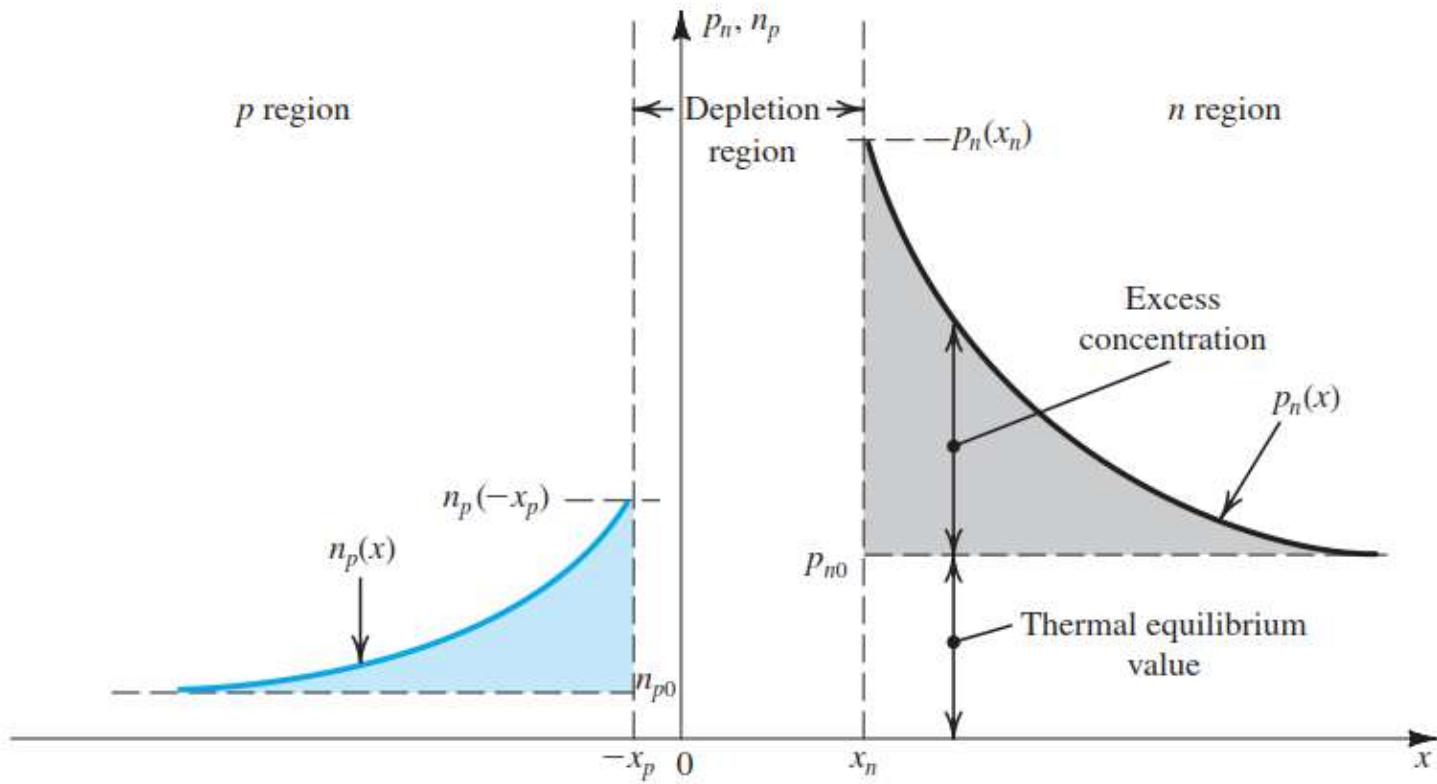
# Model diode

## Difuziona kapacitivnost

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



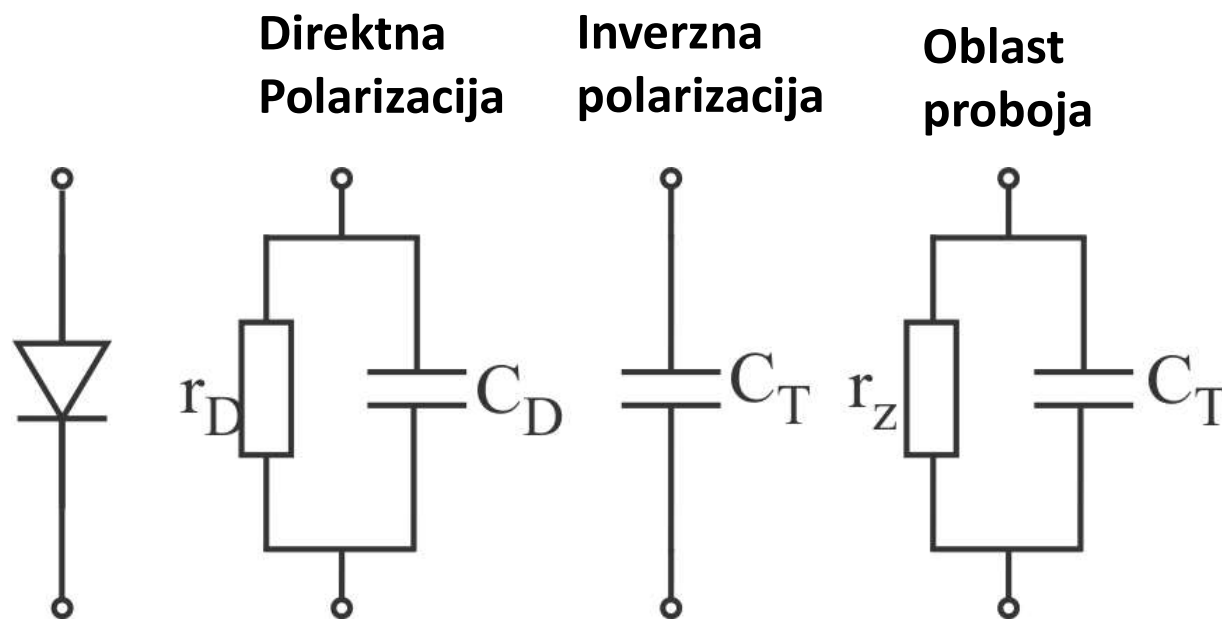
Koncentracija manjinskih nosilaca naelektrisanja duž pn spoja  
kada se menja napon polarizacije



## Model diode

---

Kapacitivnosti pn spoja su reda desetak pF i mogu se zanemariti pri niskim frekvencijama. Međtim, 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 zavisice od položaja radne tačke.

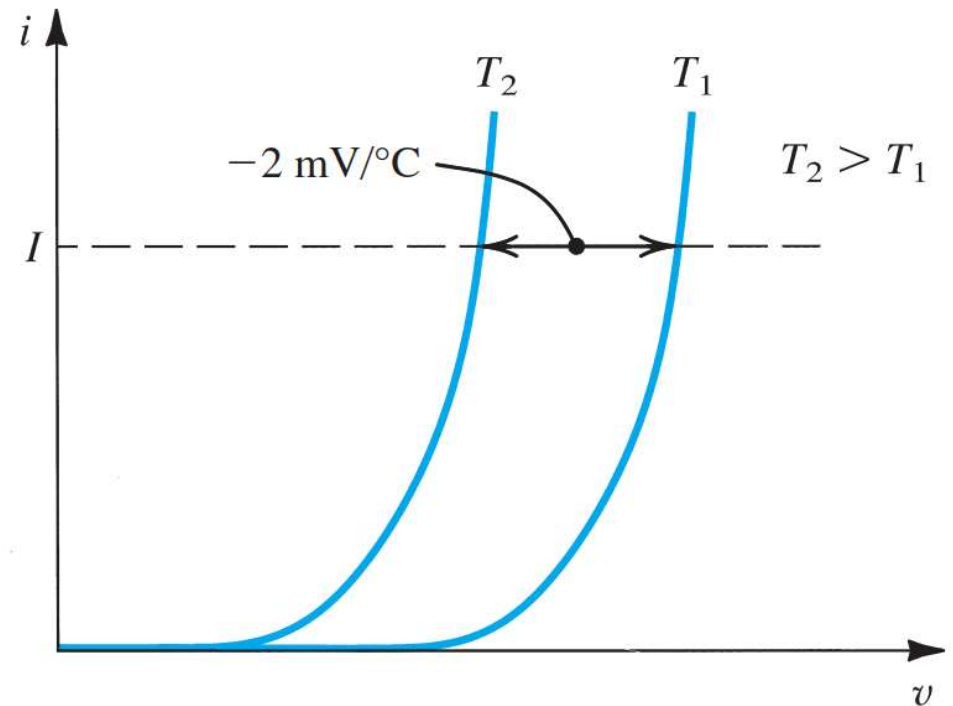


$C_T$  je kapacitivnost prostornog naelektrisanja;  $C_D$  je difuziona kapacitivnost

## Temperaturska zavisnost modela diode

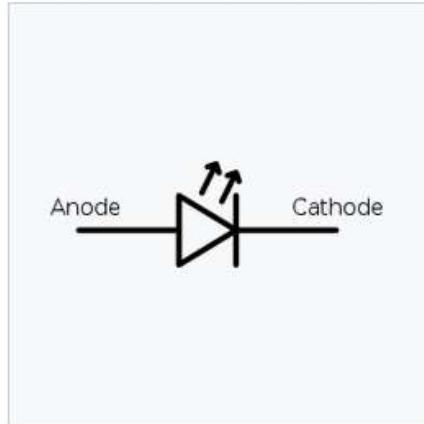
Vrednost priraštaja struje ili napona diode pod dejstvom temperature zavisi od položaja radne tačke. **Inverzna struja zasićenja  $I_S$**  se značajno povećava sa porastom temperature. Kod germanijumske diode  $I_S$  se udvostruči pri porastu temperature za  $10^\circ\text{C}$  ( $7\%/^\circ\text{C}$ ). Inverzna struja zasićenja raste sa porastom temperature zbog porasta broja šupljina i slobodnih elektrona sa temperaturom.

Kao posledica ovog povećanja inverzne struje zasićenja **napon praga provođenja diode,  $V_\gamma$** , se sa porastom struje menja. Pri direktnoj polarizaciji diode promena napona na diodi sa promenom temperature iznosi približno  **$-2\text{ mV/C}$** . Ukoliko je dioda inverzno polarisana pri porastu temperature dolazi do značajnog porasta struje.

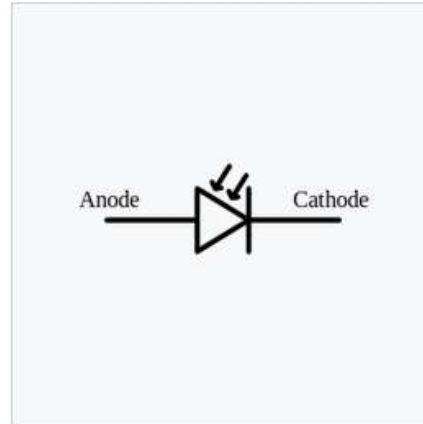




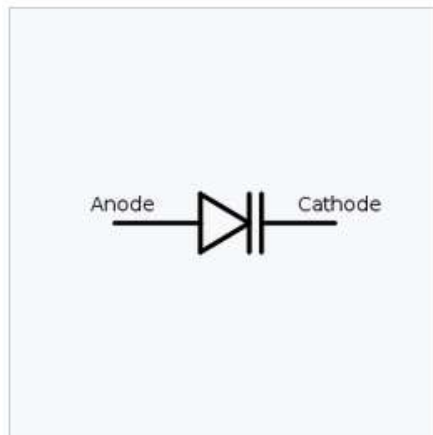
# Specijalni tipovi dioda



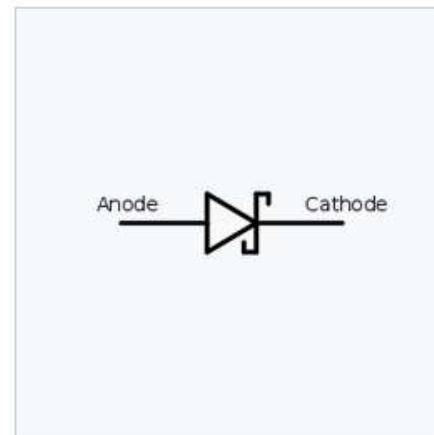
LED symbol



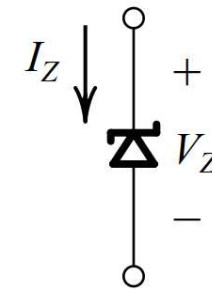
Photodiode symbol



Varicap symbol



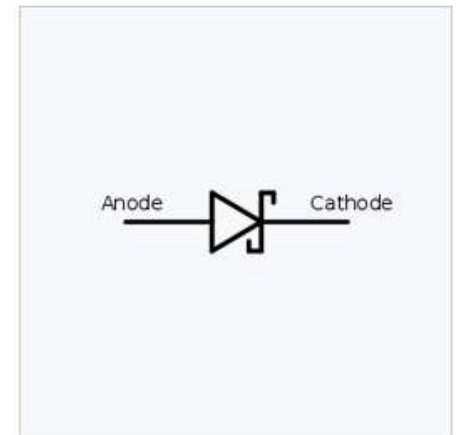
Schottky diode symbol



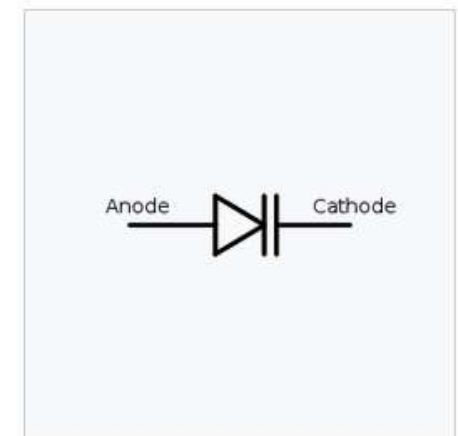
Zener dioda

## Specijalni tipovi dioda

- **Šotki diode** (Schottky 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.
  - Prag provođenja Šotki diode je manji u odnosu na klasaičnu i iznosi između 0,3 i 0,5 V.
- **Varikap diode** su komponente koje se koriste kao naponom kontrolisane kapacitivnosti. Rad Varikap dioda zasniva se na činjenicu da kapacitivnost prostornog naelektrisanja pn spoja zavisna od napona inverzne polarizacije. Radna oblast ove diode je inverzna polarizacija jer tada ekvivalentna impedansa komponente približno jednaka impedansi koju stvara kapacitivnost prostornog naelektrisanja.



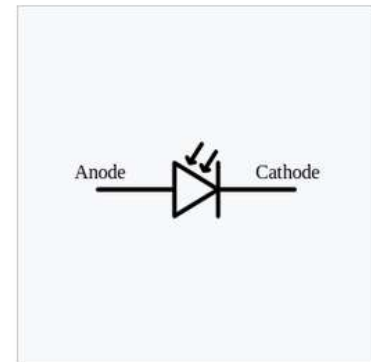
Schottky diode symbol



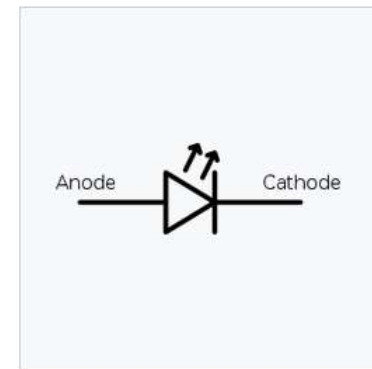
Varicap symbol

# Specijalni tipovi dioda

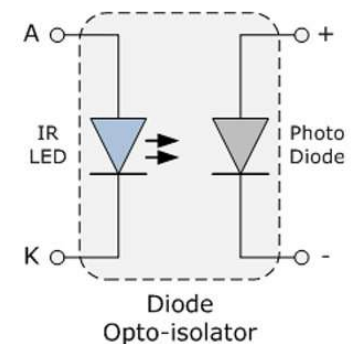
- **Fotodiode** zasnivaju rad na činjenici da struja inverzno polarisanog pn spoja može da se kontroliše svetlosnim zračenjem. Fotoni koji dopiru do osiromašene oblasti prouzrokuju raskidanje kovelantih veza usled čega raste koncentracija slobodnih nosilaca. Kao posledica toga raste inverzna struja zasićenja koja se u ovom slučaju zove fotostruja.
- **LED** dioda konvertuju struju koja protiče kroz direktnu 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 između šupljina i elektrona može pri odredjenim uslovima da nastane svetlosno zračenje. LED diode i fotodiode se najčešće prave od galijum arsenida (GaAs).
- **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.



Photodiode symbol

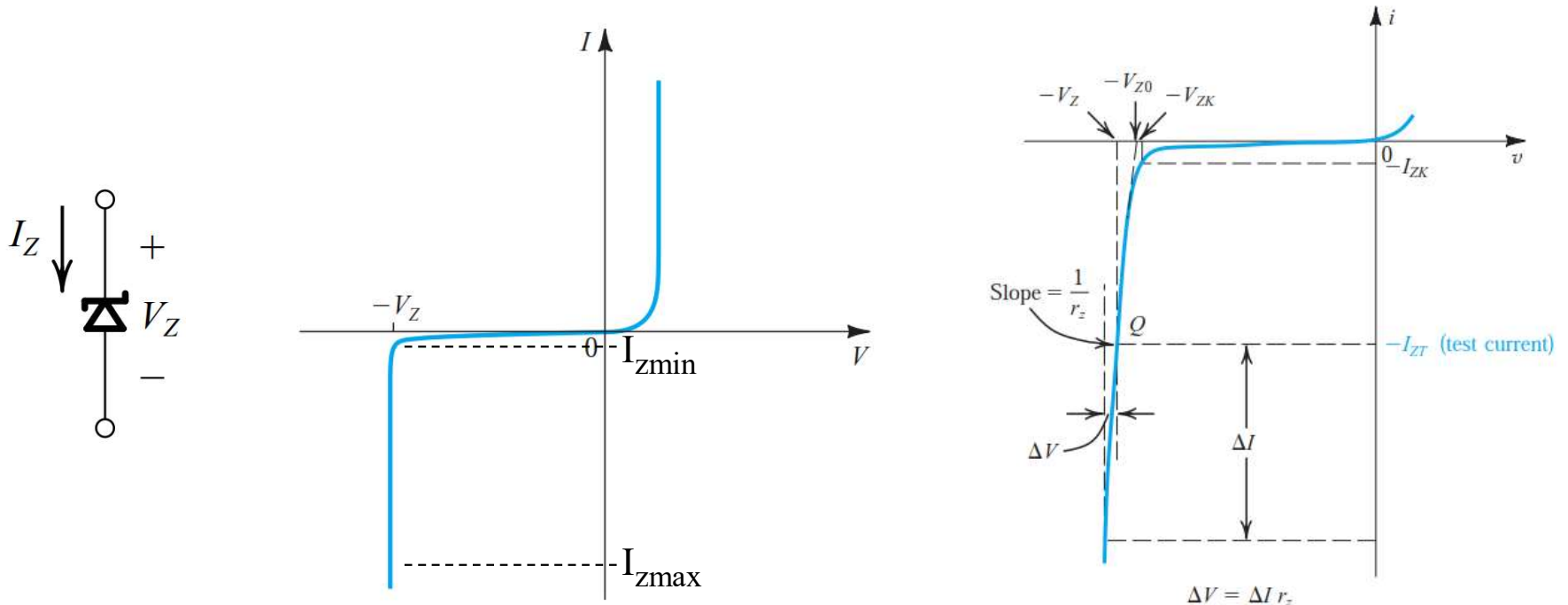


LED symbol



**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.

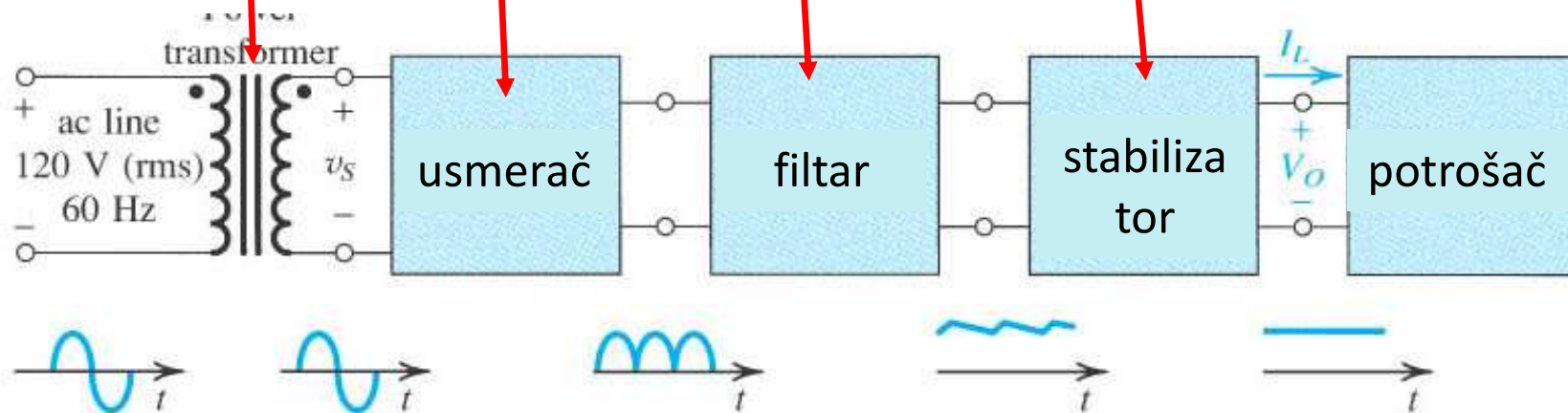
Diode referentnog napona rade u oblasti proboja. **Cenerova dioda** primenjuje Cenerov proboj koji nastaje na p-n spoju kada je velika koncentracija primesa. Probojni napon cener diode je znatno manji u odnosu na standardnu diodu. Radna oblast ove diode je defnisana opsegom struja  $I_{Zmin} < I_Z < I_{Zmax}$ . Minimalna vrednost struje u radnoj oblasti zavisi od karakteristike diode dok je maksimalna vrednost određena maksimalnom disipacijom na komponenti.



## Izvori jednosmernog napajanja

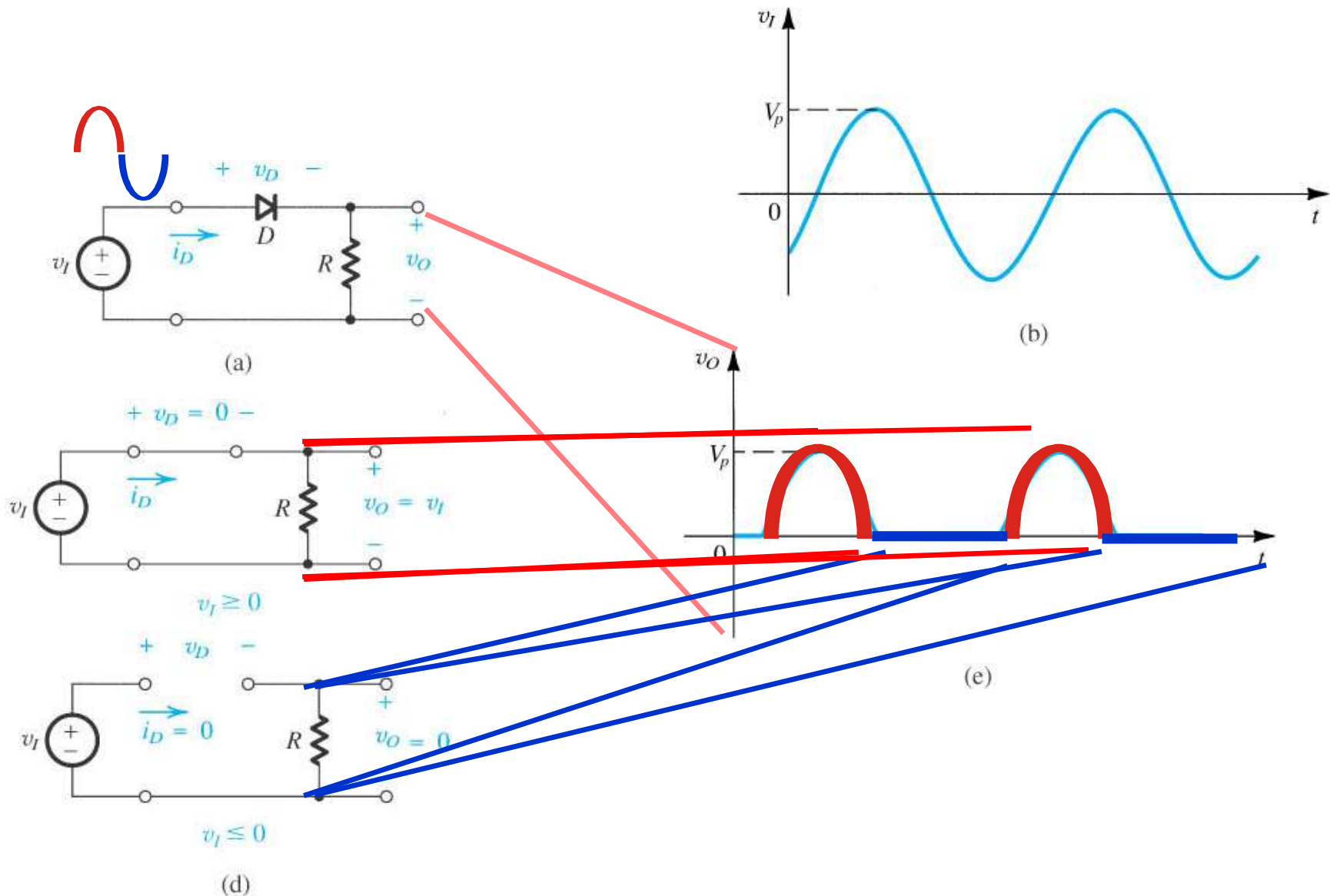
Da bi se od mrežnog napona dobio jednosmerni, željene vrednosti, potrebno je:

1. smanjiti njegovu vrednost (transformator)
2. usmeriti ga ili napraviti jednosmerni napon (usmerač)
3. Filtrirati ili ukloniti naizmeničnu komponentu (filter)
4. stabilisati ga ili učiniti nezavisnim od promena uslova rada (stabilizator)

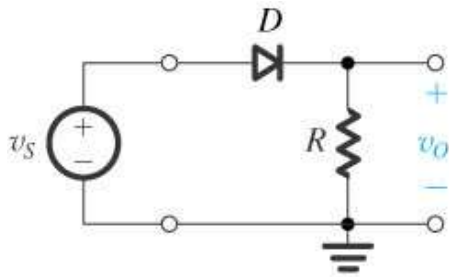


## Usmeravanje naizmeničnog napona

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.

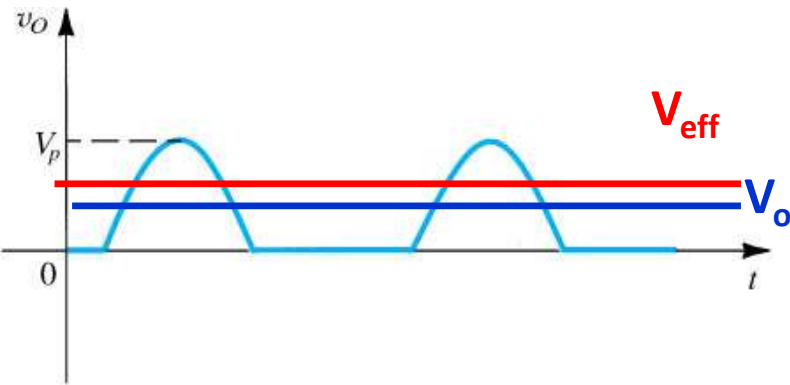


# Jednostrano usmeravanje



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

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



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

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

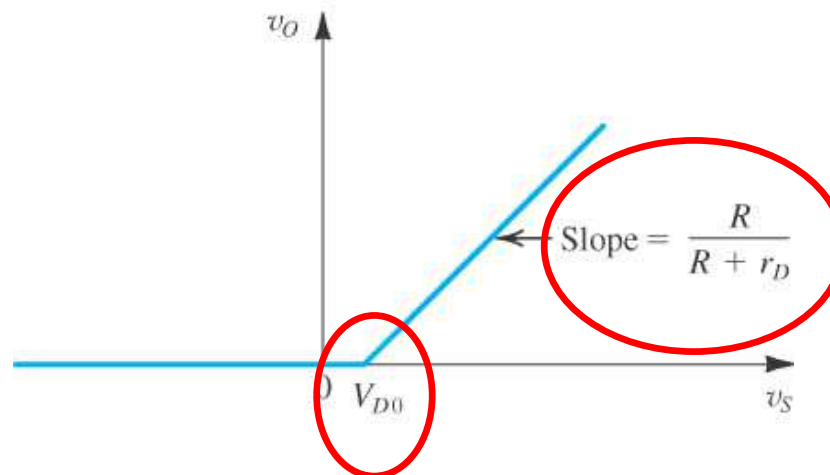
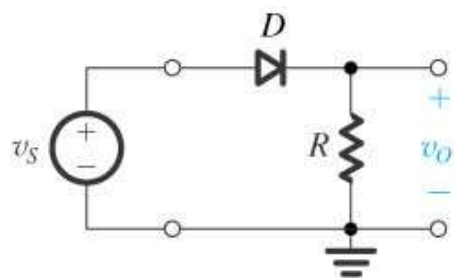
$$V_o = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V_m \cdot \sin(\omega t) d\theta = \frac{1}{2 \cdot \pi} V_m \cdot (-\cos(\pi) + \cos(0)) = \frac{V_m}{\pi}$$

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

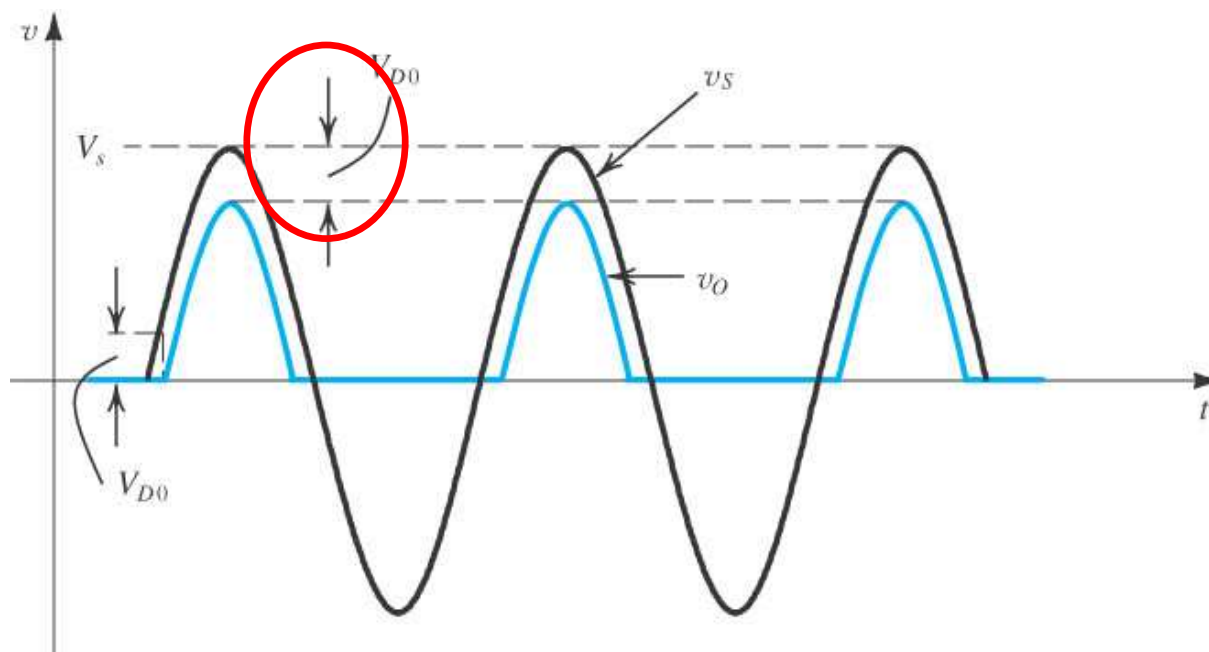
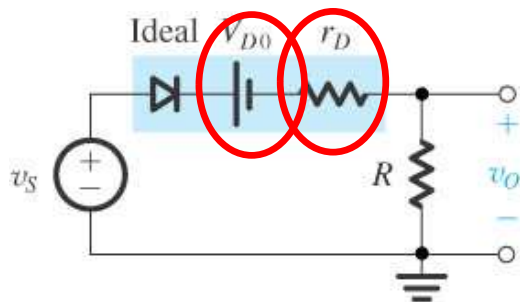
## Jednostrano usmeravanje

Izlazni napon je umanjen za pad napona na diodi.

Ova pojava dolazi do izražaja kada je amplituda ulaznog napona mala.



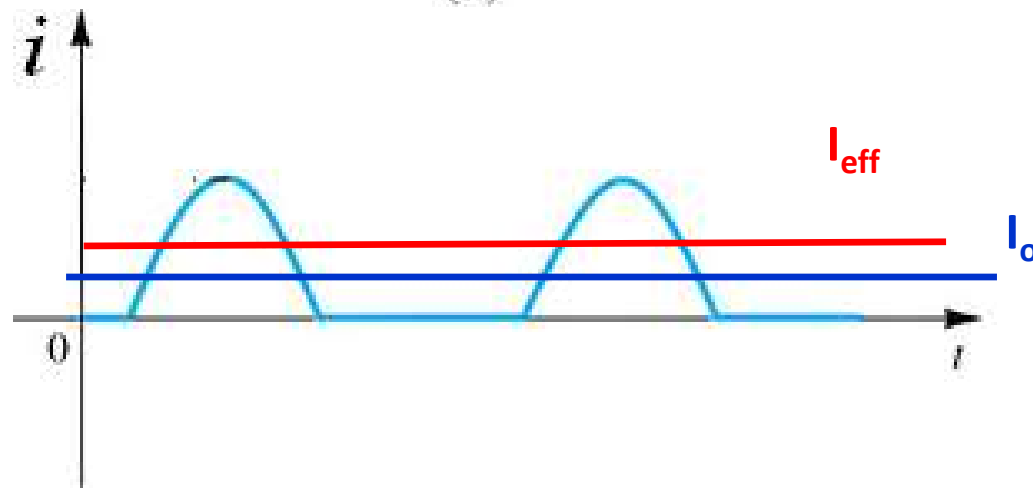
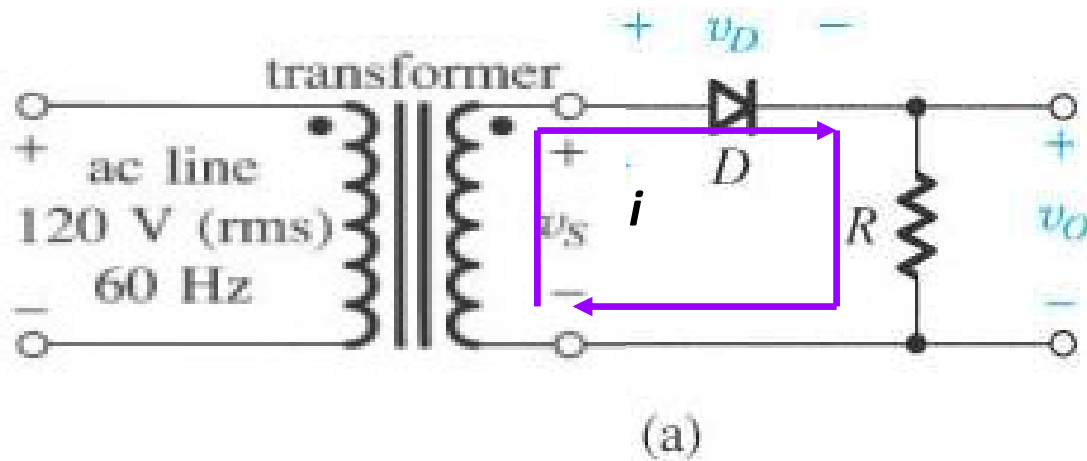
## Linearni model realne diode





## Jednostrano usmeravanje

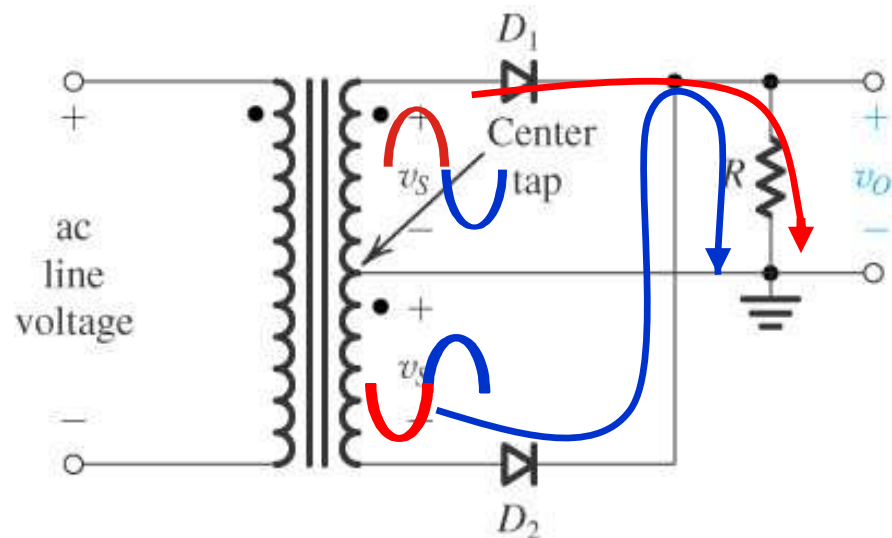
Kroz sekundar transformatora protiče i jednosmerna struja, čime se kvare performanse transformatora usled pojave premagnjećenja jezgra



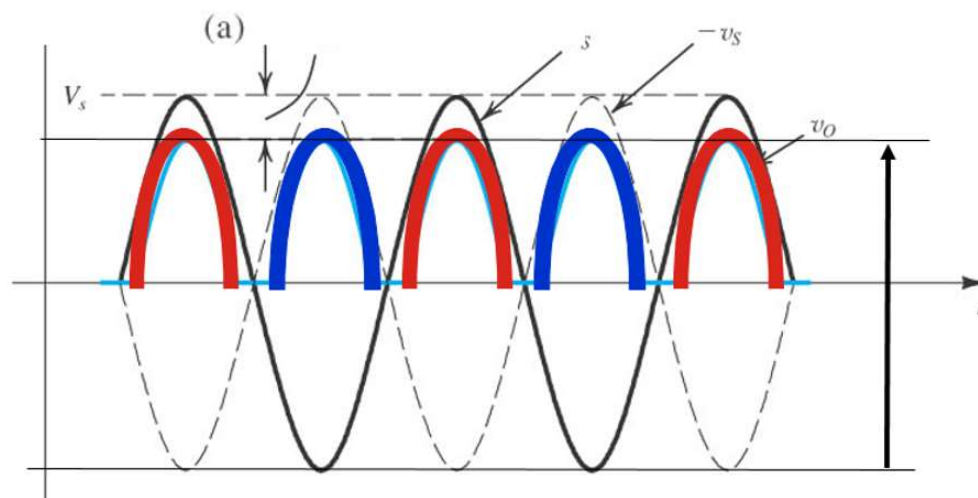
## Dvostrani usmerač

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 sekundara transformatora su iste amplitude a suprotne faze.

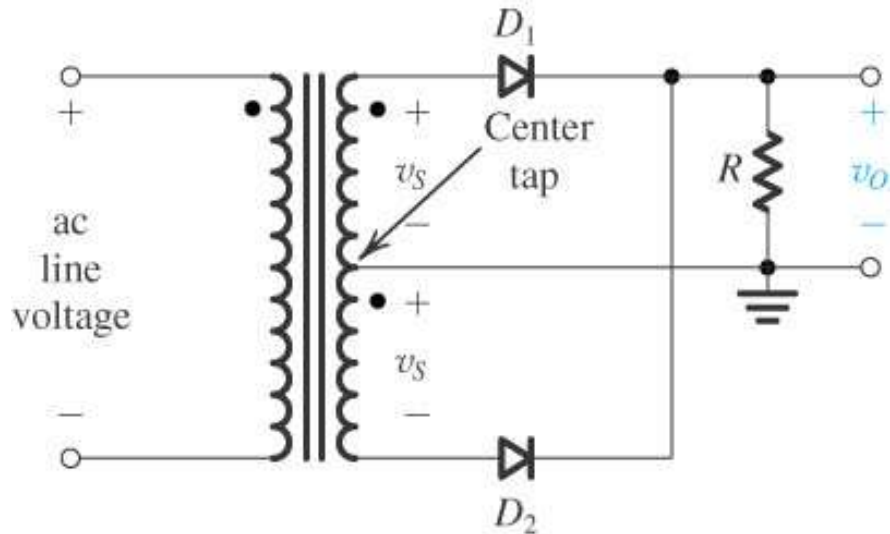
Efekat je kao da smo spojili dva jednostrana usmerača. Svaka od dve diode provodi jednu poluperiodu signala, jedna pozitivnu a druga negativnu.



(a)



## Dvostrano usmeravanje



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

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

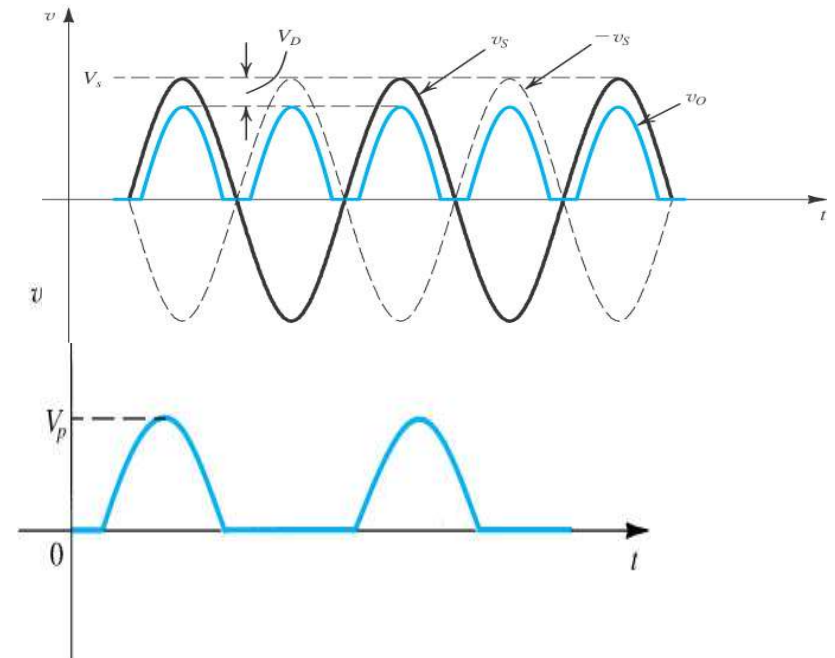
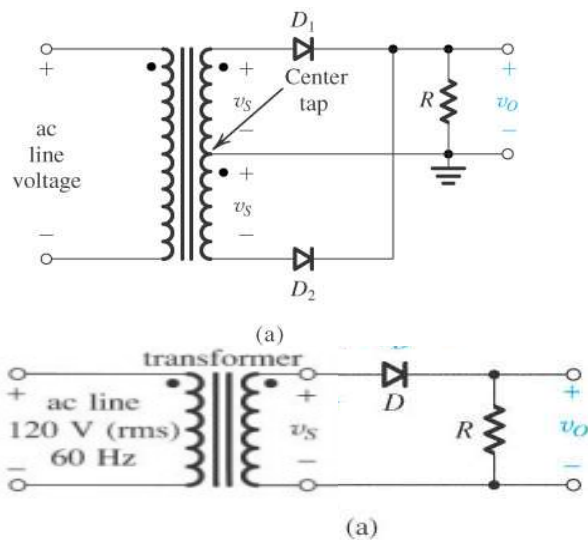
$$V_o = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} V_m \cdot \sin(\omega t) dt - \frac{2}{T} \int_{T/2}^T V_m \cdot \sin(\omega t) dt$$

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

Jednosmerna komponenta napona u dvostranom usmeraču je:

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

## Poređenje dvostranog i jednostranog usmerača

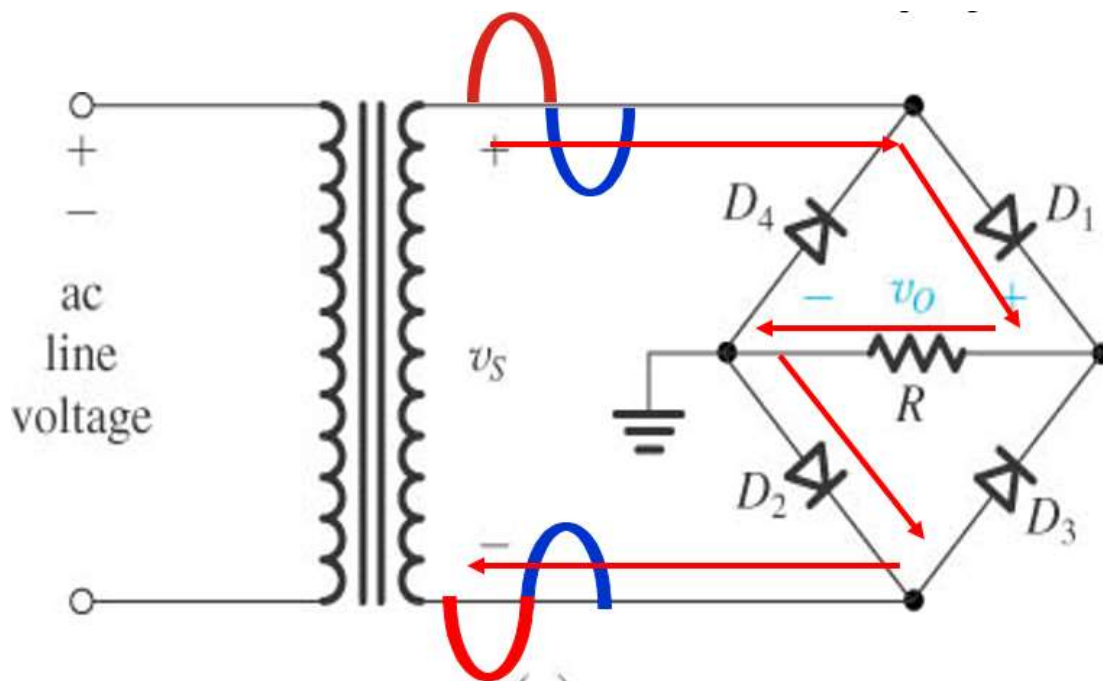


- + Ukupna jednosmerna komponenta udvostručena
- + Na potrošaču samo parni harmonici napona (manja izobličenja)
- + Kroz sekundar ne protiče jednosmerna komponenta struje
  - Sekundar mora da ima simetrični izlaz
  - Najveći inverzni napon na diodi je  $\approx 2V_m$  (dvostruka amplituda ulaznog napona) što je duplo veća vrednost u odnosu na jednostrani usmerač.

## Dvostrano usmeravanje

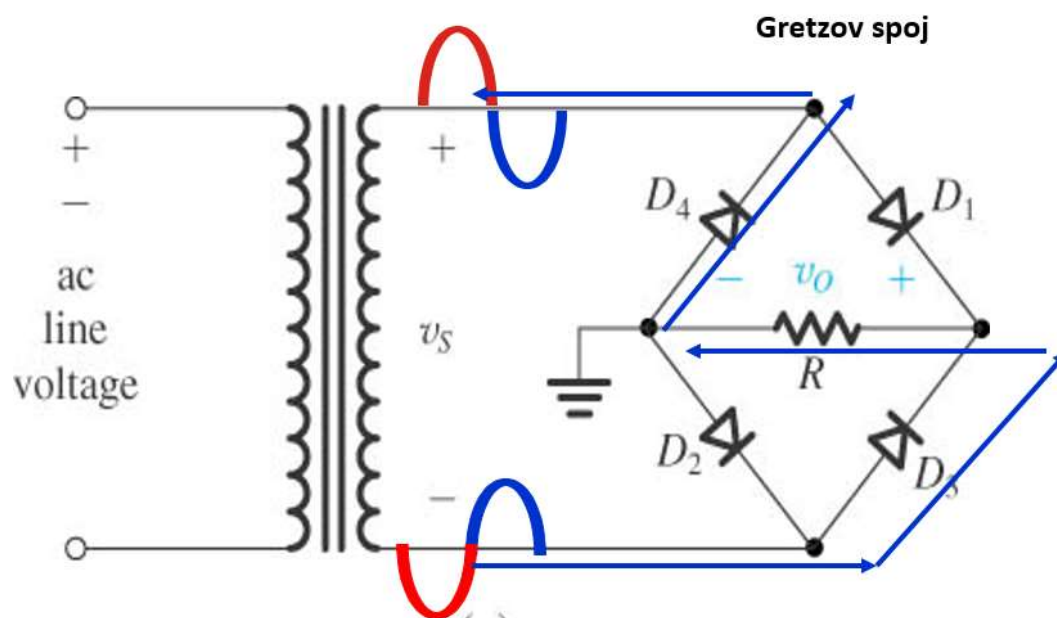
### Grečov spoj (Gretz)

Mostni ispravljač funkcioniše na takav način da dve od četiri diode u mostu vode istovremeno. Tokom pozitivne poluperiode diode  $D_1$  i  $D_2$  su direktno polarisane dok su diode  $D_3$  i  $D_4$  inverzno polarisane i ne vode. U tom slučaju struja protiče kroz od gornjeg kraja sekundara preko  $D_1$ ,  $R$ ,  $D_2$  do donjeg kraja sekundara.

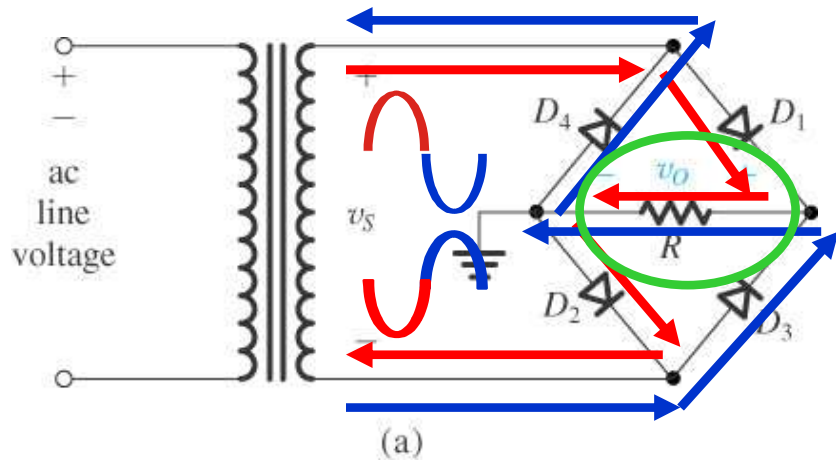


## Grecov spoj (Gretz)

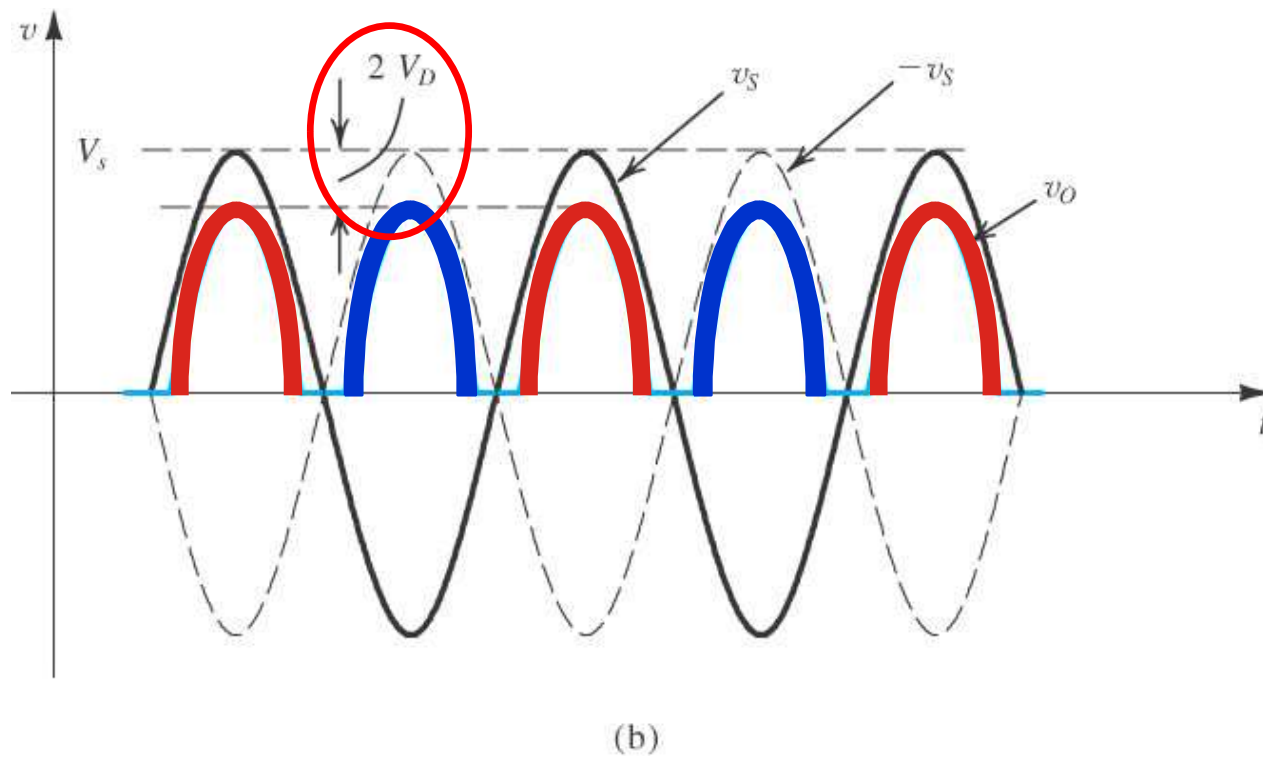
U toku sledeće poluperiode polaritet napona na transformatoru biće suprotan (označen plavom bojom). Tada će D3 i D4 biti direktno polarisane a diode D1 i D2 inverzno polarisane. Sada struja teče od donjeg kraja sekundara preko D3, R i D4 do gornjeg kraja sekundara.



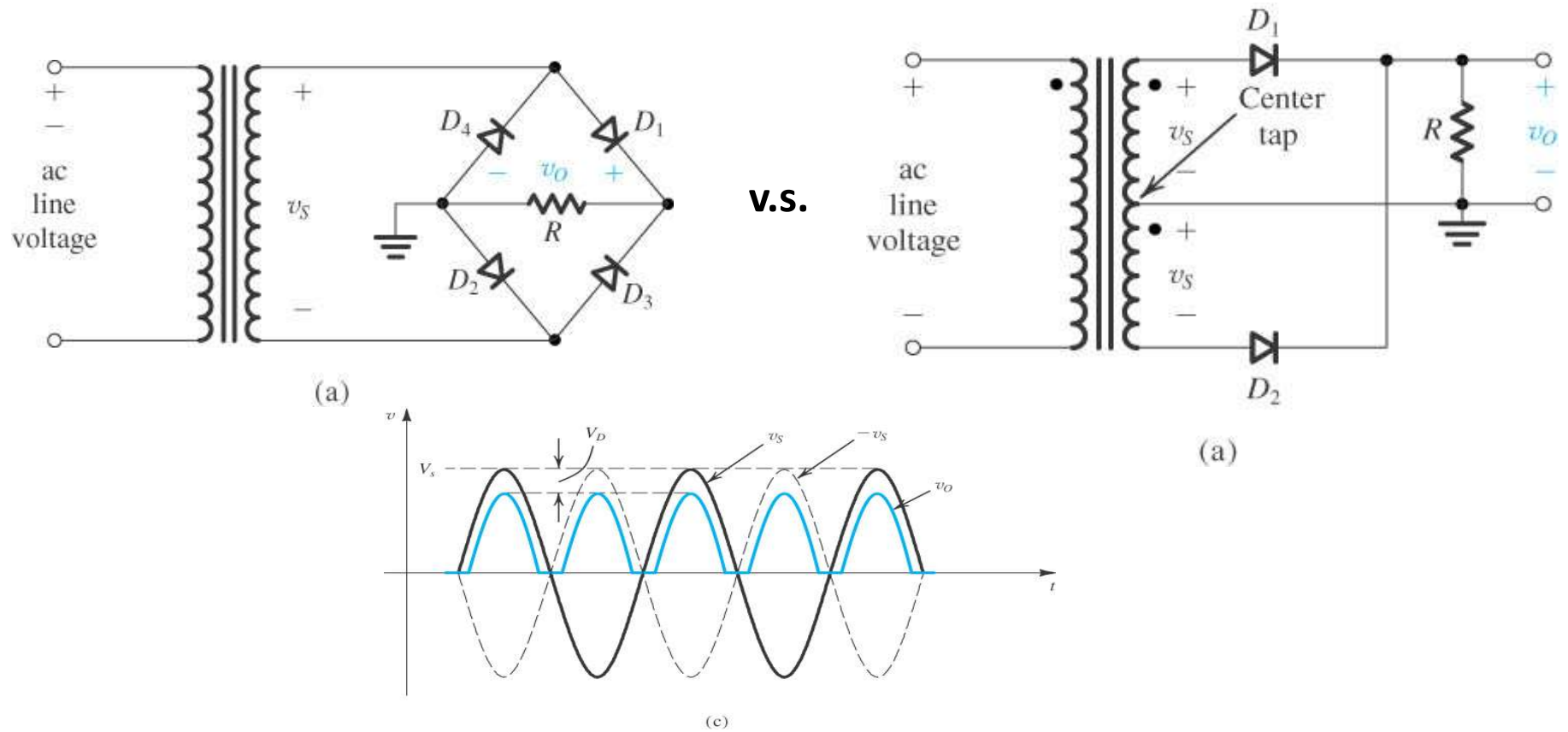
# Dvostrano usmeravanje



Gretzov spoj



## Dvostrano usmeravanje



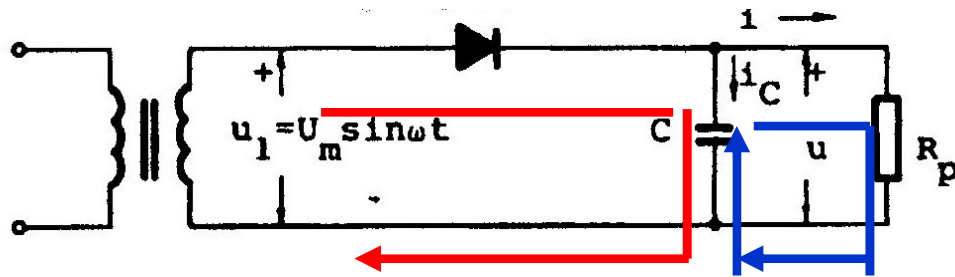
Prednost mostnog ispravljača u odnosu na običan dvostrani usmerač:

- + Sekundar NE mora da ima simetrični izlaz
- + Najveći inverzni napon na diodi je  $V_m$  a ne  $2 V_m$  !!!

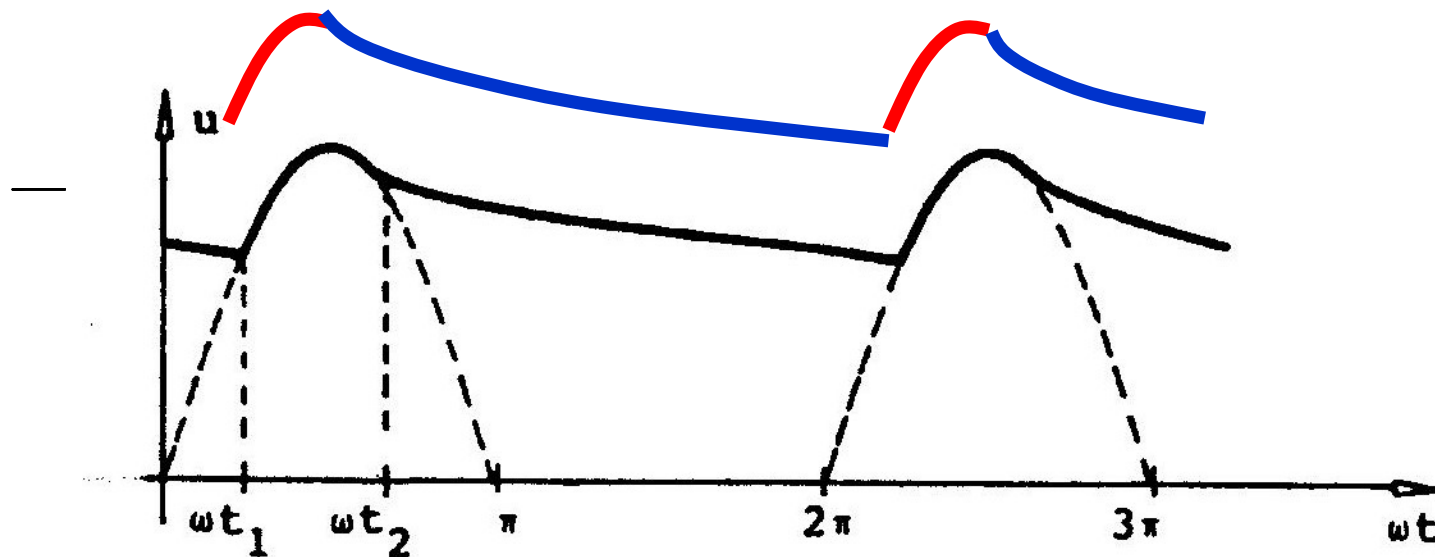


## Filtriranje usmerenog napona

### Kapacitivni filter



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 intervala kadaje napon na kondenzatoru veći od napona na transformatoru dioda ne vodi odnosno predstavlja otvoreni prekidač.

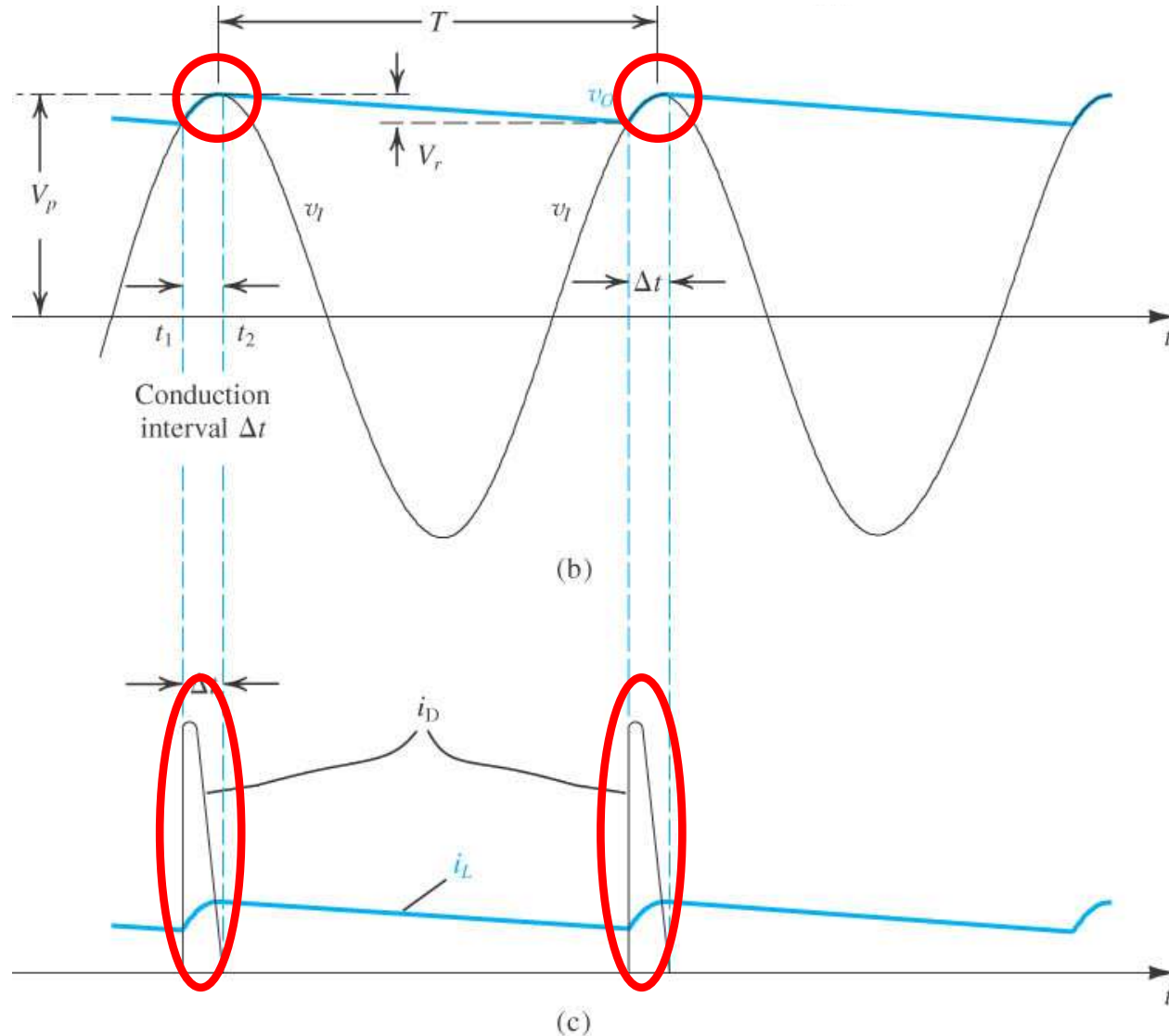
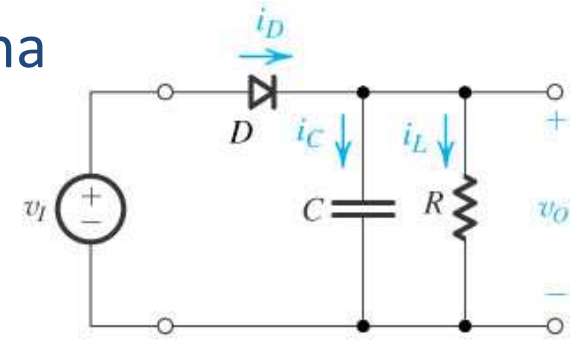


# Filtriranje usmerenog napona

## Kapacitivni filter

Dioda vodi samo u kratkom intervalu kada je anoda na višem potencijalu od katode.

Funkcionisanje kola se zasniva na činjenici da je vremeska konstanta punjenja kondenzatora ( $\tau_1=C \cdot r_d$ ) mnogo manja od vremenske konstantne pražnjenja ( $\tau_2=C \cdot R$ ).  $r_d$  je otpornost direktno polarisane diode, koja je mnogo manja od  $R$ . Kao posledica toga vremenski intervali punjenja biće mnogo kraći od vremenskog intervala pražnjenja.

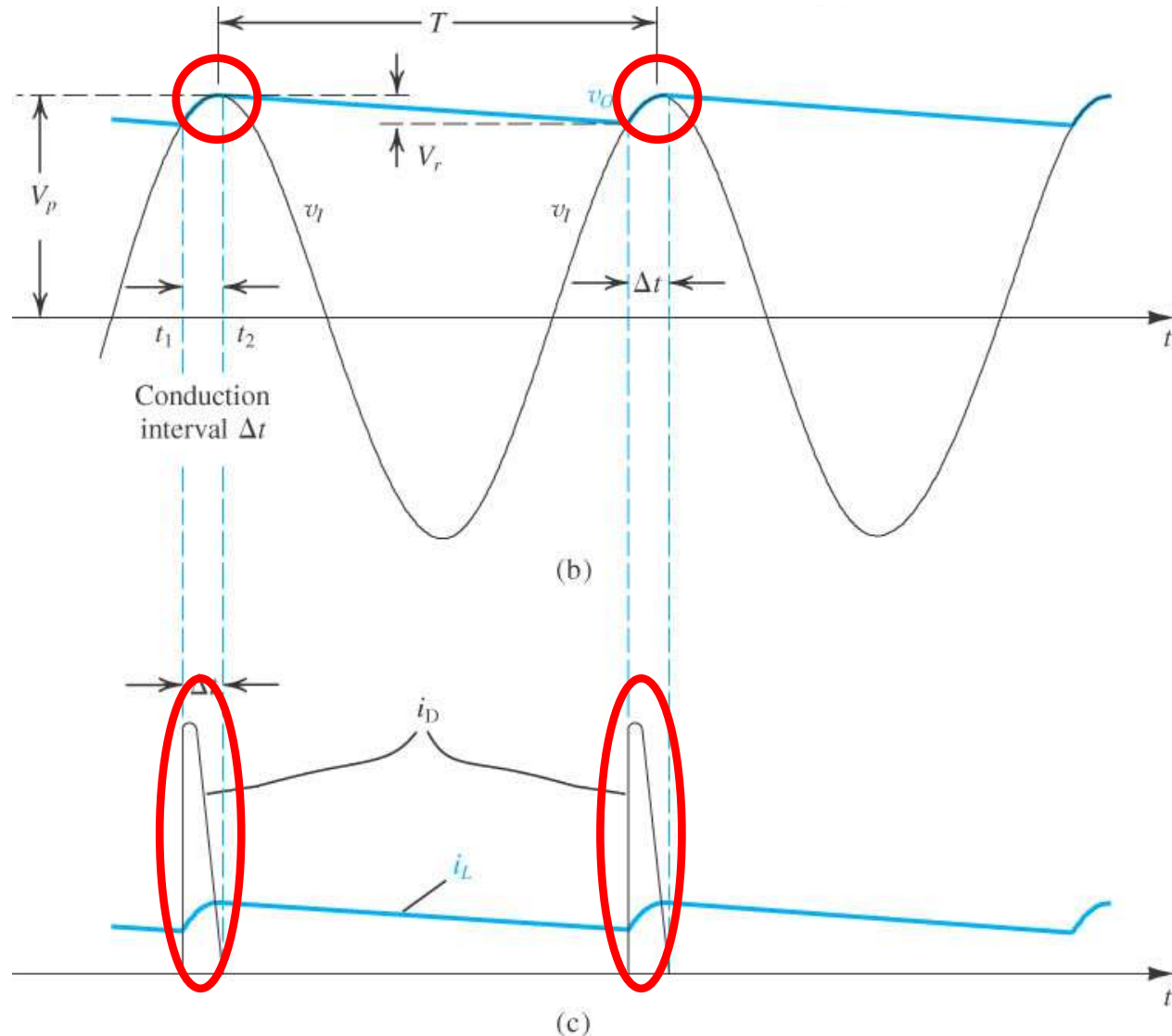
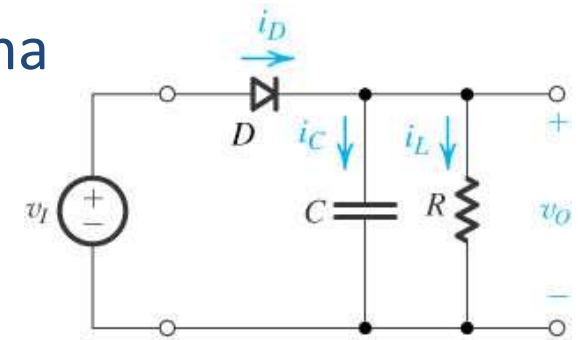


## Filtriranje usmerenog napona

### Kapacitivni filter

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

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



## Filtriranje usmerenog napona

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

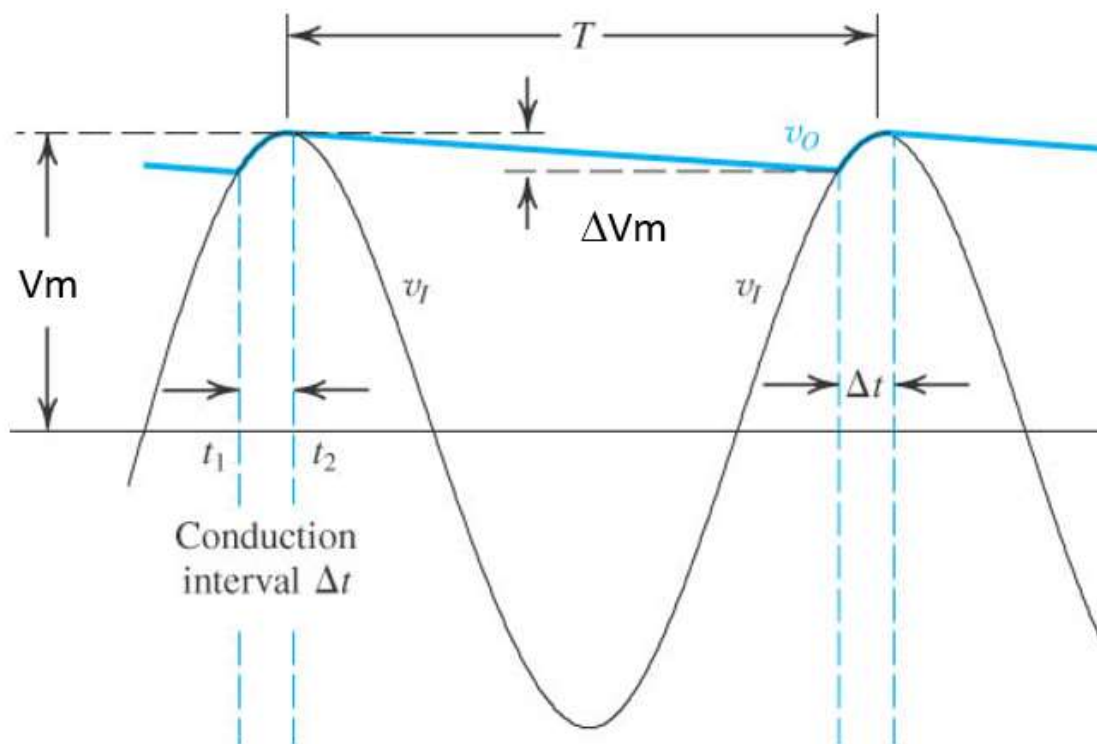
$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots$$

Ukoliko se u Tajlorovom razvoju zanemare sabirci čiji je stepen veći od jedan dobija se:

Minimalni napon na kondenzatoru biće u trenutku  $T - \Delta t$ :

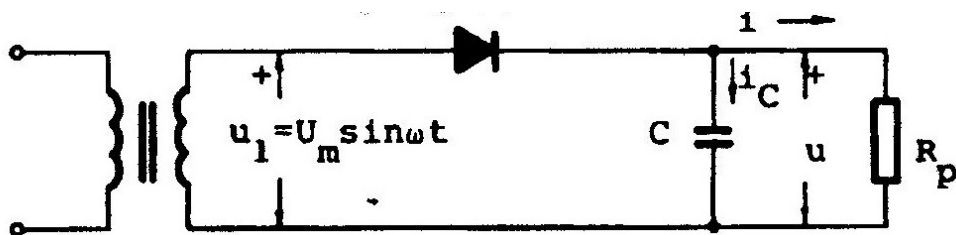
$$V_{out}(t) \approx V_m \cdot \left( 1 - \frac{t}{R_p C} \right)$$

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



## Filtriranje usmerenog napona

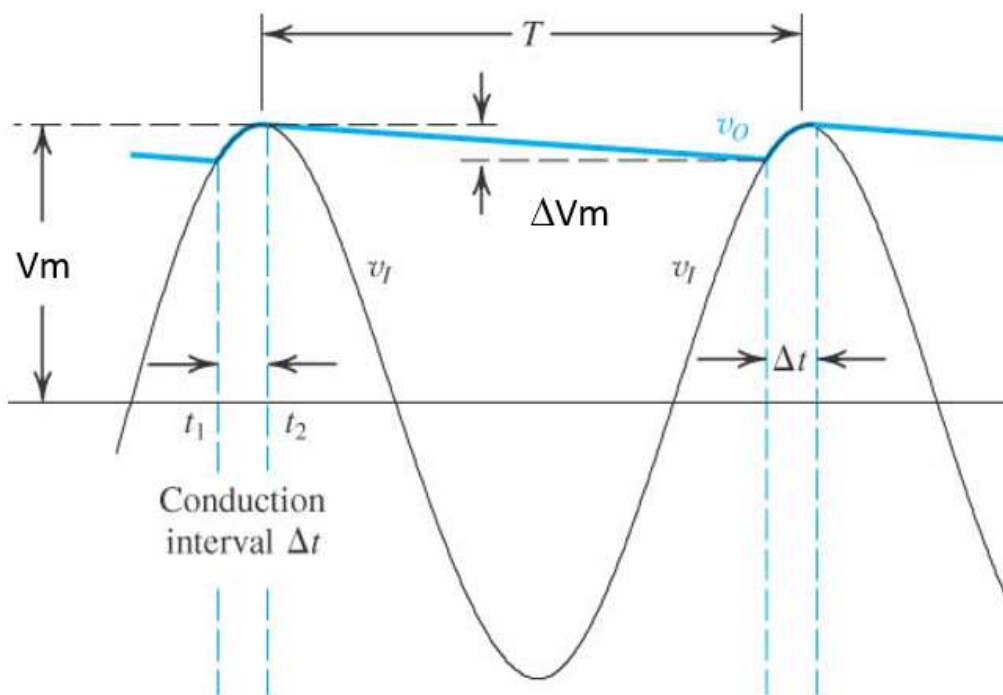
Razlika između masimalnog i minimalnog napona na kondenzatoru naziva se **talasnost (ripple)**.



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

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

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



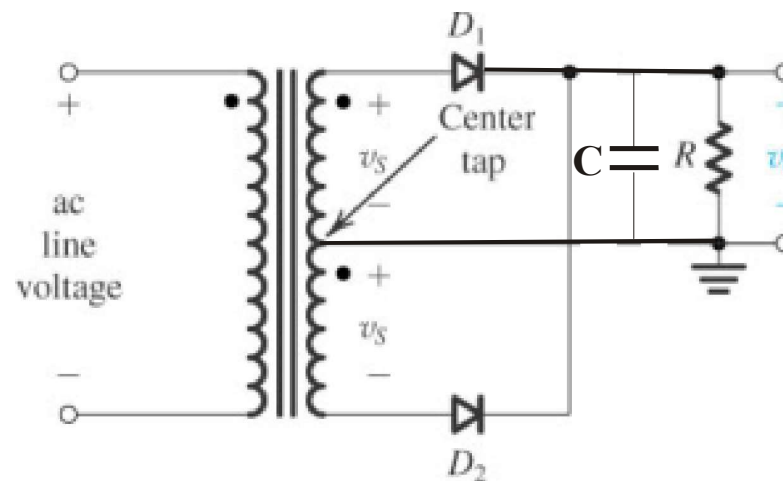
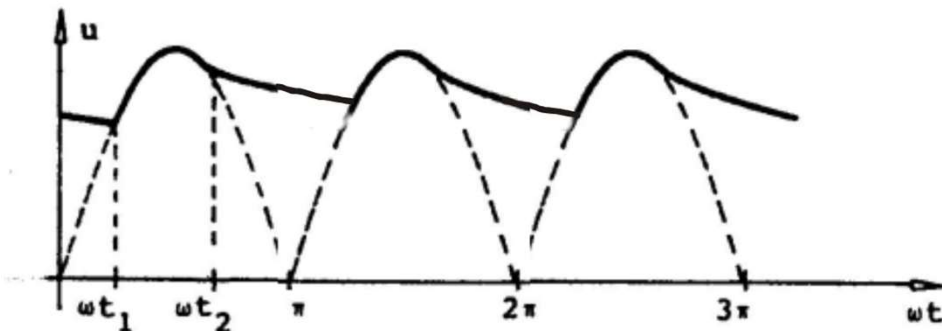
$\Delta t$  je period vremena u toku koga dioda vodi

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

**Talasnost filtra,  $\Delta V$ , je obrnuto srazmerna kapacitivnosti kondenzatora i otpornosti potrošača.**

## Filtriranje usmerenog napona

### Kapacitivni filter – dvostrano



Perioda je smanjena na  $T/2$  tako da je

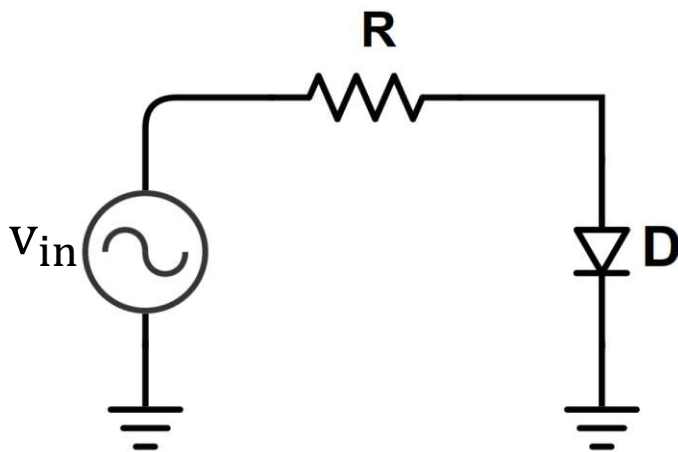
$$\Delta V \approx \frac{V_m}{R_p \cdot C \cdot 2 \cdot f}$$

$f$  je frekvencija mrežnog napona, 50 Hz.

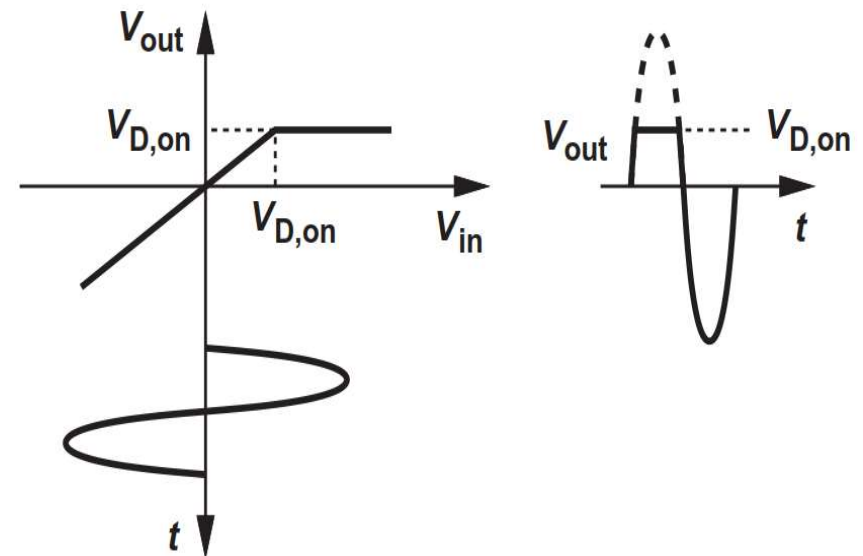
Talasnost je dva puta manja za iste vrednosti  $C$  i  $R$ . To praktično znači da je potrebno upotrebiti dva puta veću vrednost kapacitivnosti da bi dobili istu vrednost talasnosti.

## Limiteri – ograničavači napona

Limiter treba da propušta bez slabljenja sve signale čija je amplituda manja od zadate a da sve one čija je vrednost amplitude veća potisne. 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.



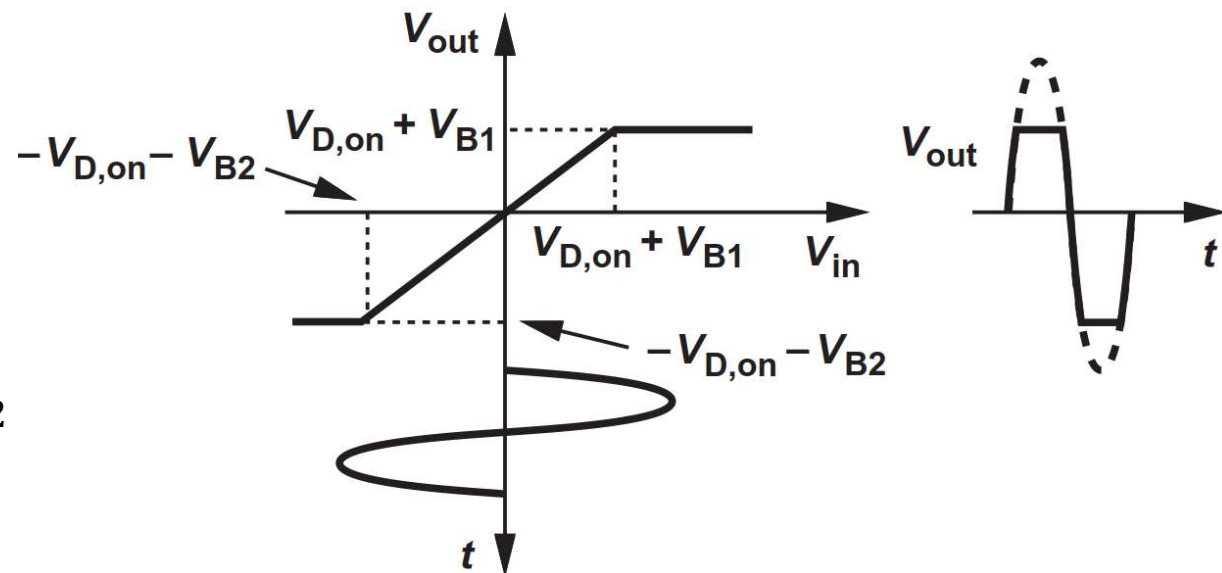
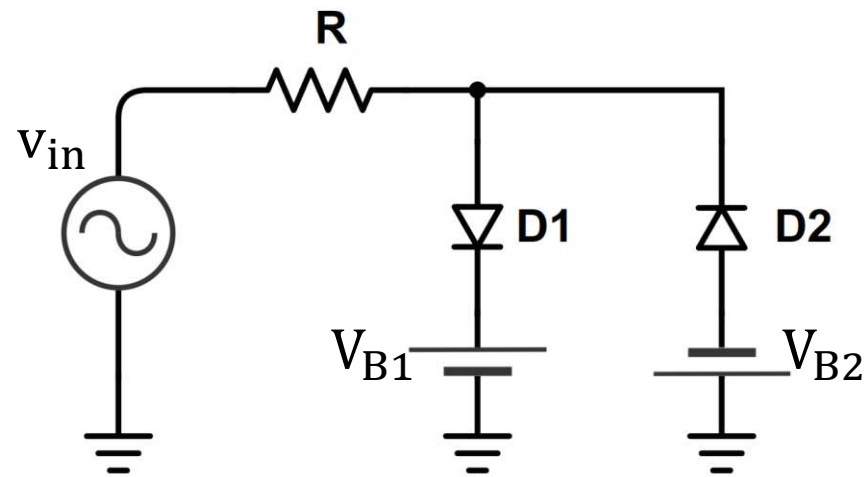
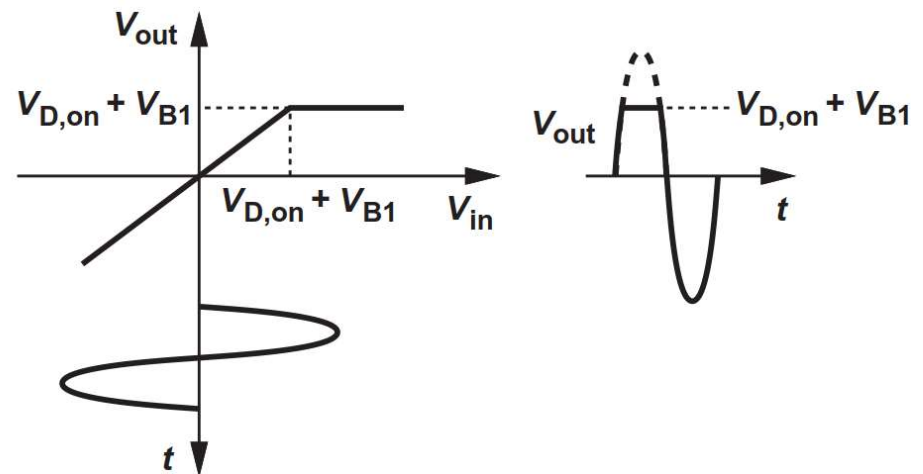
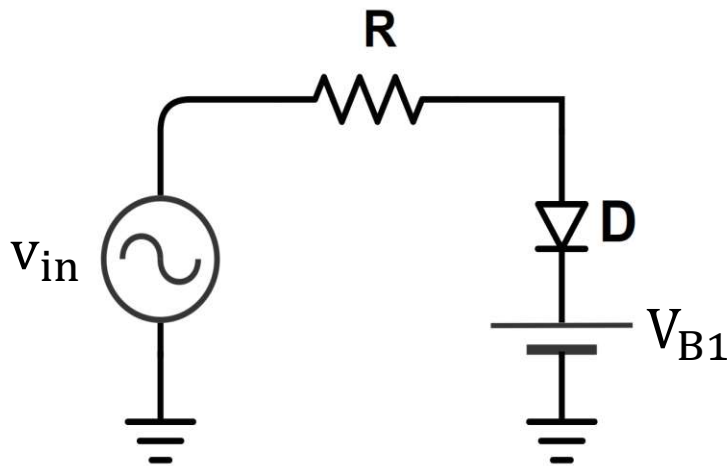
$$v_{out} = \begin{cases} v_{in} & \text{za } v_{in} < V_D \\ V_D & \text{za } v_{in} > V_D \end{cases}$$



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.

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

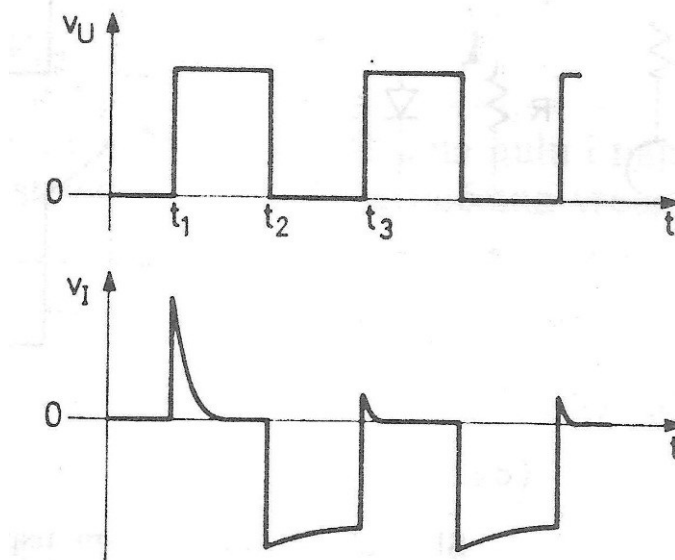
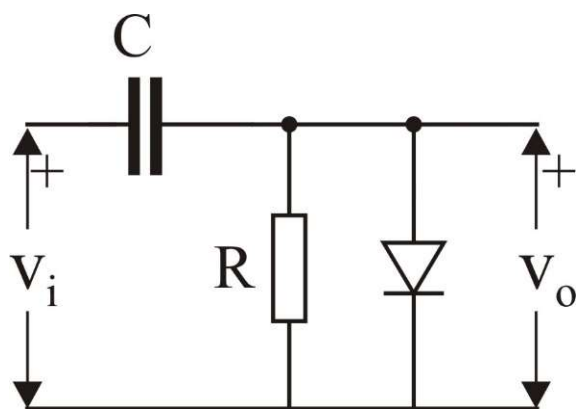




## Uspostavljači nivoa

Ova kola ne menjaju oblik signala već samo njegovu maksimalnu vrednost. Drugim rečima uspostavljač nivoa menja samo jednosmerni nivo signala. Osnovni princip rada zasniva se na različitoj vrednosti vremenske konstante u toku procesa punjenja i procesa pražnjenja kapacitivnosti. Prakticno kondenzator se ponasa kao baterija nakon sto se napuni.

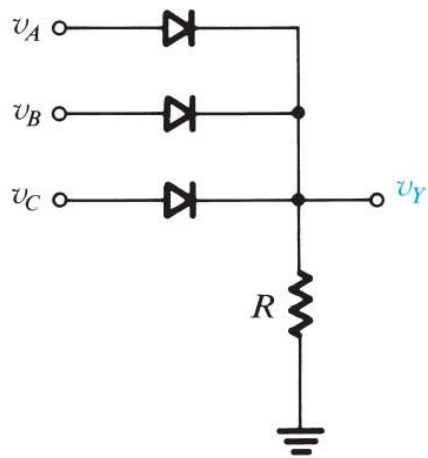
- Kada je napon na ulazu pozitivan dioda vodi i kondenzator se puni. Vremenska konstanta punjenja kondenzatora je mala i iznosi:  $\tau_1 = C \cdot (r_D || R + R_g)$   
 $r_D$  je otpornost direktno polarisane dioda i ona je veoma mala, dok je  $R_g$  unutrašnja otpornost generatora.  $R \gg r_D \Rightarrow r_D || R \approx r_D$   
Vremenska konstantna je veoma mala pa je i brzina punjenja kondenzatora velika.
- Kada napon je napon na ulazu negativan ili nula kondenzator počinje da se prazni ali pri tome dioda ne vodi i vremenska konstanta je znatno veća  $\tau_2 = C \cdot R$  pa je i brzina pražnjenja mnogo manja u odnosu na brzinu punjenja.



## Logička kola sa diodama

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

Diodno logičko ILI kolo



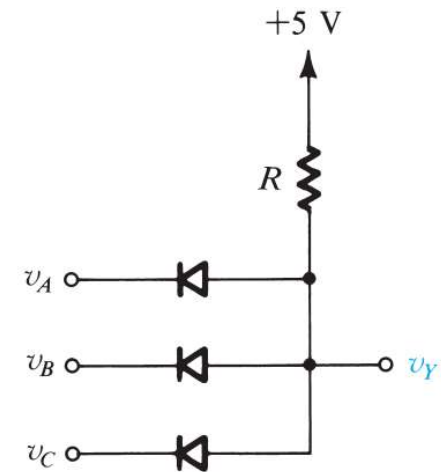
$$Y = A + B + C$$

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 da provede i napon na izlazu će biti

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

što odgovara logičkoj jedinici.

Diodno logičko I kolo



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

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 da provede i napon na izlazu će biti

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

što odgovara logičkoj nuli.

## Elementarna pitanja

1. Strujno naponska karakteristika diode i oblasti rada diode
2. Linearizovani modeli diode za velike signale
3. Dinamička otpornost diode (grafička predstava, jednačina)

## Ostala ispitna pitanja

1. Kapacitivnost prostornog naleketrisanja, modeli diode za visoke frekvencije
2. Difuziona kapacitivnost, modeli diode za visoke frekvencije
3. Temperaturska zavisnost modela diode
4. Šotki dioda, Varikap dioda, Zener dioda
5. Foto dioda, LED, optoizolator
6. Jednostrani i dvostrani usmerač (električne šeme, talasni oblicinapona, osobine)
7. Talasnost kapacitivnog filtra
8. Limiteri i uspostavljači nivoa