



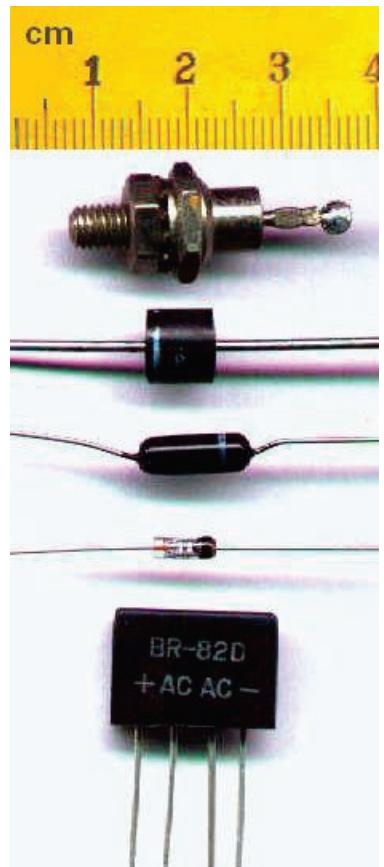
# **PN spoj, poluprovodnička dioda**

**Marko Dimitrijević**

# Poluprovodničke diode

- Najjednostavniji poluprovodnički elementi su **poluprovodničke diode**, koje su sačinjene od dve različito dopirane oblasti, **P-tipa i N-tipa**. Ova struktura se naziva **PN spoj**.
- Postoji više tipova poluprovodničkih dioda, koje imaju različitu strukturu, svojstva, karakteristike i primene: PN dioda, PIN dioda, Zener dioda, Šotkijeva dioda, tunel dioda, varikap dioda, LED, laserska dioda, itd.
- Zajednička osobina svih dioda je da imaju dva priključka – **anodu (A)** i **katodu (K)**, koja su povezana za dve različito dopirane poluprovodničke oblasti, **P oblast i N oblast**. Dioda je poluprovodnički **dvopol**.

# PN dioda



Različiti tipovi dioda  
(Izvor: Wikipedia.com)



Struktura PN diode



Simbol PN diode

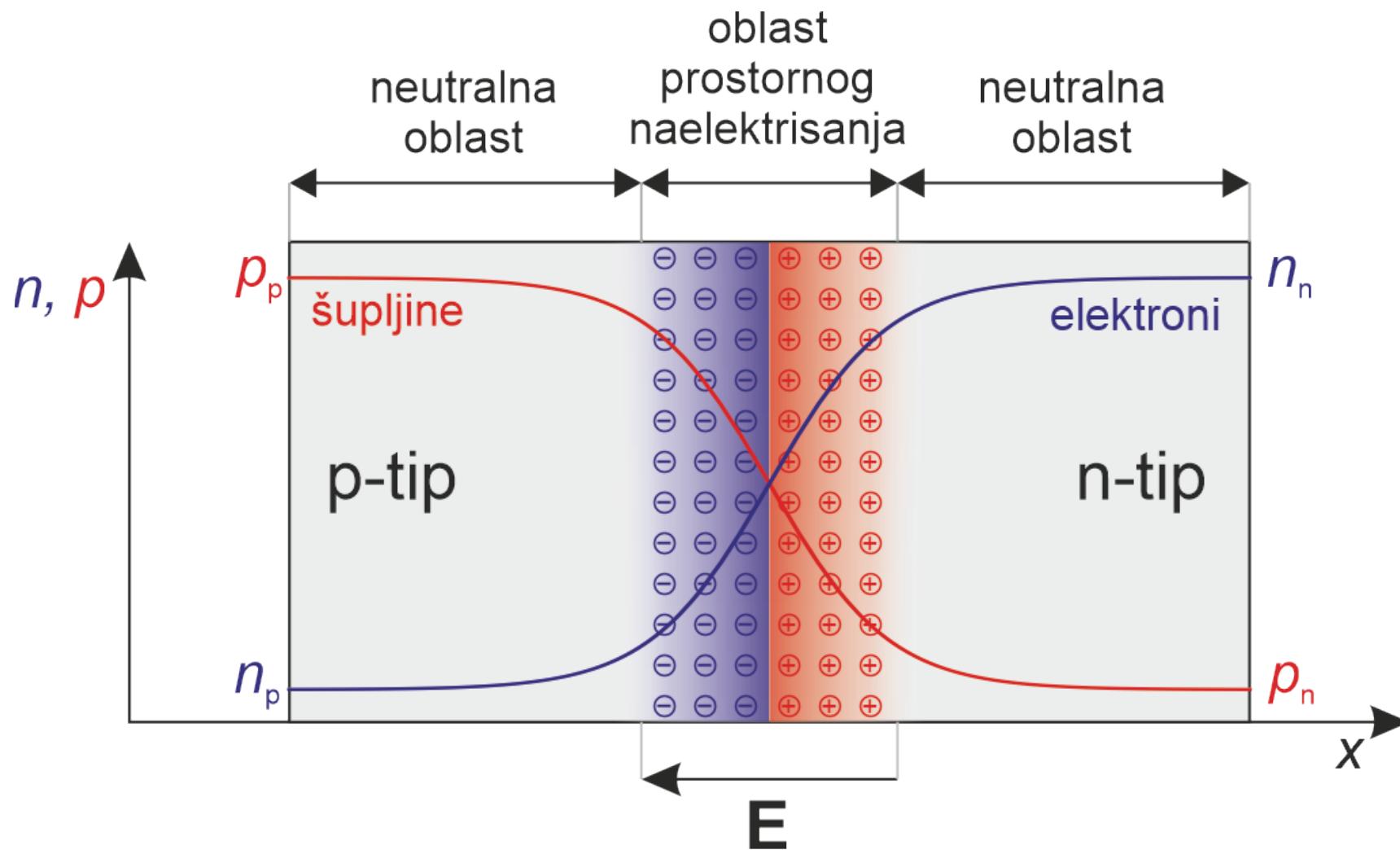
# Polarizacija PN spoja

- Napon na diodi je razlika napona na anodi i katodi:

$$V_D = V_A - V_K$$

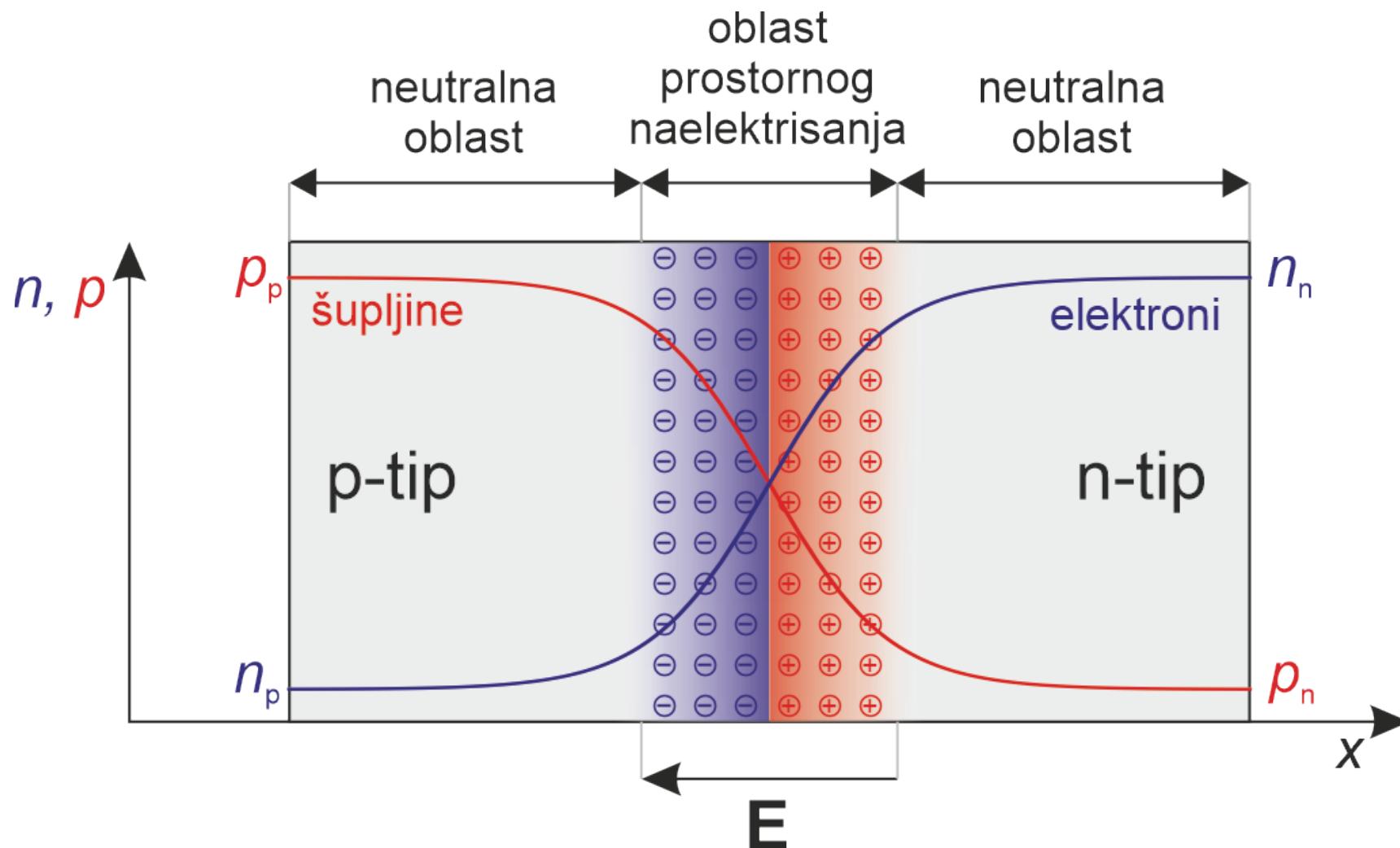
- PN spoj može biti **nepolarisan ( $V_D=0$ )**, **direktno polarisan ( $V_D>0$ )** i **inverzno polarisan ( $V_D<0$ )**.
- Oblasti rada poluprovodničke diode zavise od napona na diodi.

# PN spoj i poluprovodničke diode



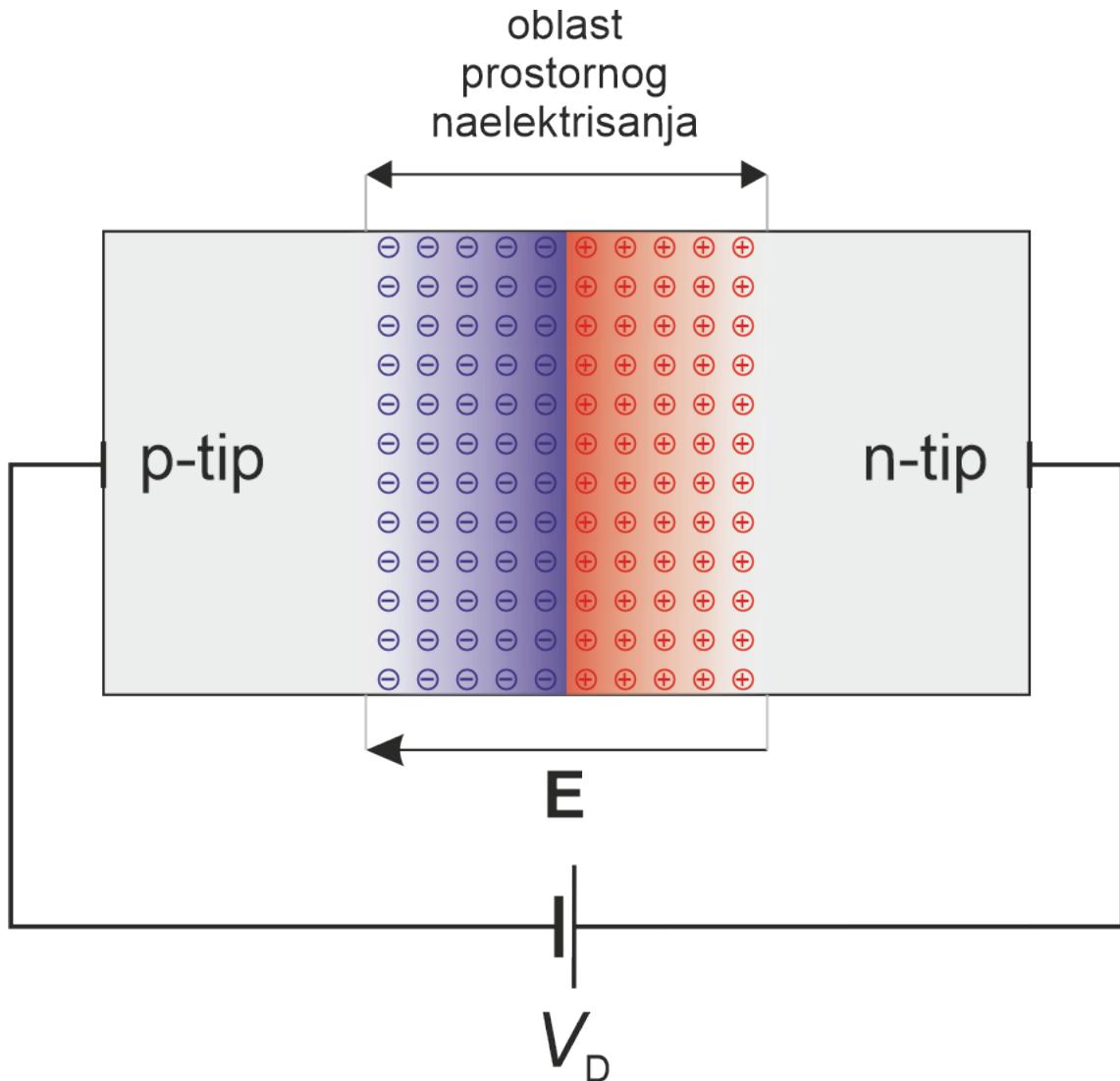
- Usled difuzije, elektroni prodiru iz oblasti n-tipa u oblast p-tipa, a šupljine iz oblasti p-tipa u oblast n-tipa. Formira se oblast **prostornog nanelektrisanja**, ili **osiromašena oblast**, koja nema slobodnih nosilaca.

# PN spoj i poluprovodničke diode



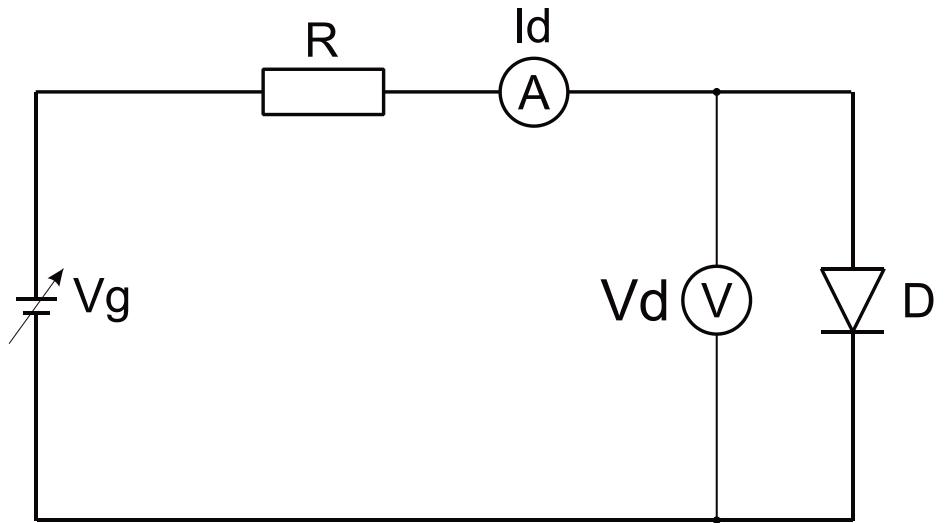
- Oblast prostornog nanelektrisanja nije električno neutralna.
- Uspostavlja se polje  $\mathbf{E}$  koje sprečava dalju difuziju elektrona i šupljina.
- Ravnoteža se uspostavlja kada se struja difuzije i struja drifta izjednače.

# Inverzno polarisani PN spoj

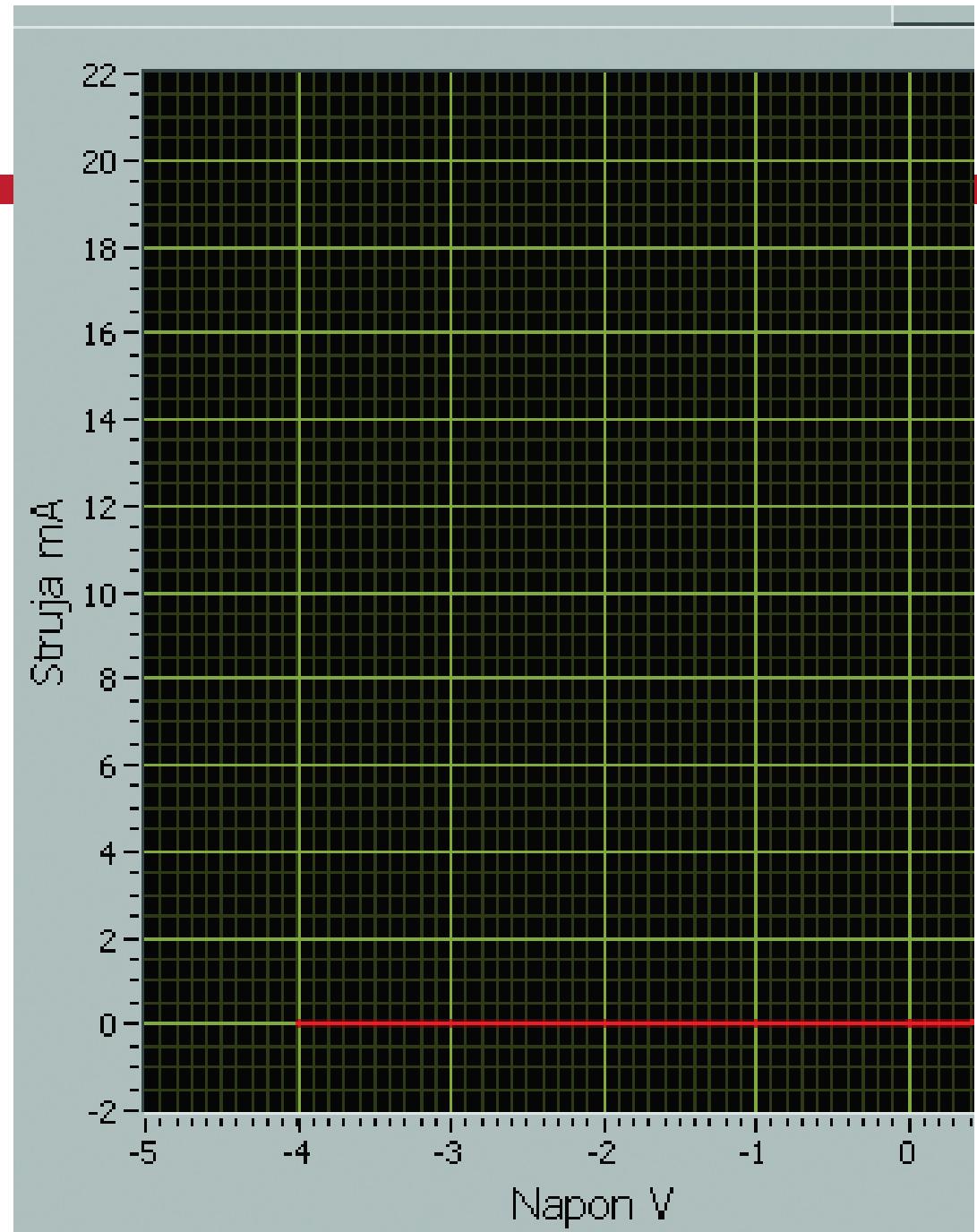


- Oblast prostornog nanelektrisanja (osiromašena oblast) kod inverzno polarisanog PN spoja je šira.
- Osiromašena oblast se ponaša kao izolator, struja koja protiče kroz PN spoj je vrlo mala

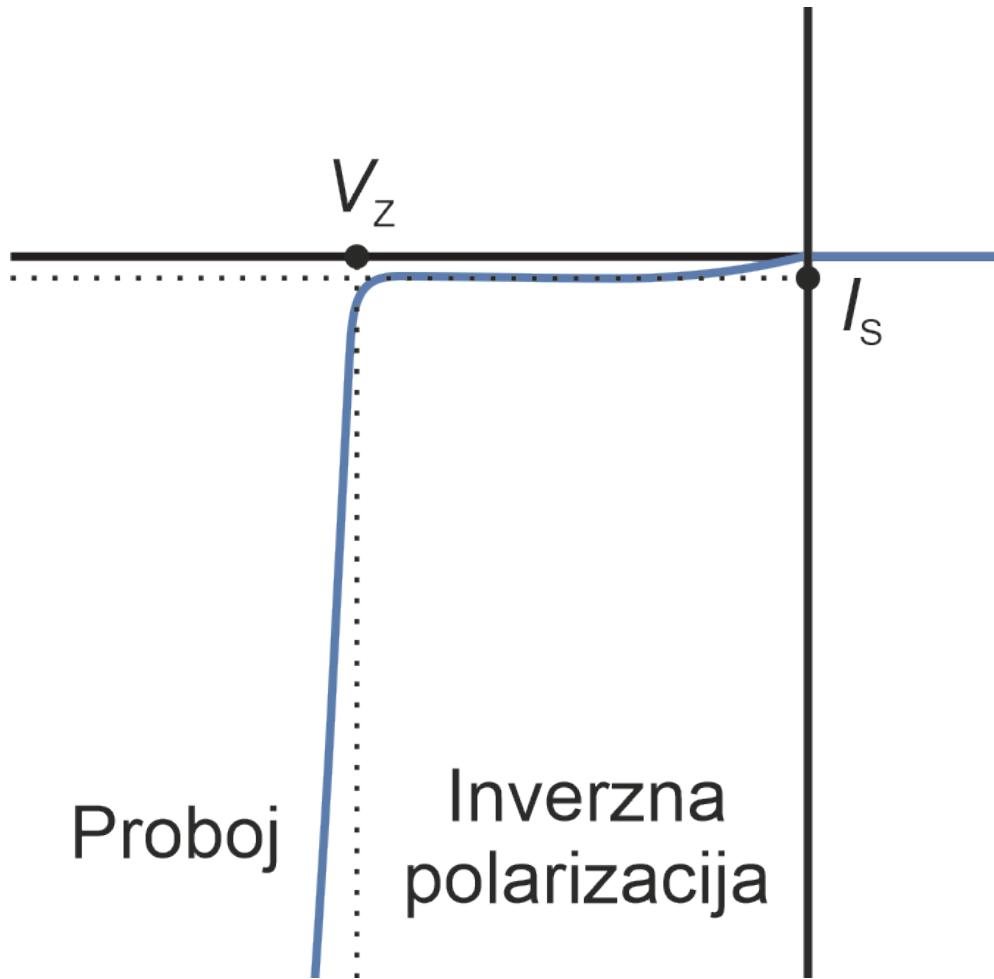
# Inverzno polarisani PN spoj



$$V_g < 0$$

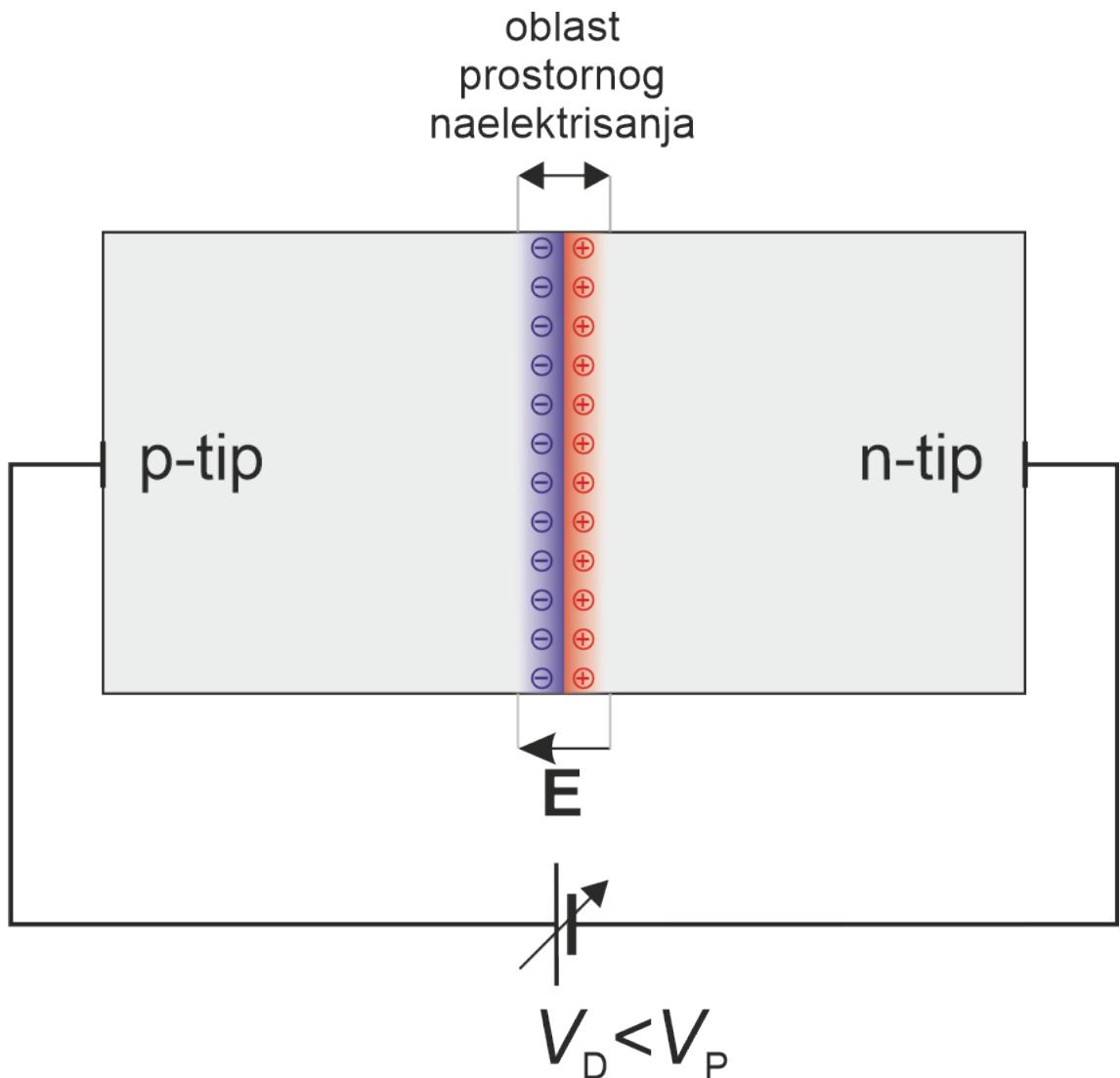


# Strujno-naponska k. inverzno polarisanog PN spoja



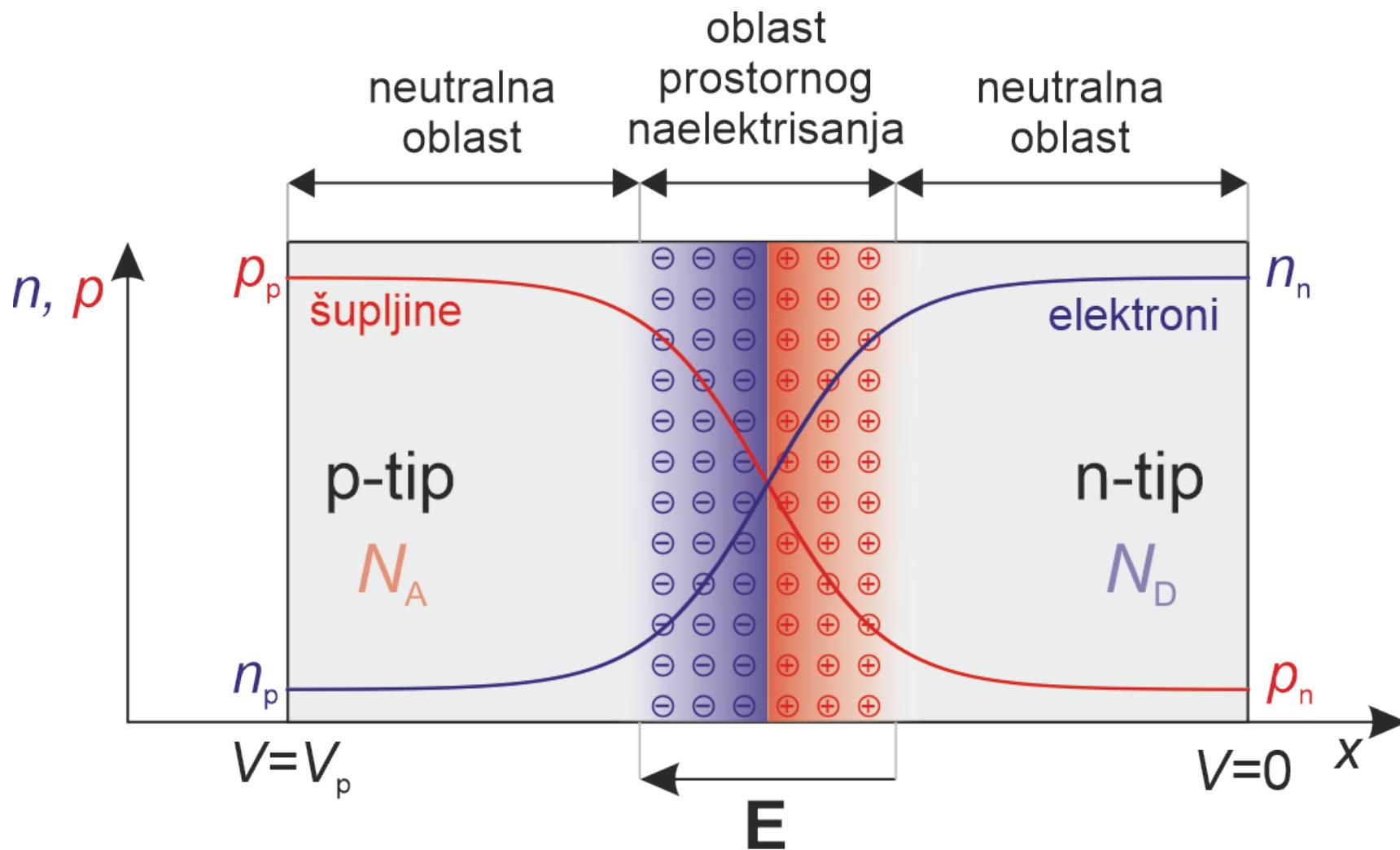
- $I_s$  je inverzna struja zasićenja diode. Ova struja je konstantna, zavisi od dimenzija PN spoja, poluprovodničkog materijala i koncentracija dopanata u P i N oblasti.
- U oblasti inverzne polarizacije, struja diode  $I_s$  je izuzetno mala (reda veličine  $10^{-10}\text{A}$ ). U ovoj oblasti, dioda se u kolu ponaša praktično kao **otvorena grana (prekid)**.

# Direktno polarisani PN spoj



- Pri direktnoj polarizaciji, električno polje prostornog naelektrisanja se smanjuje pod uticajem napona na diodi.
- Kada napon  $V_D$  dostigne napon provođenja  $V_P$ , dioda provodi.
- Napon provođenja zavisi od tipa poluprovodnika, temperature i koncentracije donora/akceprora.
- Napon  $V_P$  je određen električnim poljem prostornog naelektrisanja.

# PN spoj i poluprovodničke diode

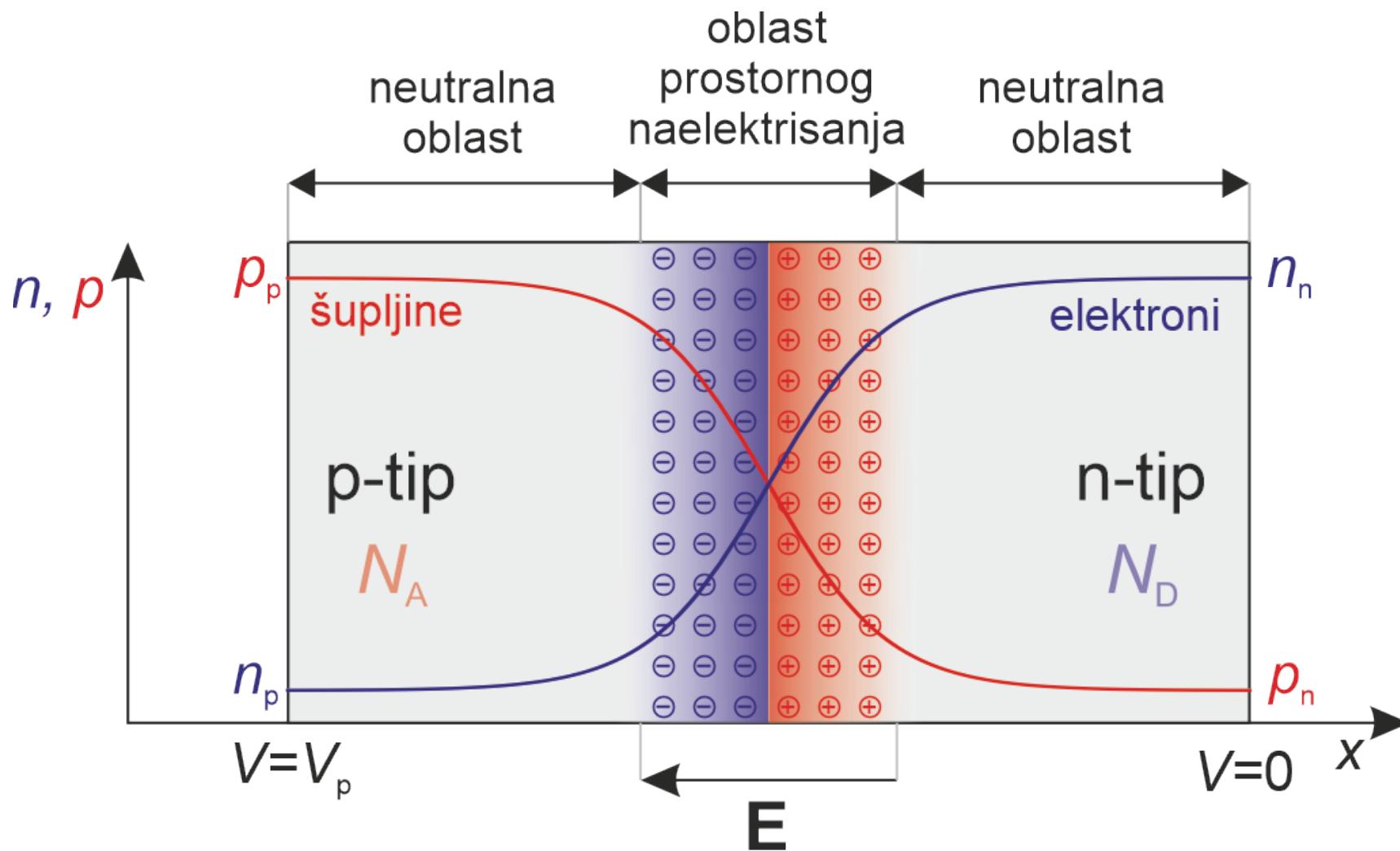


$$I_{\text{drift}} = s \cdot q_e \cdot n \cdot \mu_n \cdot E$$

$$I_{\text{dif}} = s \cdot q_e \cdot D_n \cdot \frac{dn}{dx}$$

$$D_n \cdot \frac{dn}{dx} = n \cdot \mu_n \cdot E$$

# PN spoj i poluprovodničke diode



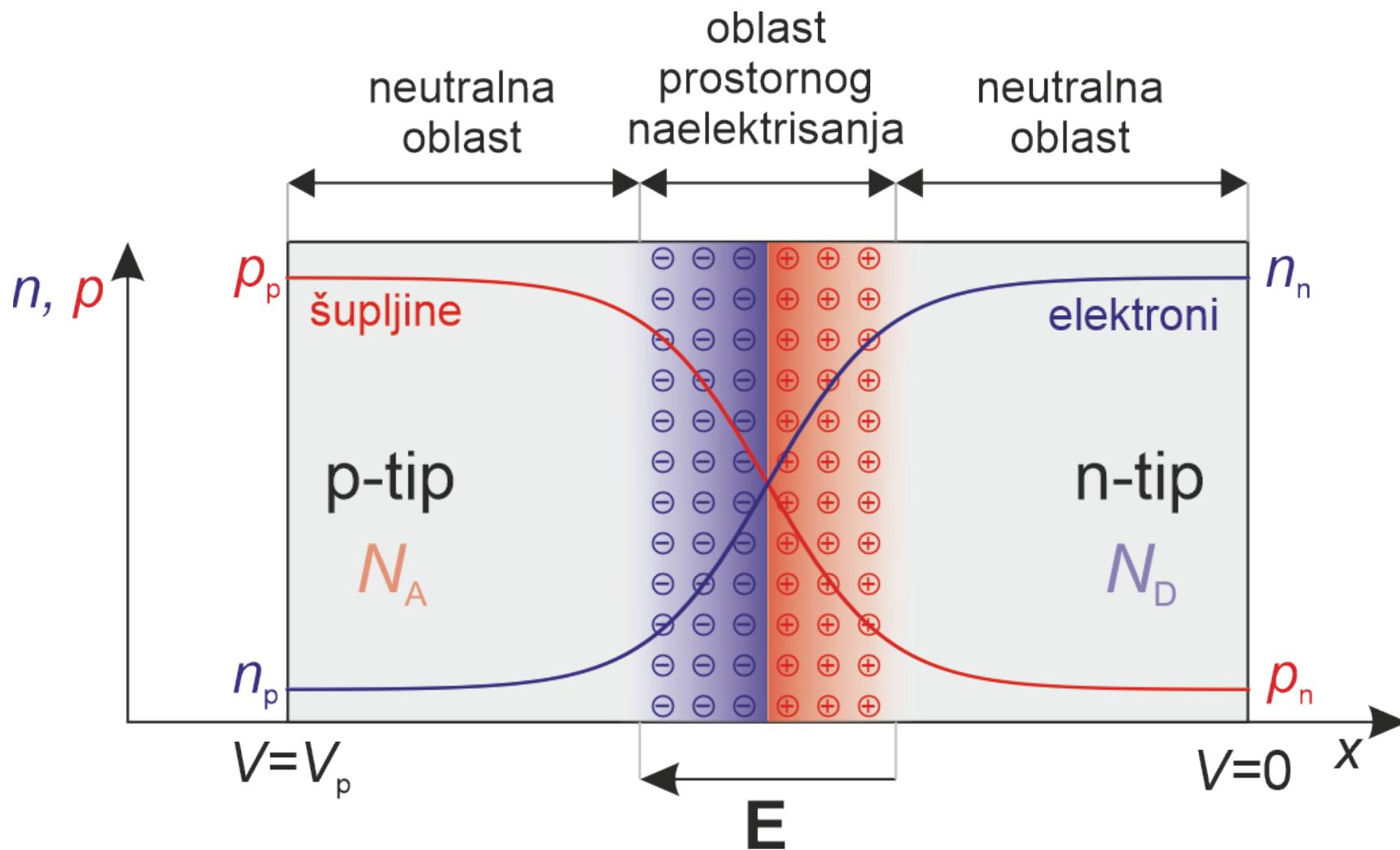
$$E = -\frac{dV}{dx}$$

$$D_n \cdot \frac{dn}{dx} = -n \cdot \mu_n \cdot \frac{dV}{dx}$$

$$dV = -\frac{D_n}{\mu_n} \cdot \frac{dn}{n}$$

$$\int_{V_p}^0 dV = - \int_{n_p}^{n_n} \frac{D_n}{\mu_n} \cdot \frac{dn}{n}$$

# PN spoj i poluprovodničke diode

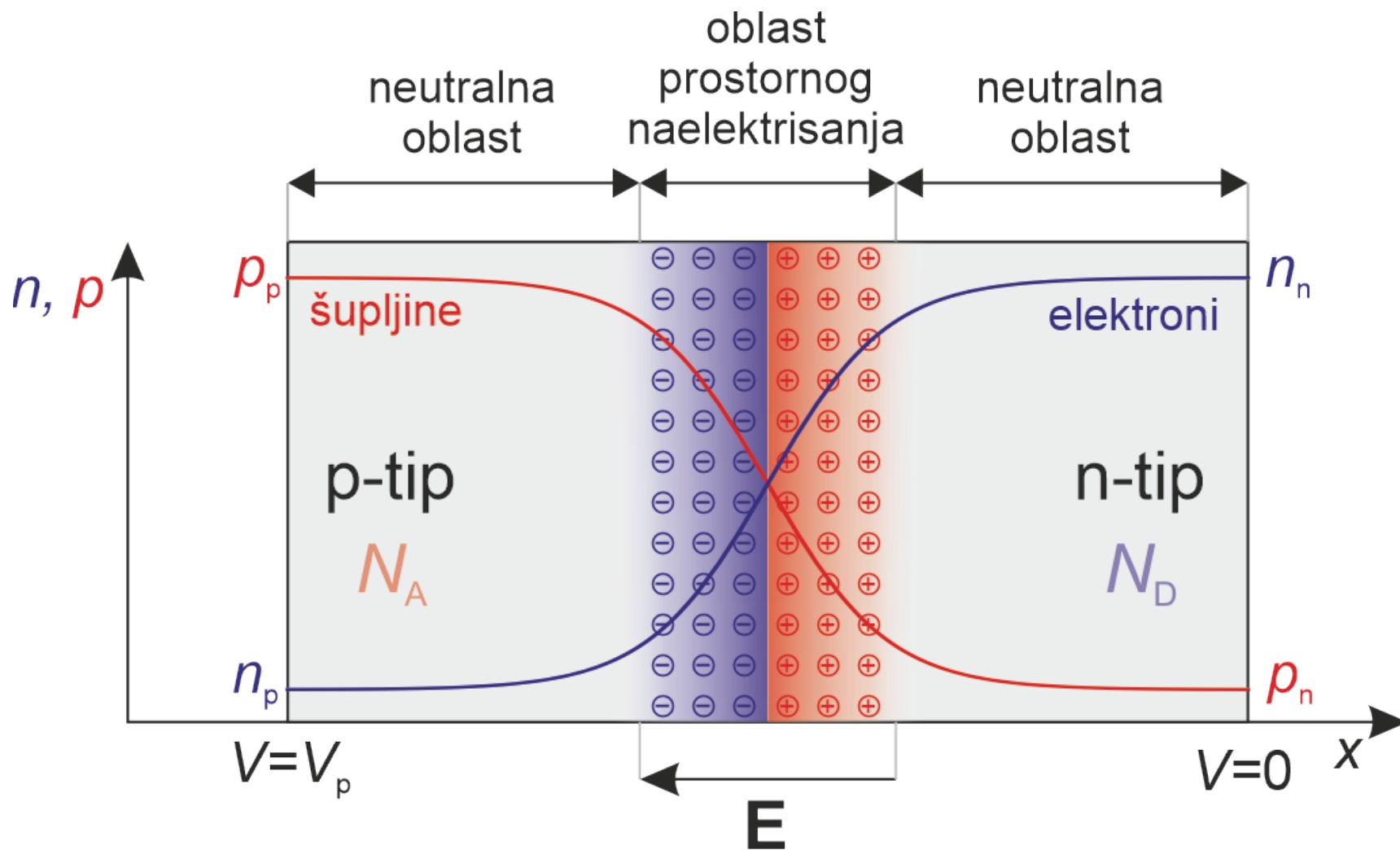


$$\int_{V_p}^0 dV = - \int_{n_p}^{n_n} \frac{D_n}{\mu_n} \cdot \frac{dn}{n}$$

$$V_p = \frac{D_n}{\mu_n} \cdot \ln \frac{n_n}{n_p}$$

$$V_p = \frac{kT}{q_e} \cdot \ln \frac{n_n}{n_p}$$

# PN spoj i poluprovodničke diode



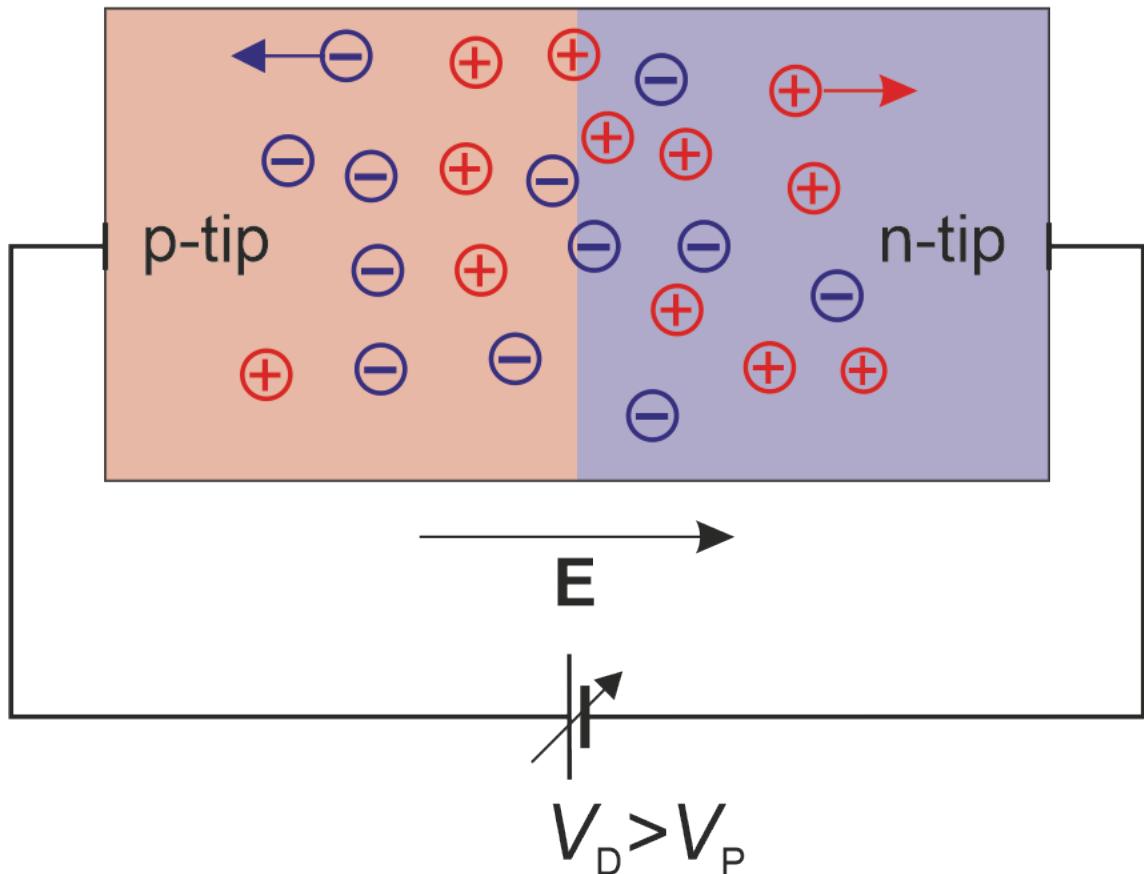
$$V_p = \frac{kT}{q_e} \cdot \ln \frac{p_p}{p_n}$$

$$n_n = N_D, \quad n_p = \frac{n_i^2}{N_A}$$

$$p_n = \frac{n_i^2}{N_D}, \quad p_p = N_A$$

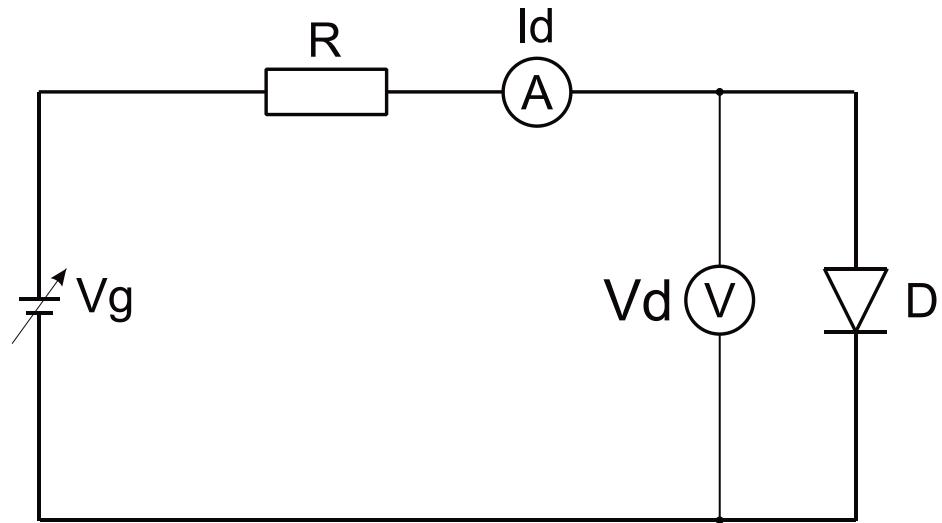
$$V_p = \frac{kT}{q_e} \cdot \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

# Direktno polarisani PN spoj

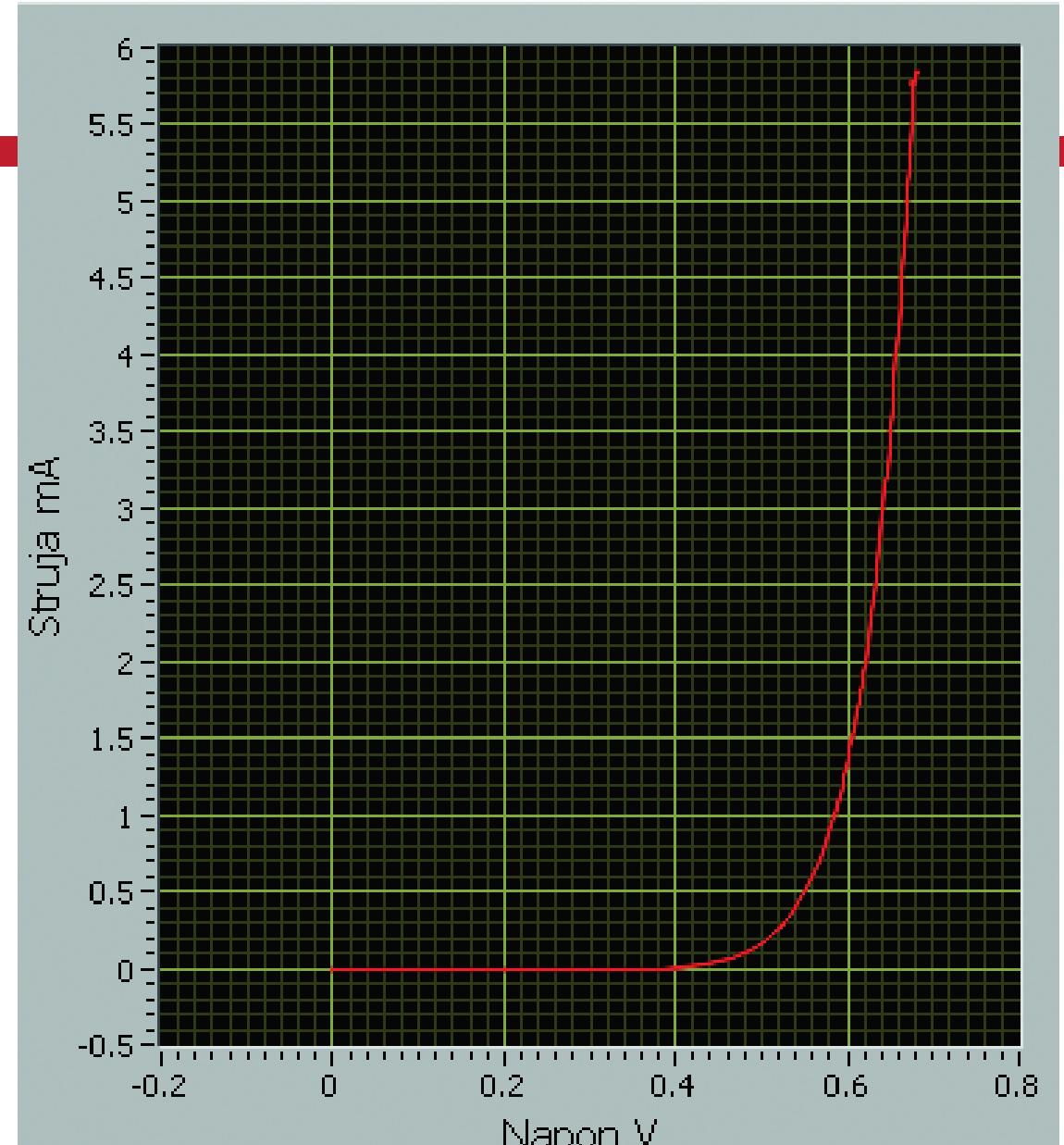


- Ukoliko je napon  $V_D$  veći napon provođenja  $V_P$ , nosioci nanelektrisanja se kreću pod uticajem spoljnog električnog polja.

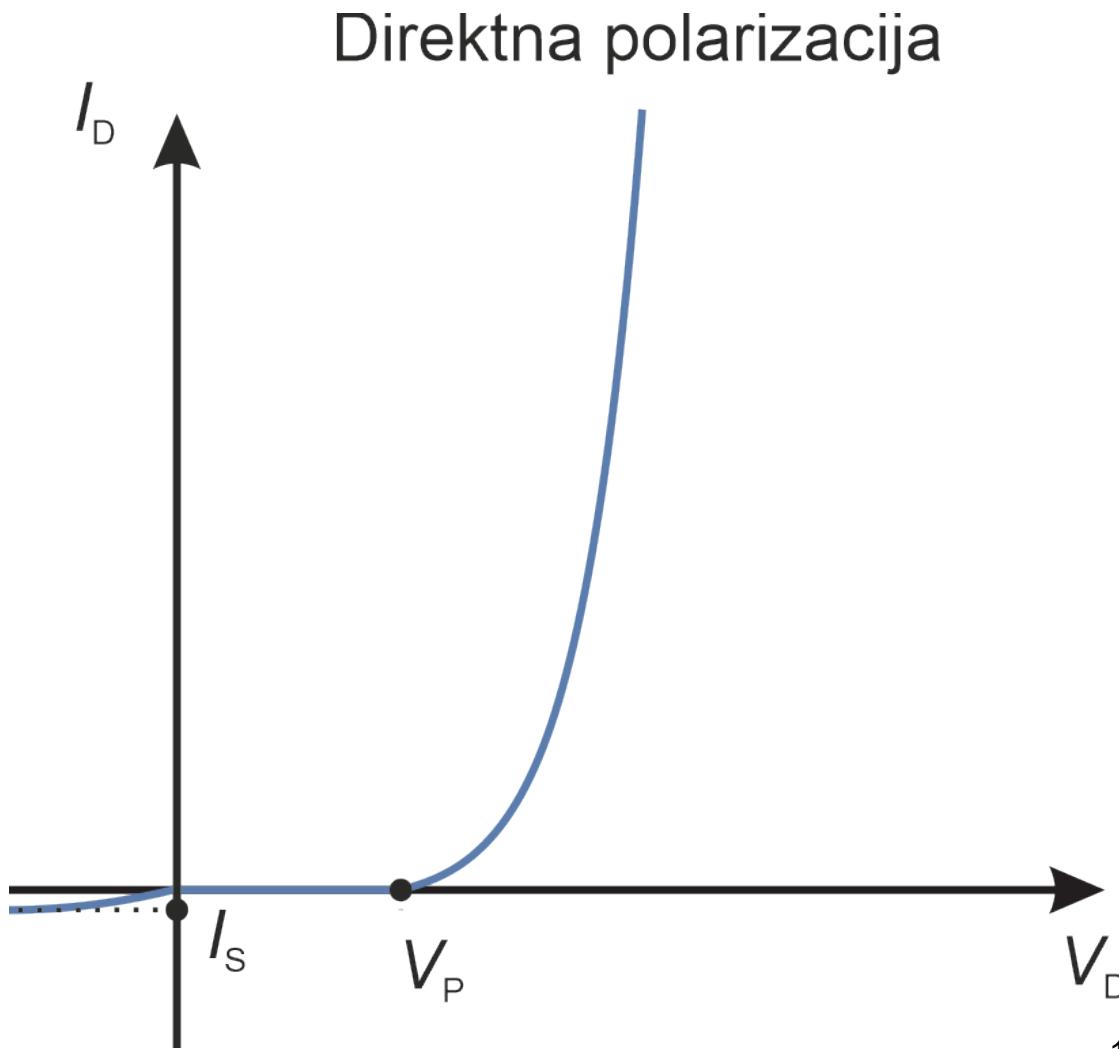
# Direktno polarisani PN spoj



$$V_g > 0$$



# Strujno-naponska k. direktno polarisanog PN spoja

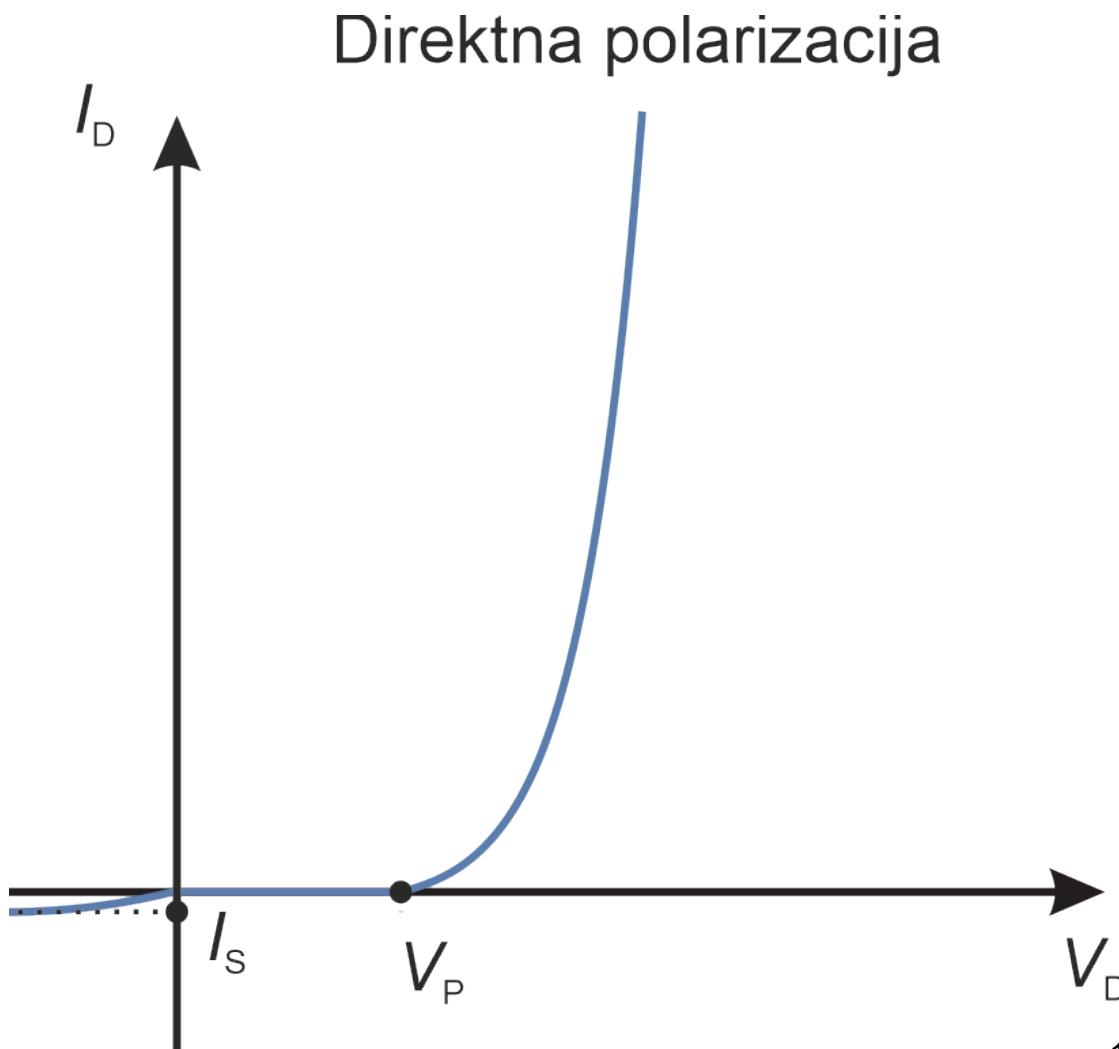


- U oblasti direktne polarizacije, struja diode eksponencijalno raste sa porastom napona:

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

- Za napone od 0 do  $V_P$ , struja diode je praktično jednaka nuli. Napon praga provođenja  $V_P$ , ima vrednost između 0,6V i 0,8V, za silicijumsku diodu.

# Strujno-naponska k. direktno polarisanog PN spoja

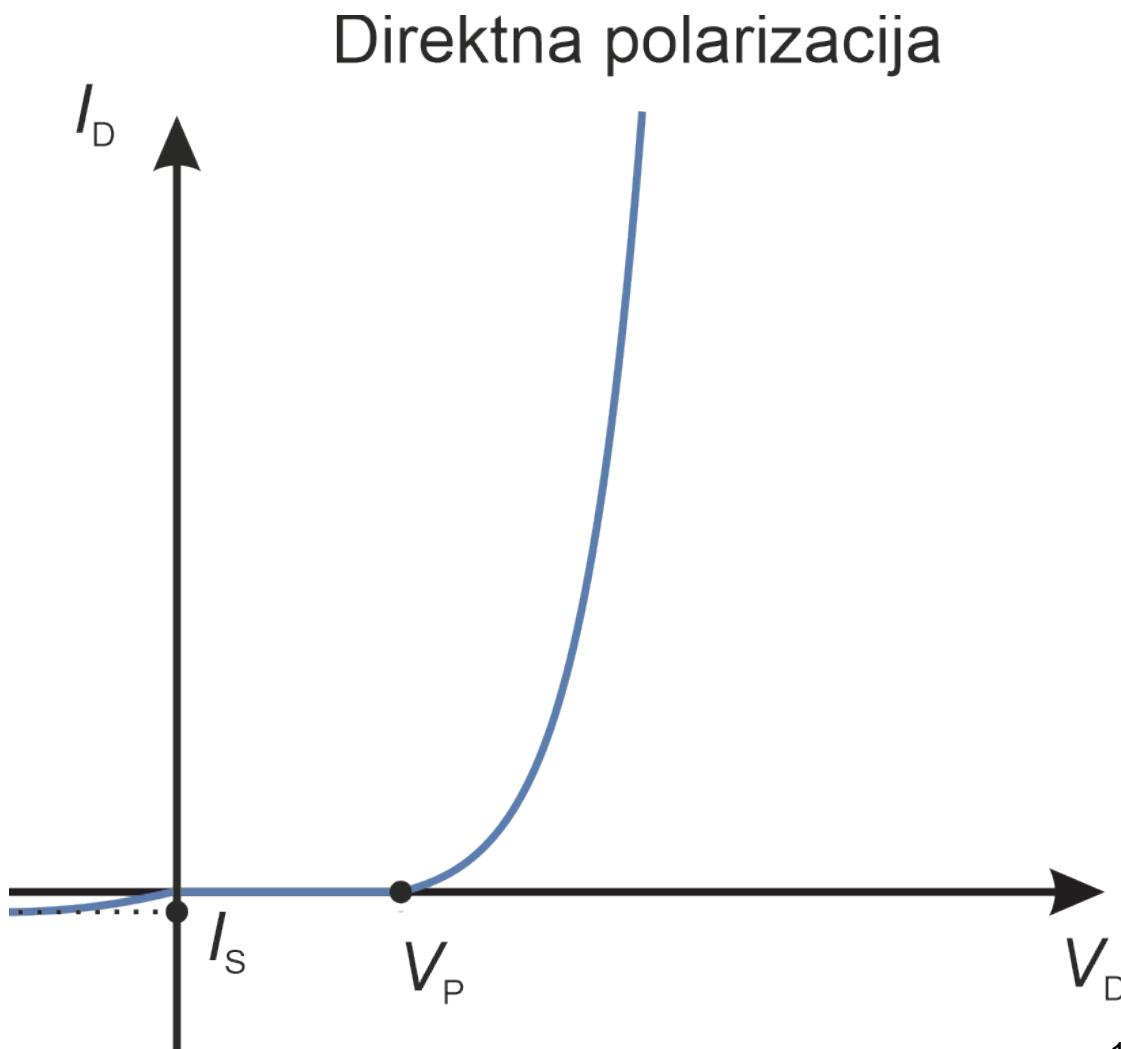


- Napon  $V_T$  je termički napon:

$$V_T = \frac{kT}{q_e}$$

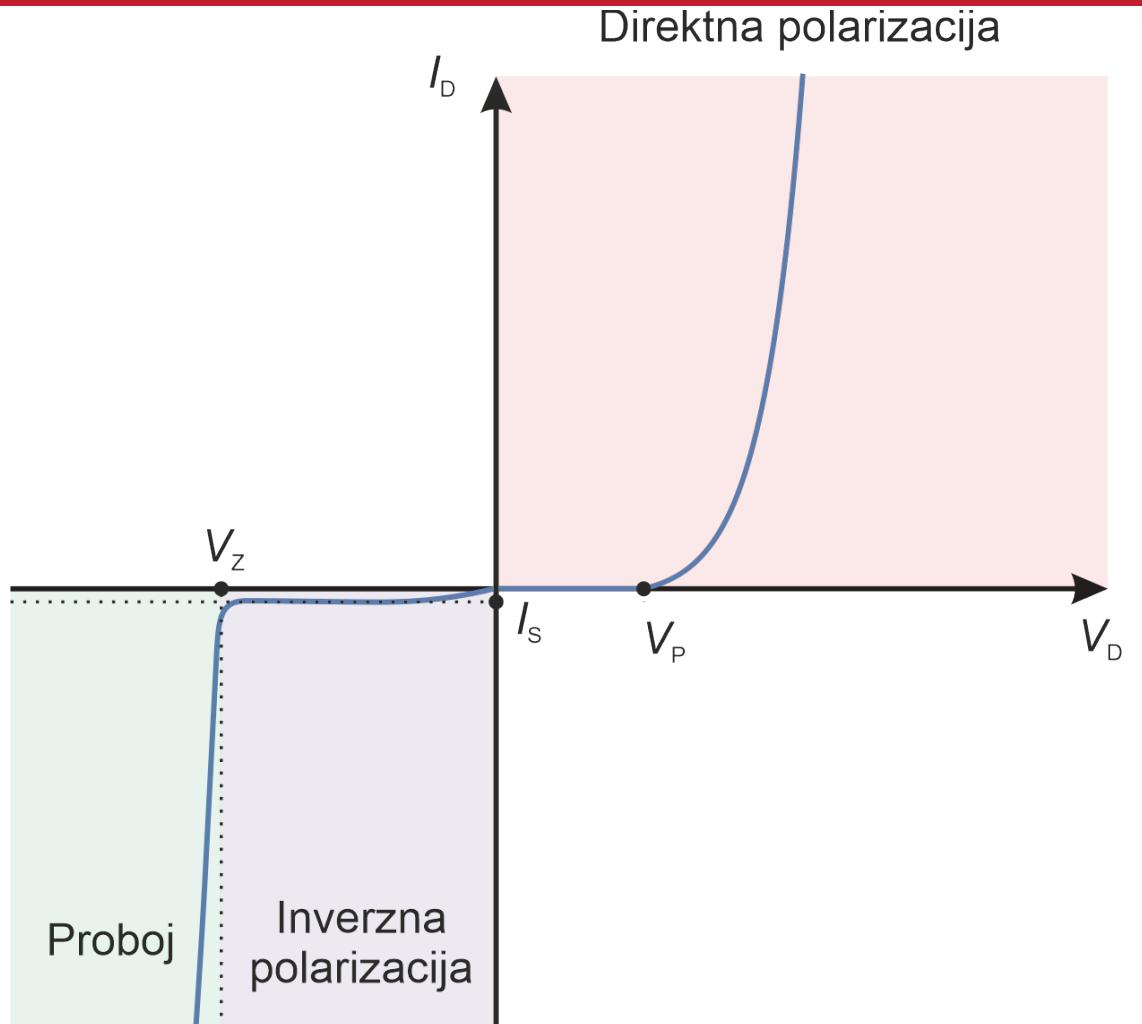
- $k$  je Bolcmanova konstanta ( $1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K),  $q_e$  predstavlja elementarno nanelektrisanje ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  C),  $T$  je absolutna temperatura ( $V_T = 26\text{mV}$  za  $T=300\text{K}$ ).

# Strujno-naponska karakteristika PN dioda



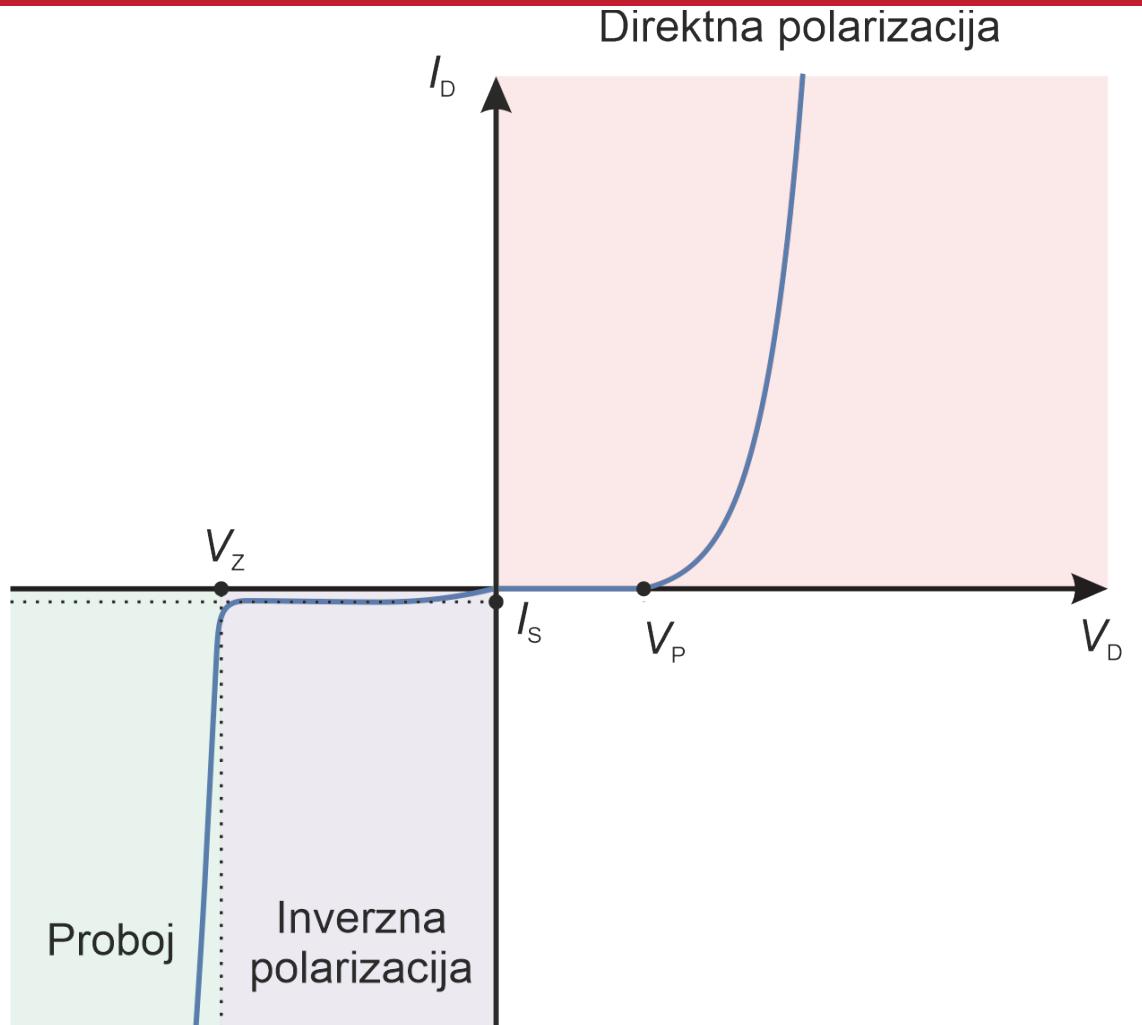
- Eksponencijalna funkcija brzo raste, za male promene napona  $V_D$ , promene struje su velike.
- U ovoj oblasti dioda se u kolu ponaša praktično kao **kratak spoj**.

# Strujno-naponska karakteristika PN dioda



- Oblasti direktne i inverzne polarizacije se koriste za usmeravanje napona (za pozitivan napon dioda je kratak spoj, za negativne prekid u kolu).
- Ukoliko se napon negativne polarizacije povećava, dioda ulazi u **oblast preboja**.

# Strujno-naponska karakteristika PN dioda

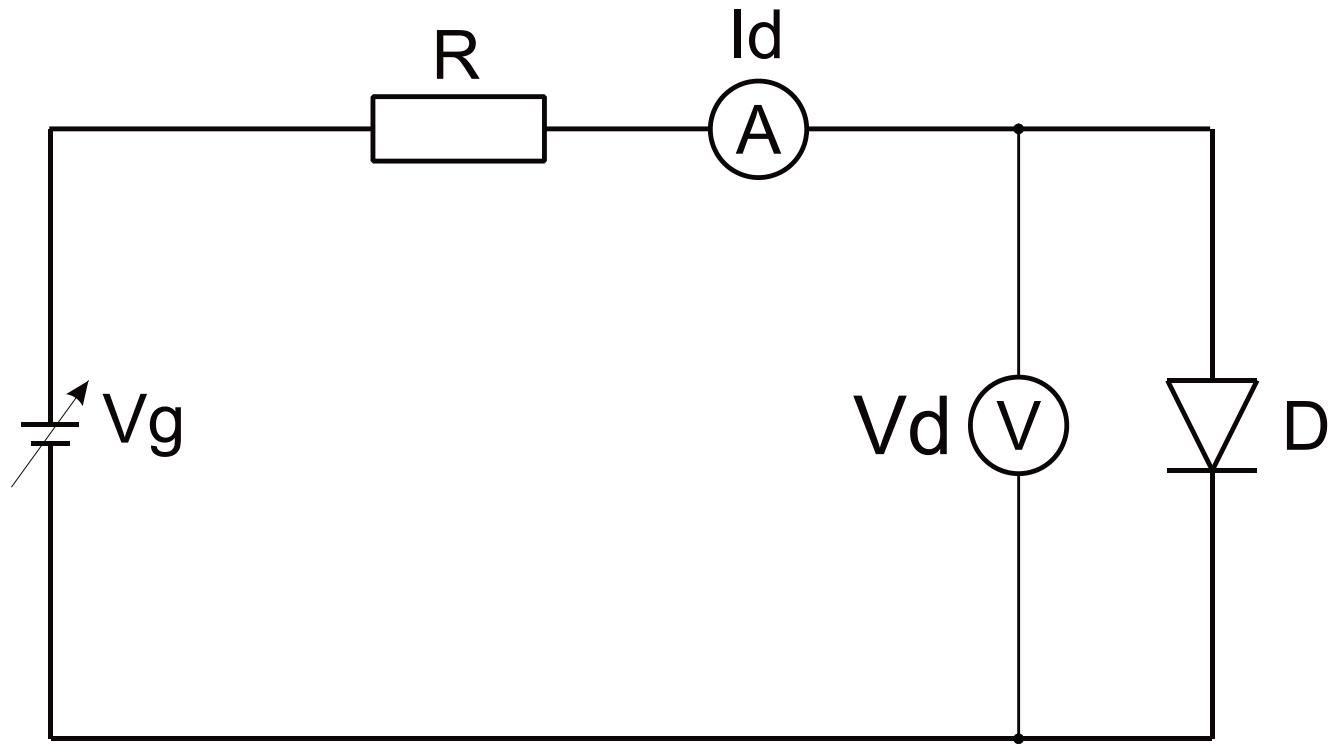


- Napon  $V_z$  je napon proboja. U oblasti proboja, dioda se ponaša kao **naponski generator** sa malom unutrašnjom otpornošću, napona  $V_z$ .
- Oblast proboja se kod nekih tipova dioda koristi za stabilizaciju napona (diode koje se koriste za ovu namenu su **Zener diode**).

# Modeli diode

- Zavisnost struje diode od napona diode je eksponencijalna, tako da su sistemi jednačina koji opisuju kola sa diodama nelinearni i ne mogu se rešiti analitički.
- Neophodno je primeniti numerički metod za rešavanje sistema nelinearnih jednačina ili primeniti neki jednostavniji (linearni) model.
- Najčešće se primenjuju tri modela diode: **model idealne diode**, **model konstantnog napona** i **model eksponencijalne zavisnosti struje**. Prva dva modela su linearni modeli.

# Model eksponencijalne zavisnosti



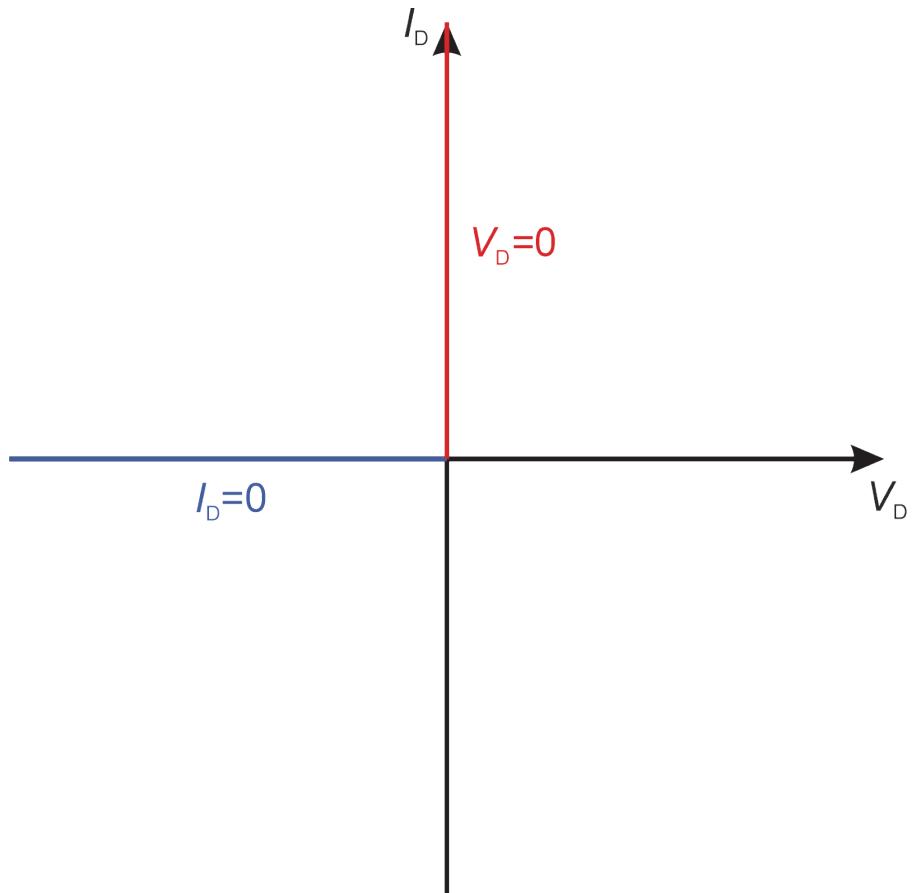
$$\frac{V_g - V_D}{R} = I_D$$

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

$$V_g = V_D + I_S \cdot R \cdot \left( \exp\left(\frac{V_D}{V_T}\right) - 1 \right)$$

Nelinearna jednačina po  $V_D$ .

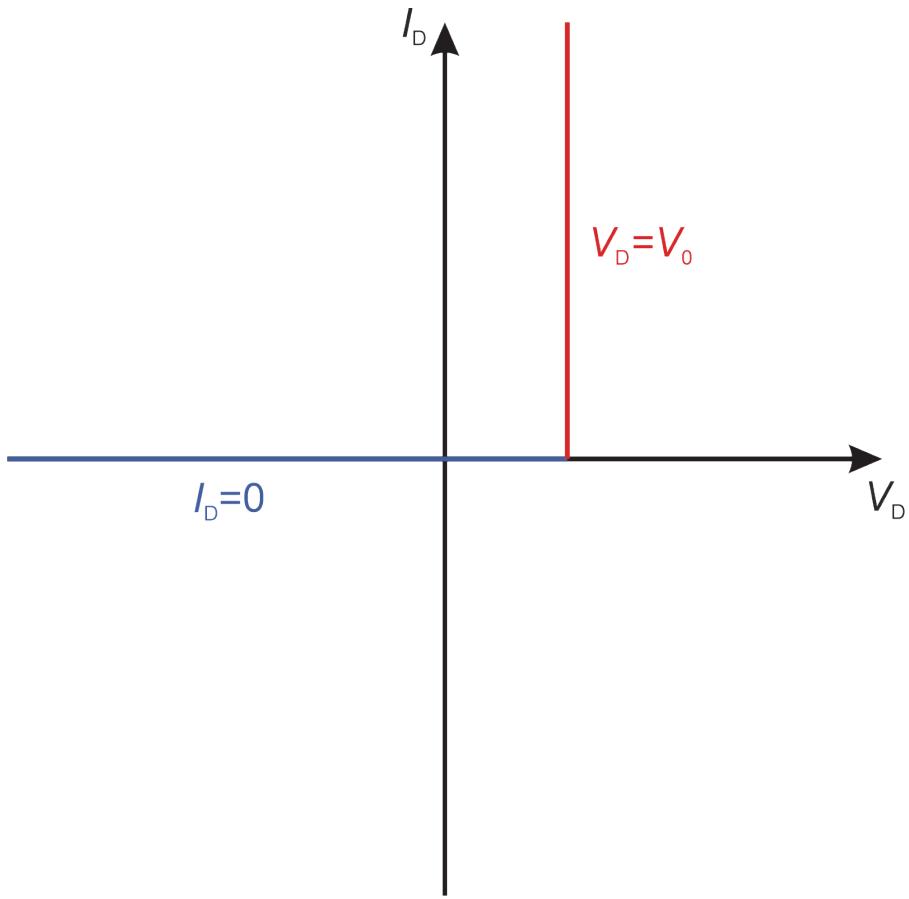
# Model idealne diode



Model idealne diode

- Najprostiji linearni model diode je **model idealne diode**.
- Idealna dioda za negativne napone predstavlja **prekid** (struja diode je jednaka nuli za sve negativne napone), a za pozitivne **kratak spoj** (napon na diodi je jednak nuli za sve vrednosti struje koja protiče kroz diodu).

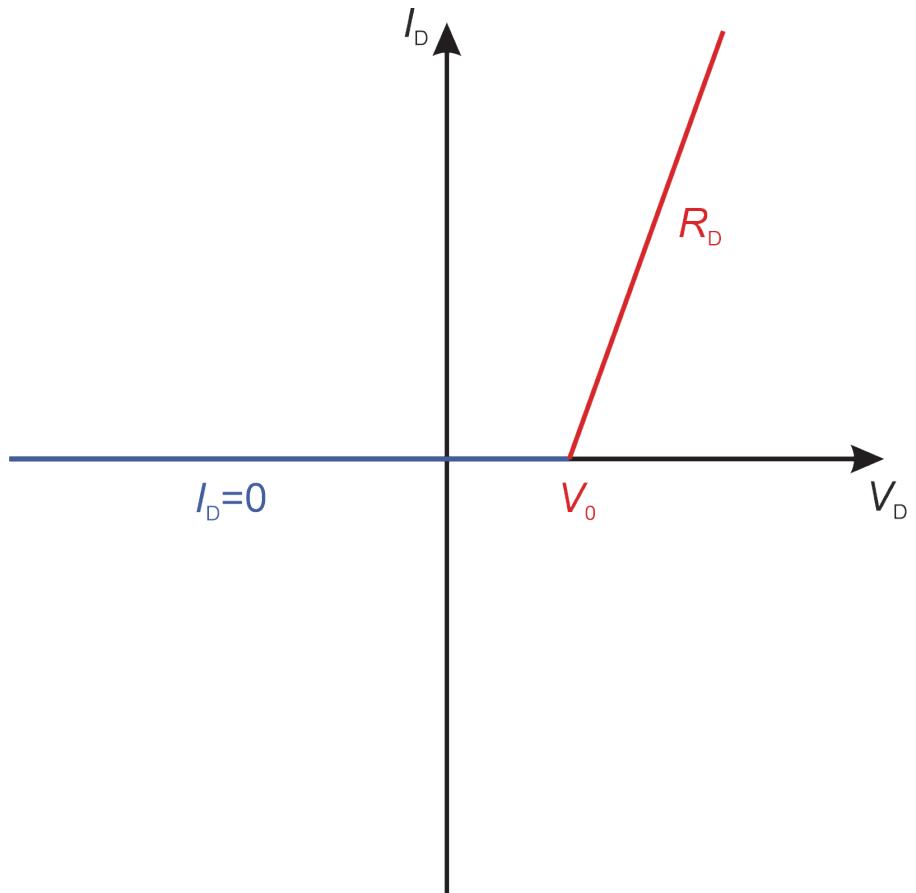
# Model konstantnog napona



Model konstantnog napona

- Model konstantnog napona modeluje diodu kao prekid za napone manje od napona praga provođenja  $V_0$  i idealni naponski generator napona  $V_0$  za napone veće od praga provođenja.

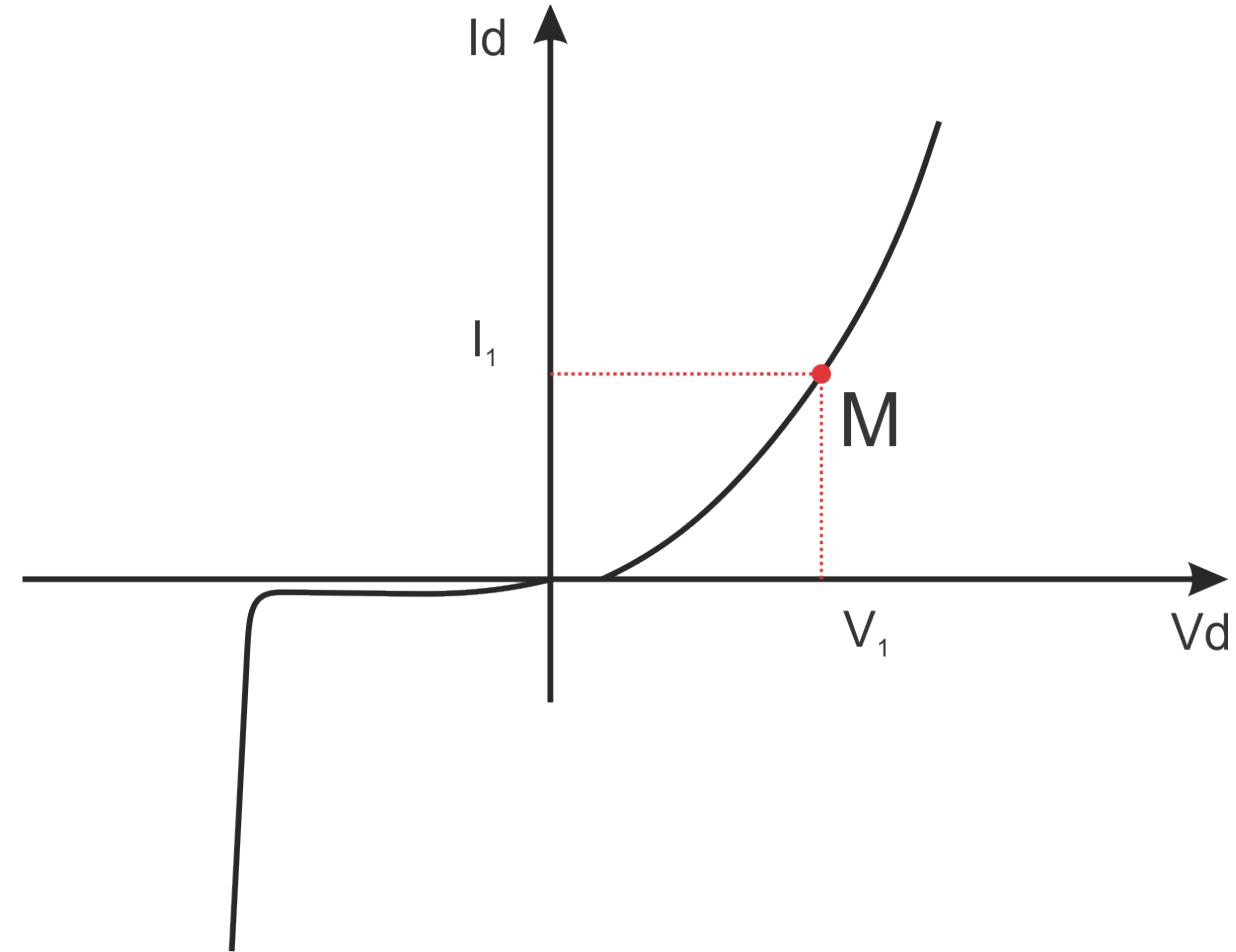
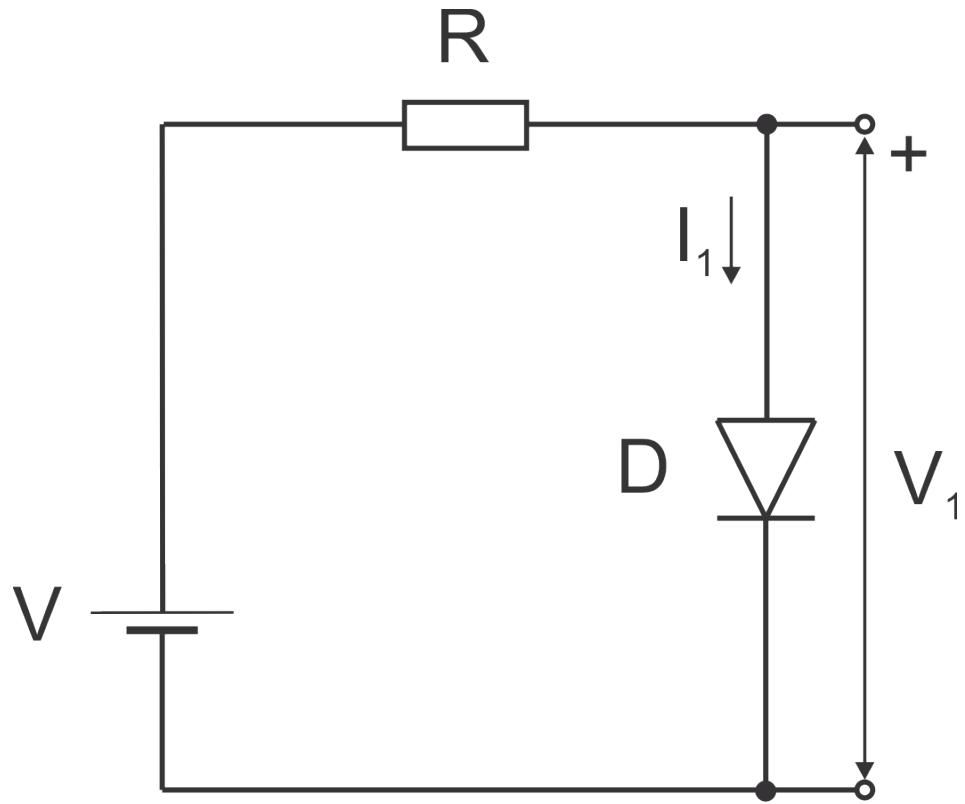
# Model konst. napona sa unutrašnjom otpornošću



Model konstantnog napona

- Model konstantnog naponasa unutrašnjom otpornošću modeluje diodu kao prekid za napone manje od napona praga provođenja  $V_0$  i realni naponski generator napona  $V_0$  i unutrašnjom otpornošću  $R_D$  za napone veće od praga provođenja.
- Otpornost  $R_D$  može biti **statička** ili **dinamička**.

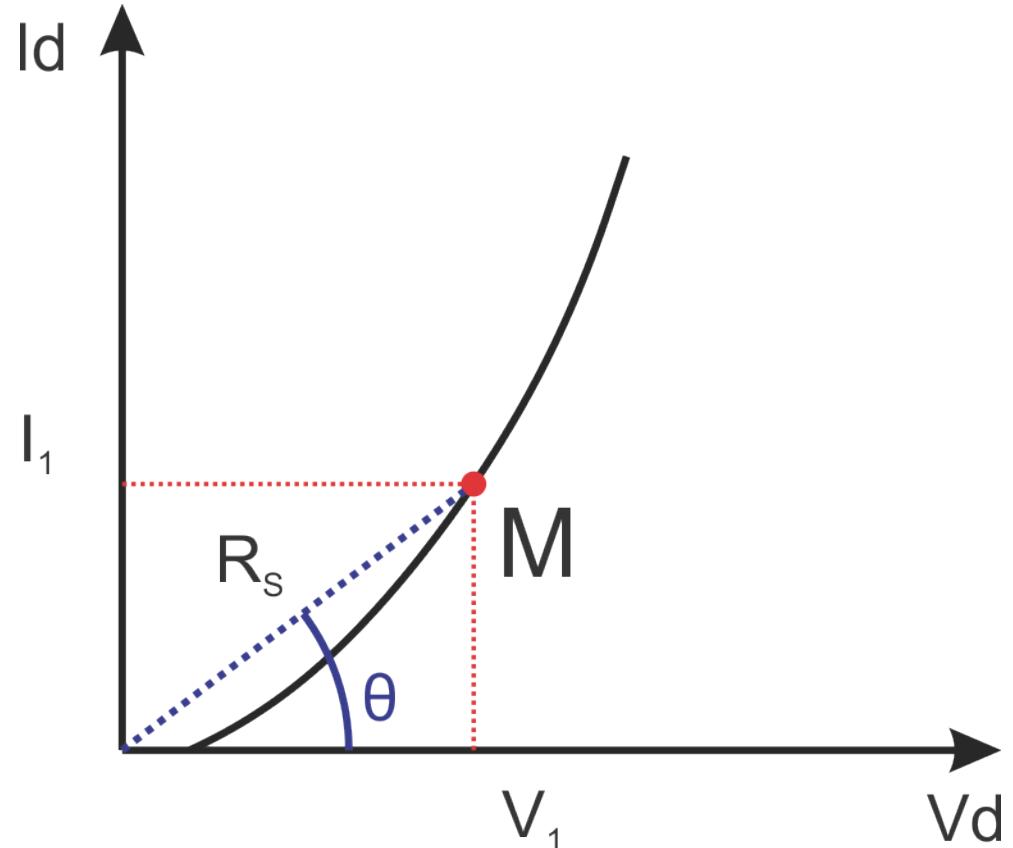
# Statička otpornost diode



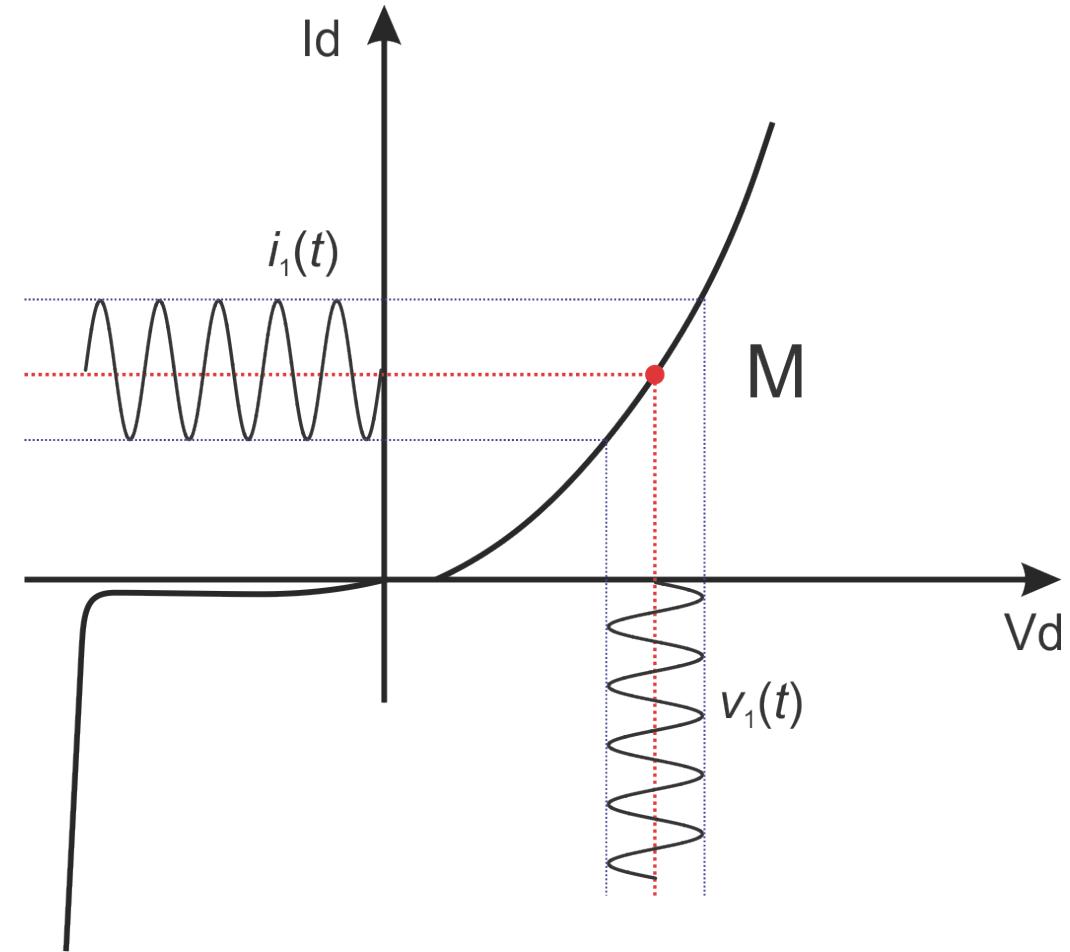
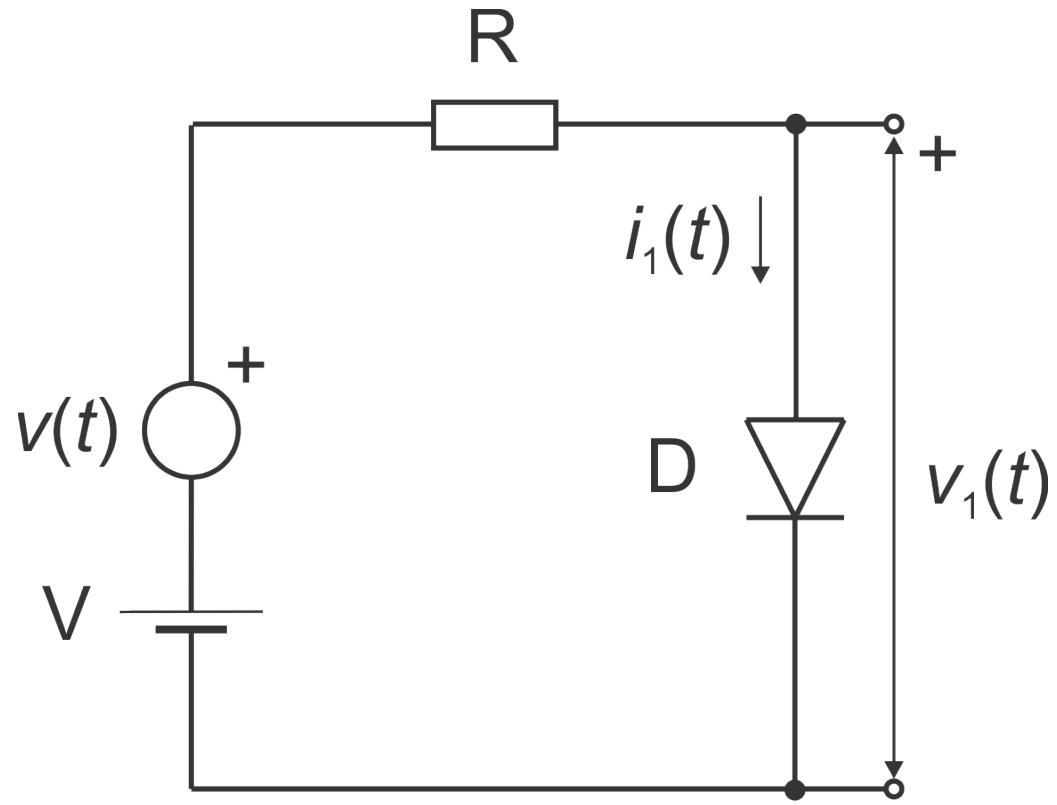
# Statička otpornost diode

- Statička otpornost zavisi od radne tačke.
- Statička otpornost je određena je nagibom sečice koja prolazi kroz koordinatni početak i seče karakteristiku u radnoj tački M.

$$R_s = \frac{V_1}{I_1} = \cot \theta$$



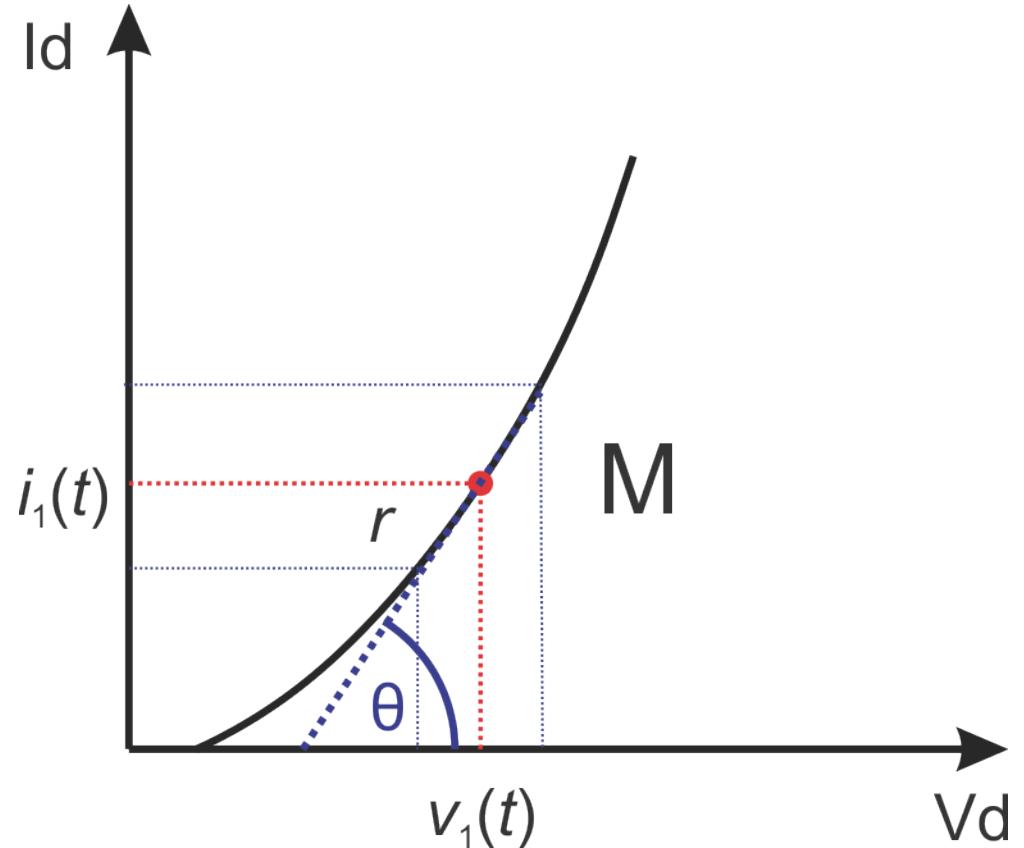
# Dinamička otpornost diode



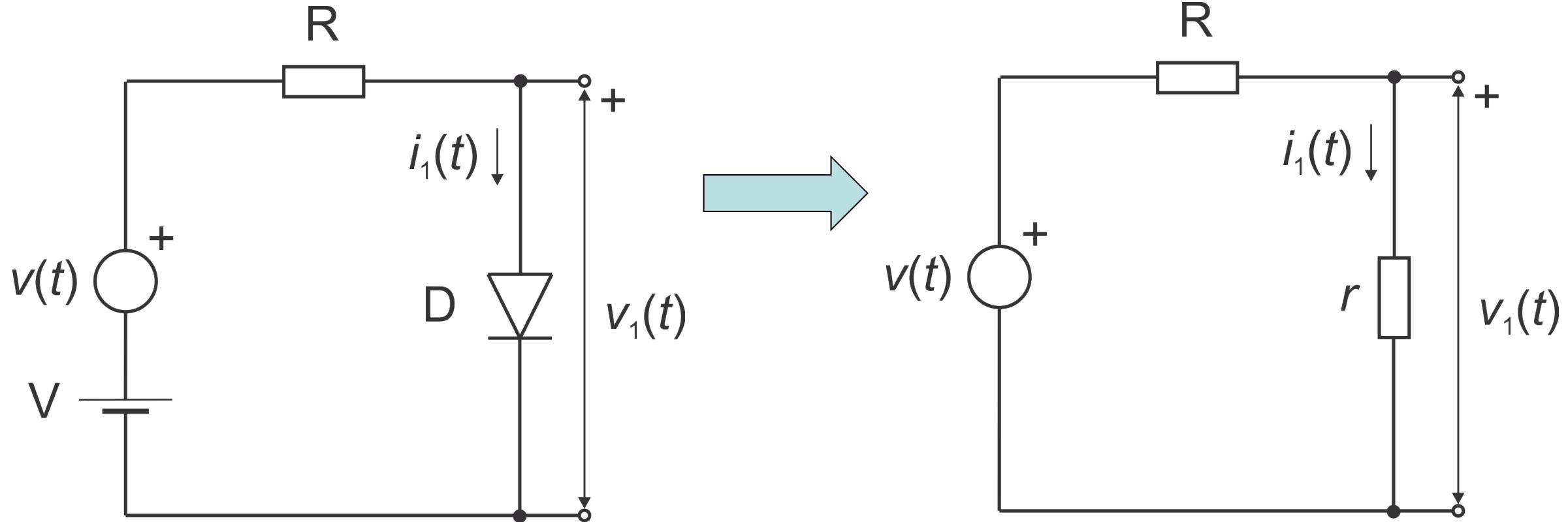
# Dinamička otpornost diode

- Dinamička otpornost zavisi od radne tačke.
- Dinamička otpornost je određena nagibom tangente na karakteristiku u radnoj tački M.

$$r = \frac{1}{\frac{di_1}{dv_1}} = \cot \theta$$



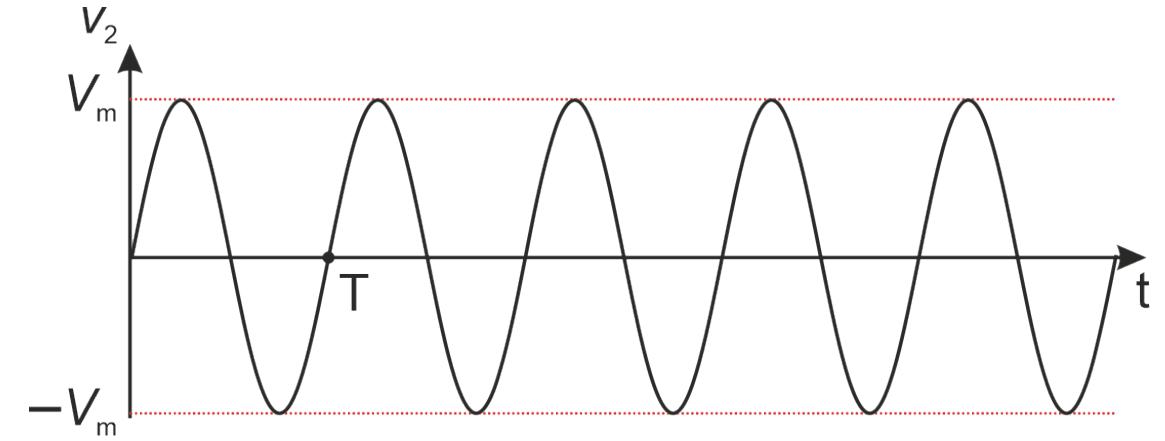
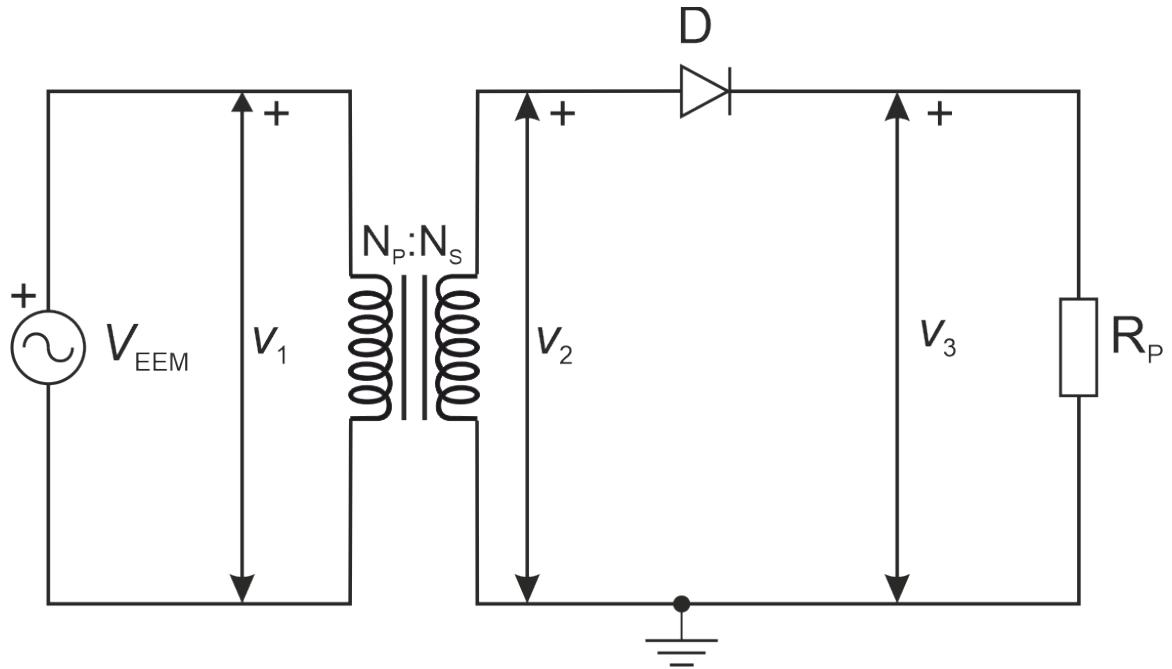
# Dinamička otpornost diode – ekvivalentno kolo



# Primena dioda – usmeravanje

- Osobina diode da provodi struju samo kada je direktno polarisana se može iskoristiti za konstrukciju kola koje pretvara naizmenični napon (napon elektroenergetske mreže) u jednosmerni napon (neophodan za napajanje elektronskih kola).
- Ovakva kola se nazivaju **usmeraći napona**.
- Postoje dve vrste usmeraća – **polutalasni** i **punotalasni**.
- Polutalasni usmerać je najjednostavnije elektronsko kolo.

# Primena dioda – polatalasno usmeravanje

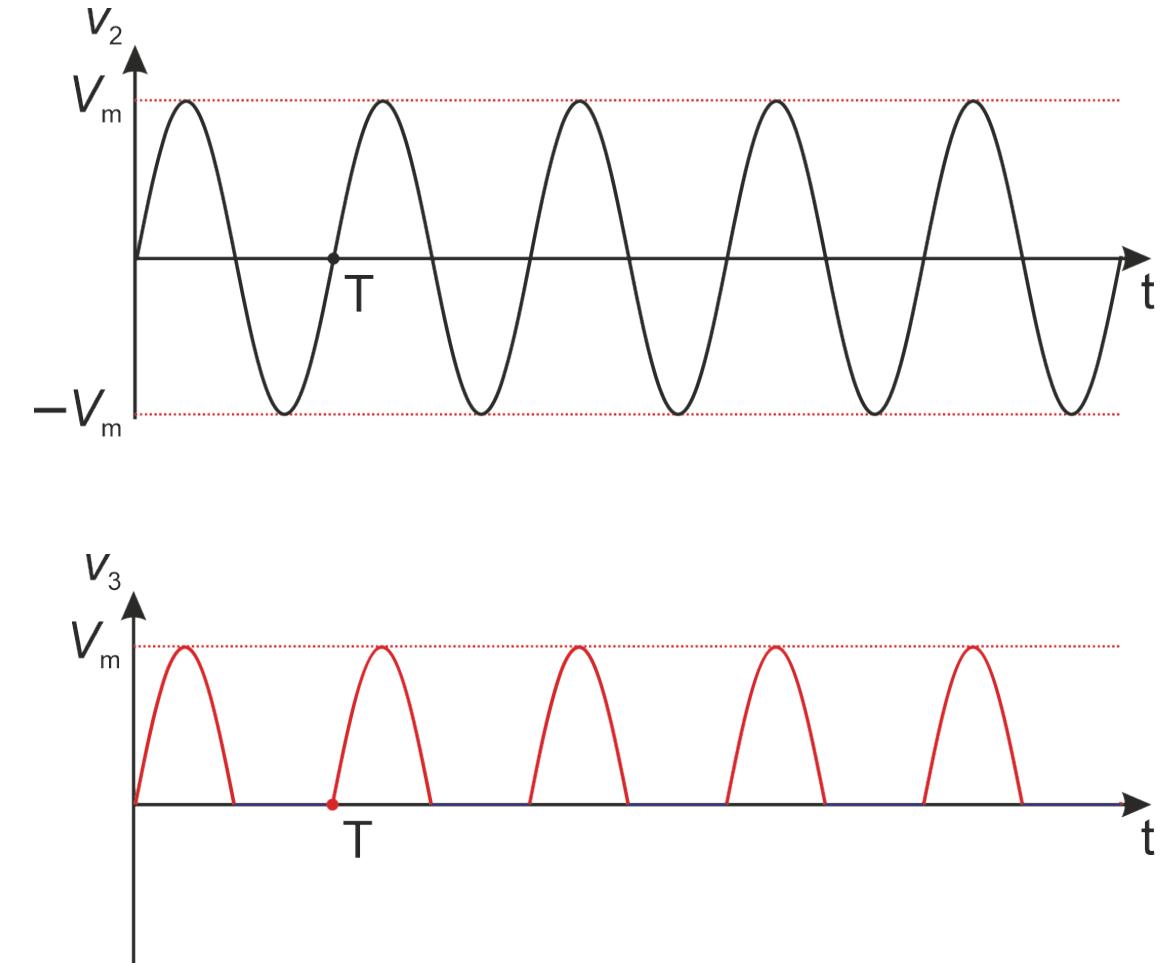
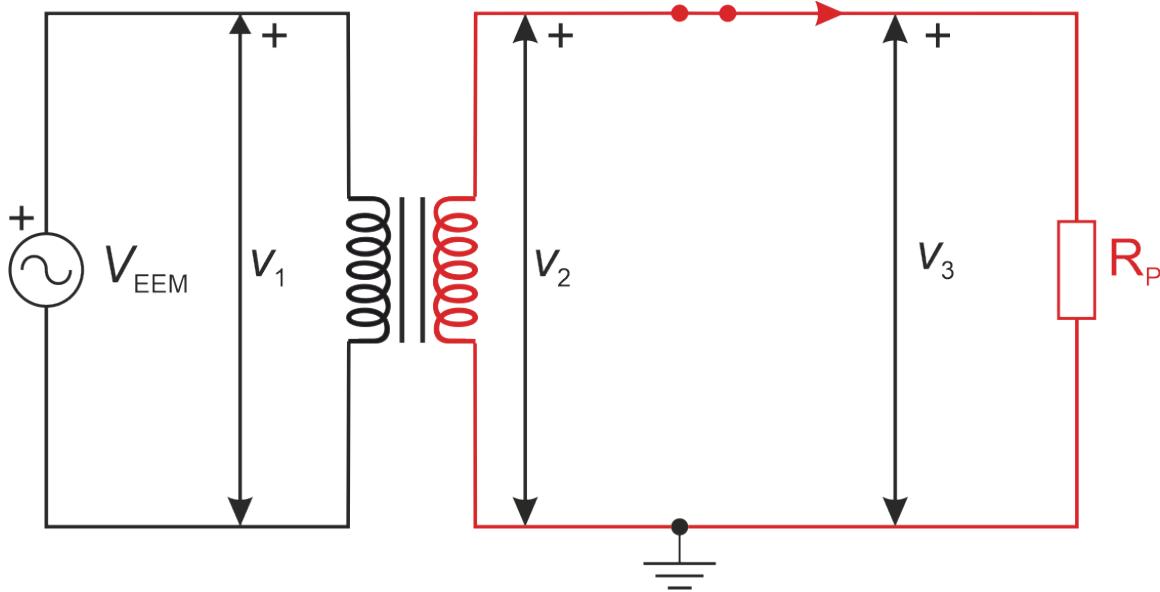


$$v_2 = V_m \sin \omega t$$

$$V_m = \frac{N_s}{N_p} \cdot V_{EEM}$$

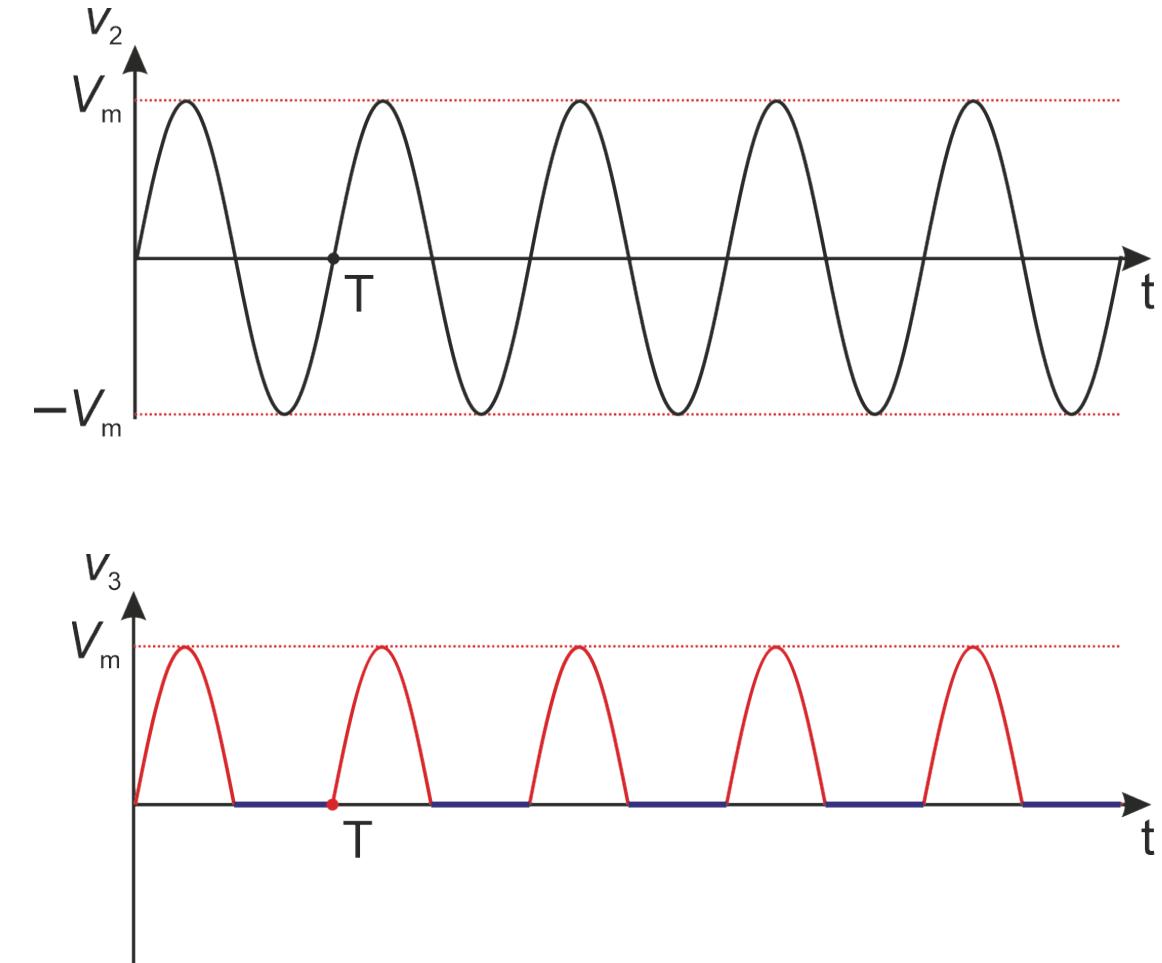
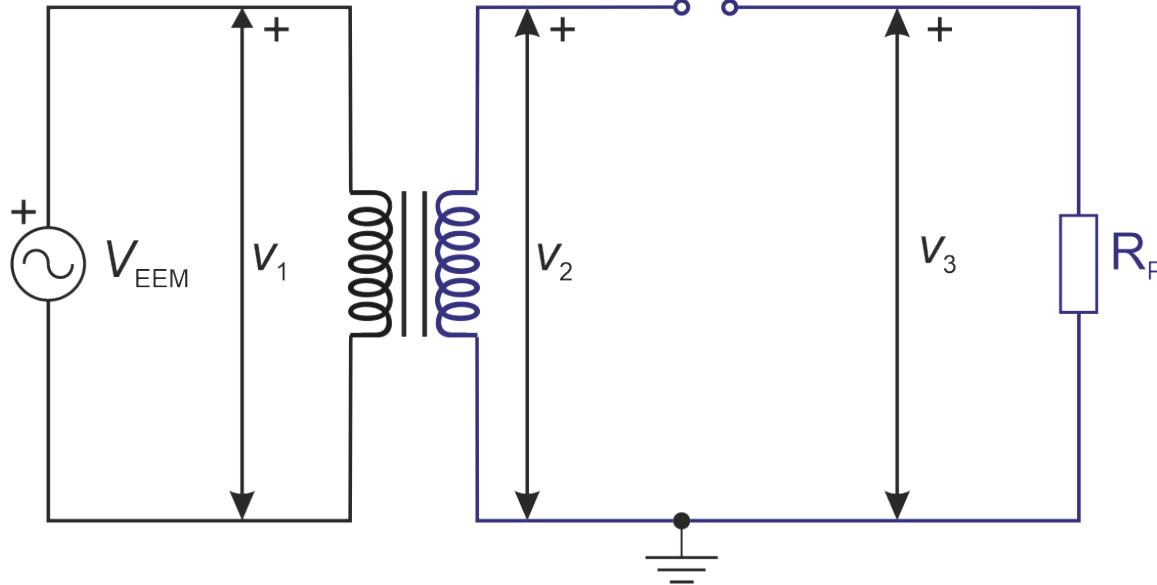
# Primena dioda – polatalasno usmeravanje

Pozitivna poluperioda ulaznog napona, D provodi

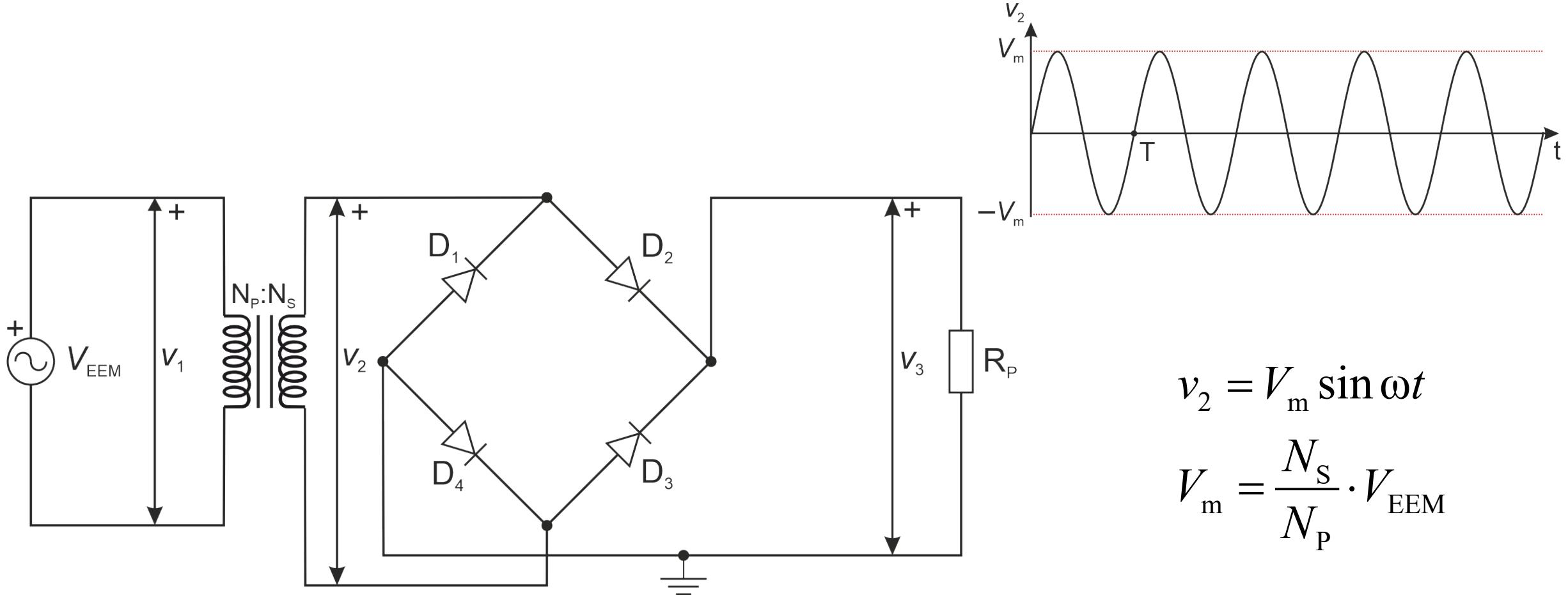


# Primena dioda – polatalasno usmeravanje

Negativna poluperioda  
ulaznog napona, D ne provodi

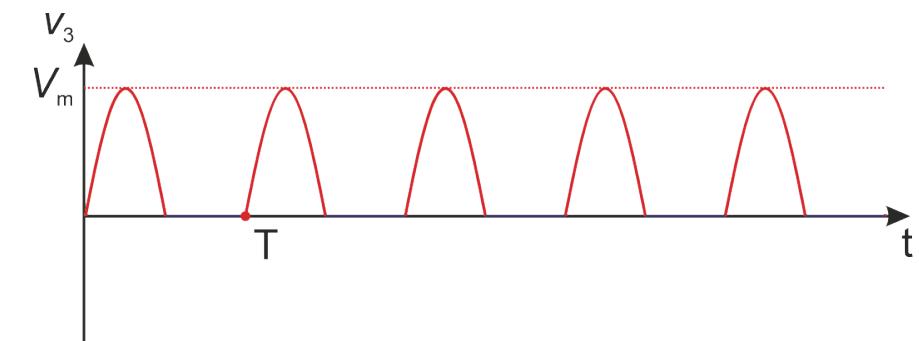
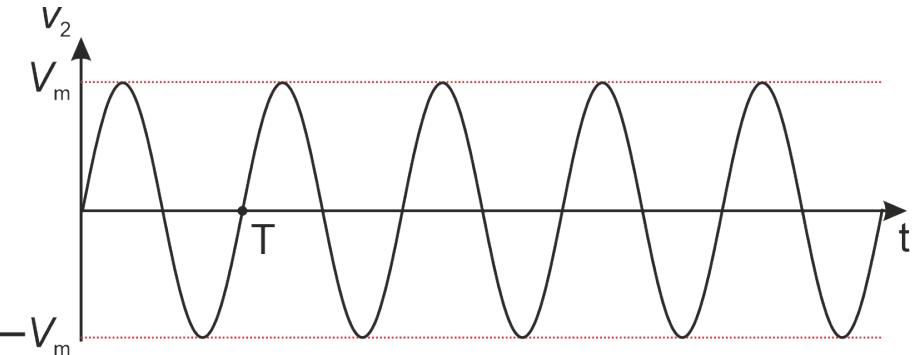
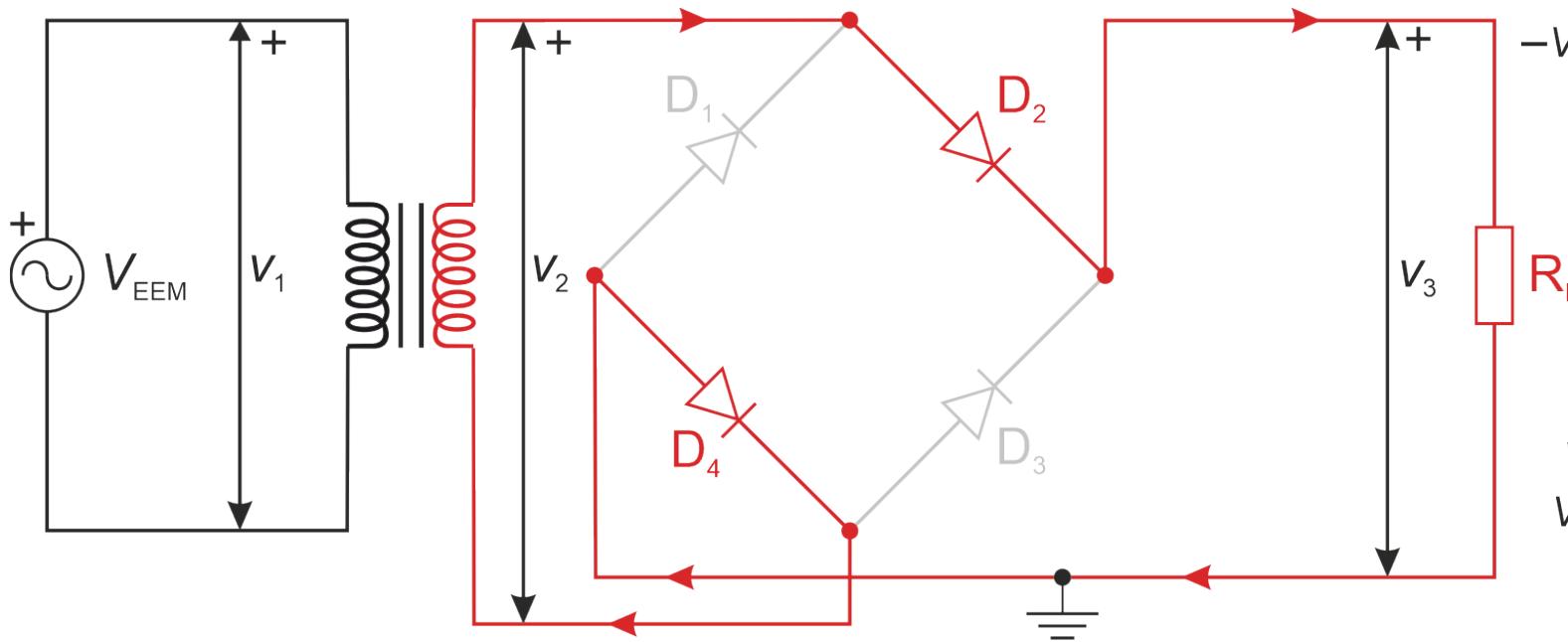


# Primena dioda – punotalasno usmeravanje



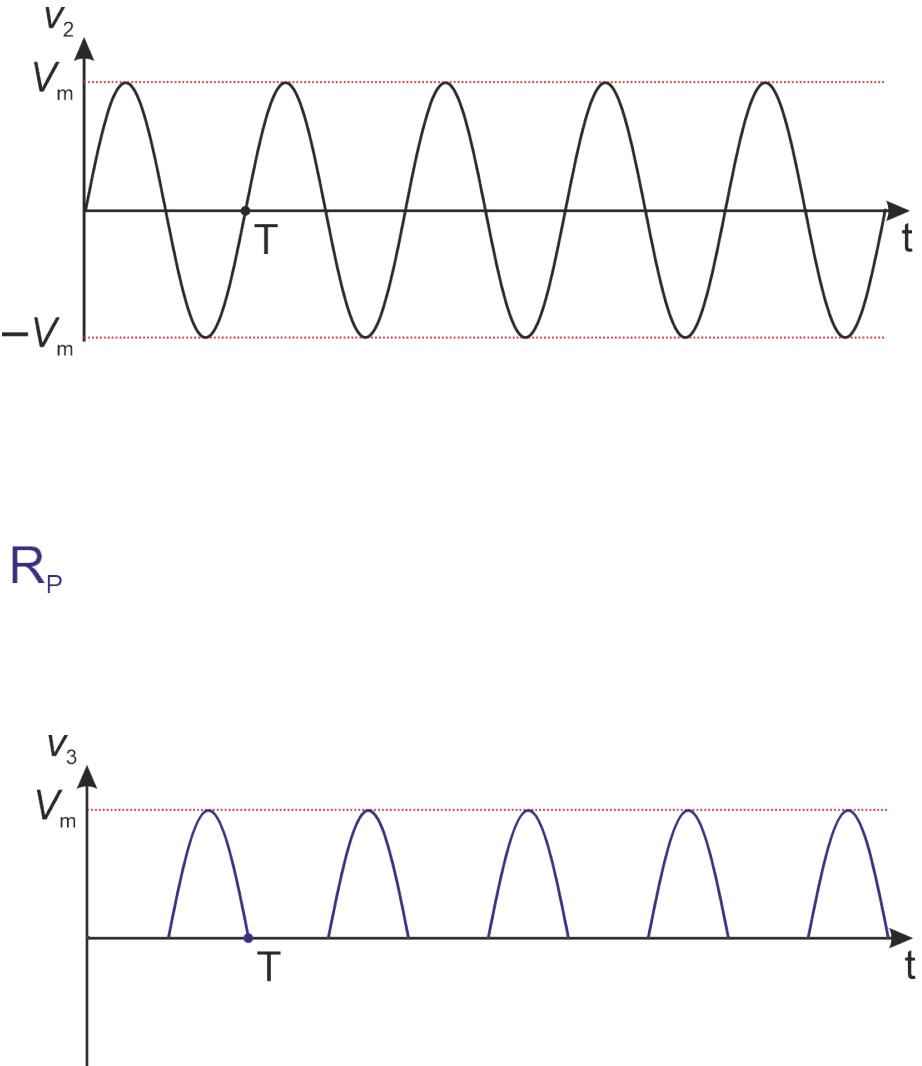
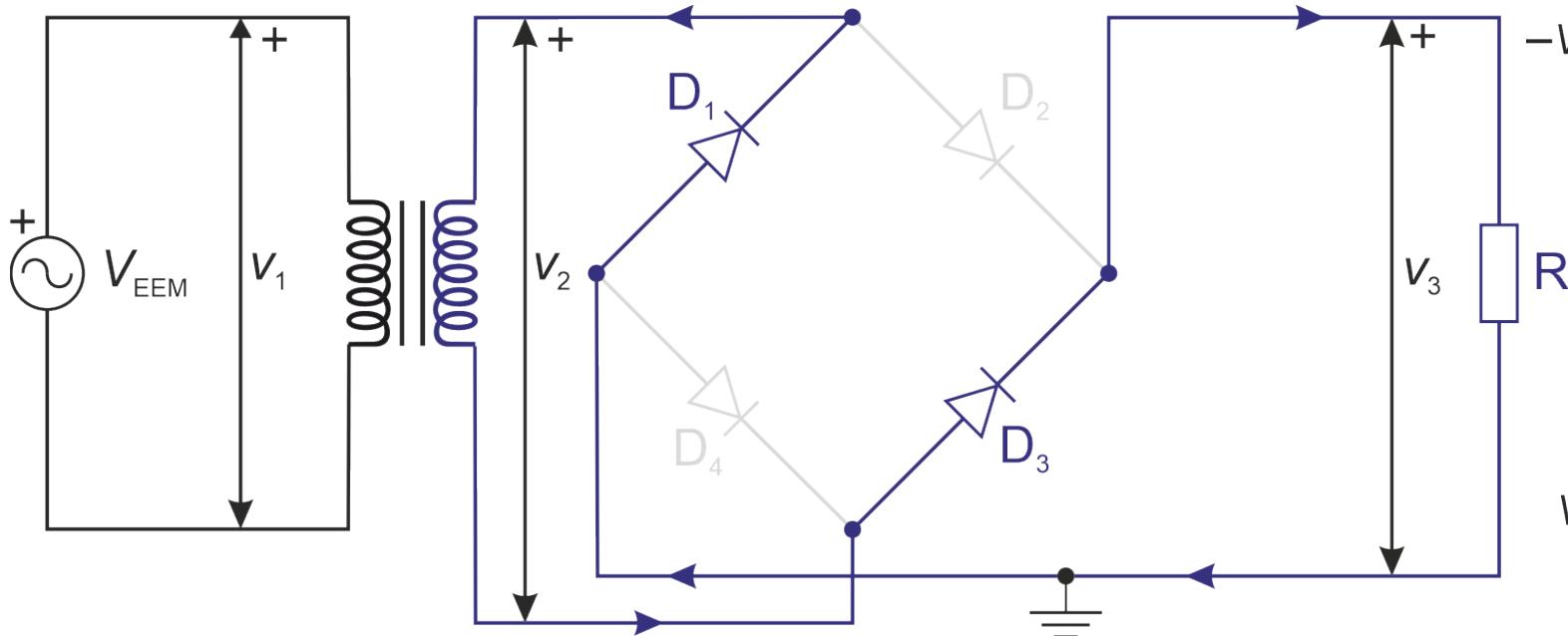
# Primena dioda – punotalasno usmeravanje

Pozitivna poluperioda ulaznog napona,  
D<sub>2</sub> i D<sub>4</sub> provode

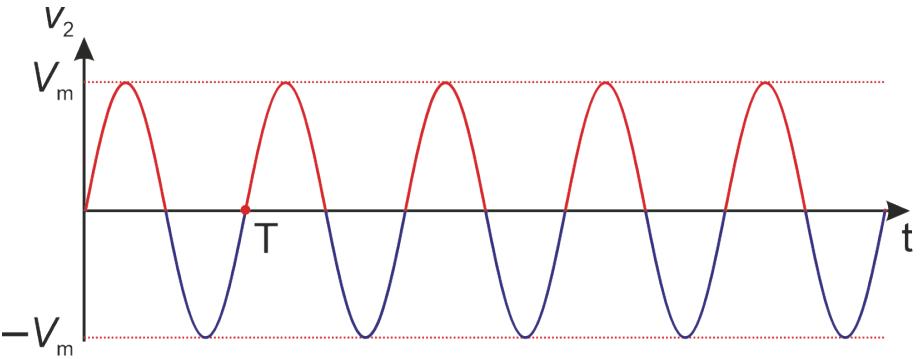
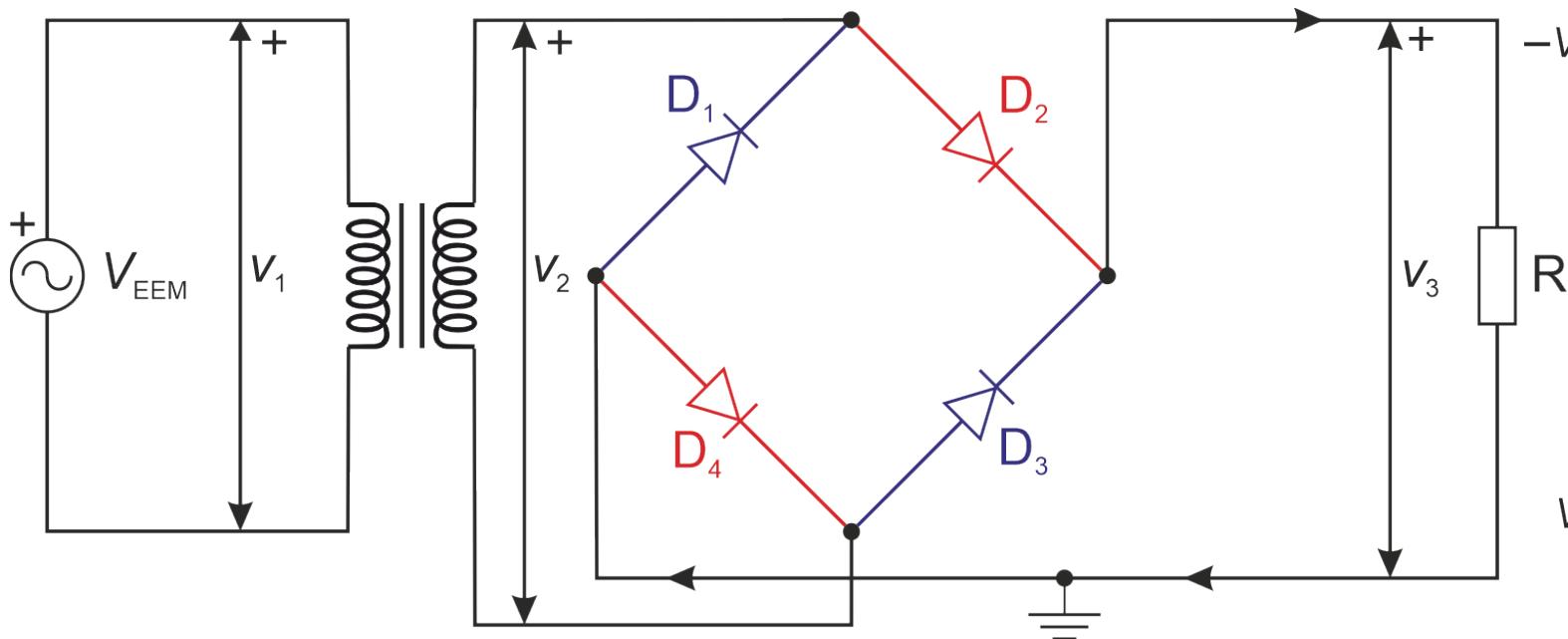


# Primena dioda – punotalasno usmeravanje

Negativna poluperioda ulaznog napona,  
D<sub>1</sub> i D<sub>3</sub> provode

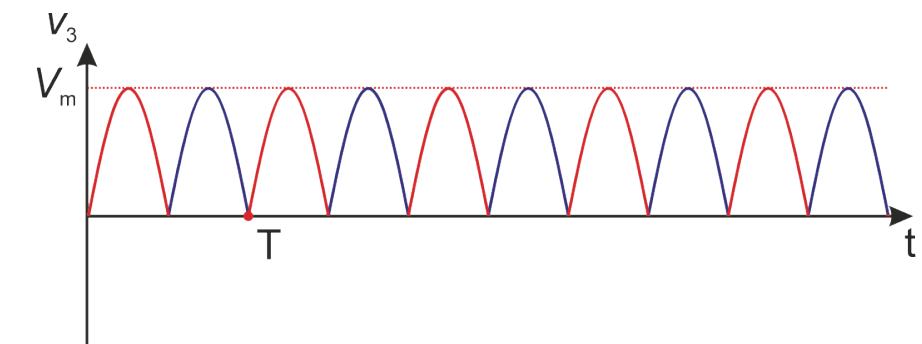


# Primena dioda – punotalasno usmeravanje



$$v_2 = V_m \sin \omega t$$

$$v_3 = V_m |\sin \omega t|$$



# Primena dioda – punotalasno usmeravanje

- Usmereni napon  $v_3$  **ne menja polaritet** i uvek je **pozitivan**. Međutim,  $v_3$  **nije konstantan** napon, jer se menja u vremenu.
- $v_3$  je **složenoperiodičan** napon čija je frekvencija dvostruko veća od frekvencije napona elektroenergetske mreže  $v_1$ .
- Primenom Furijeove transformacije možemo odrediti njegovu jednosmernu komponentu i vremenski promenljivu komponentu – harmonike. Ova analiza je neophodna za određivanje **odnosa transformacije transformatora  $N_P:N_S$**  i efikasnog metoda za potiskivanje vremenski promenljive komponente.

# Analiza usmerenog napona

- Složenoperidični napon ( $v_3$ ) se može izraziti jednačinom:

$$v_3(t) = V_0 + \sum_{k=1}^{\infty} V_k \cdot \cos(k\omega t + \varphi_k)$$

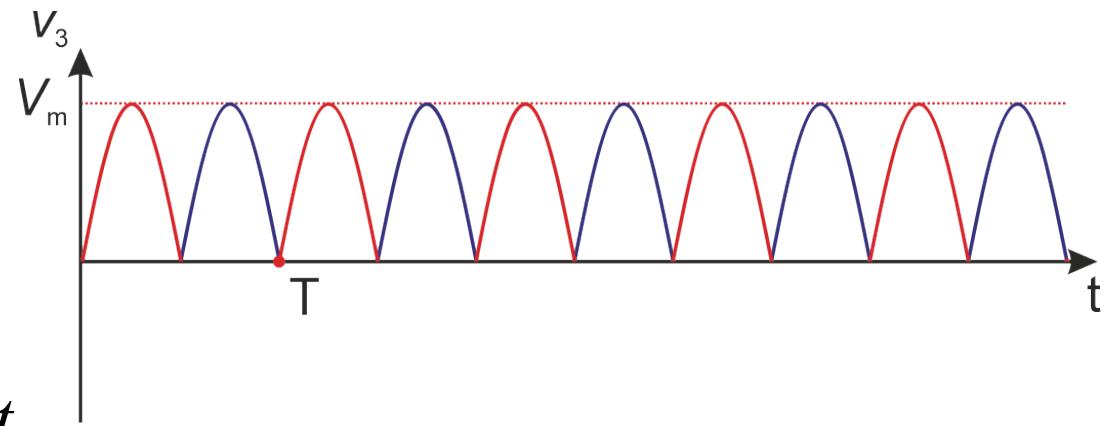
- gde  $V_0$  predstavlja jednosmernu komponentu napona  $v_3$ ,  $V_k$  amplitudu  $k$ -tog harmonika a  $\varphi_k$  njegovu fazu.  $k$  je red harmonika.
- Prvi harmonik ( $k=1$ ) se zove **osnovni harmonik**.

# Analiza usmerenog napona

- Jednosmerna komponenta je jednaka srednjoj vrednosti signala:

$$V_0 = \frac{1}{T} \int_0^T v_3(t) dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} v_3(t) dt$$

$$V_0 = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} V_m \sin \omega t \cdot dt = \frac{2V_m}{T} \int_0^{T/2} \sin \frac{2\pi t}{T} \cdot dt$$



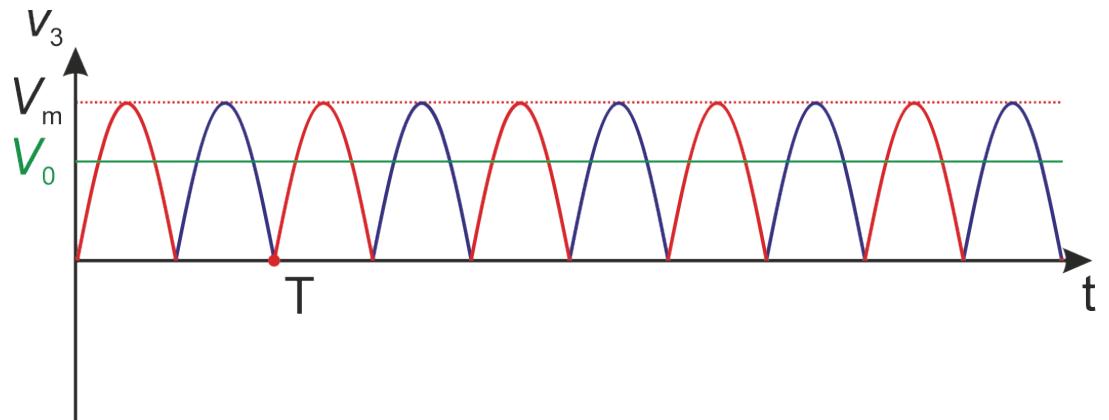
# Analiza usmerenog napona

$$V_0 = -\frac{V_m}{\pi} \cos \left. \frac{2\pi t}{T} \right|_0^{\frac{T}{2}} = -\frac{V_m}{\pi} (\cos \pi - \cos 0)$$

$$V_0 = \frac{2V_m}{\pi}$$

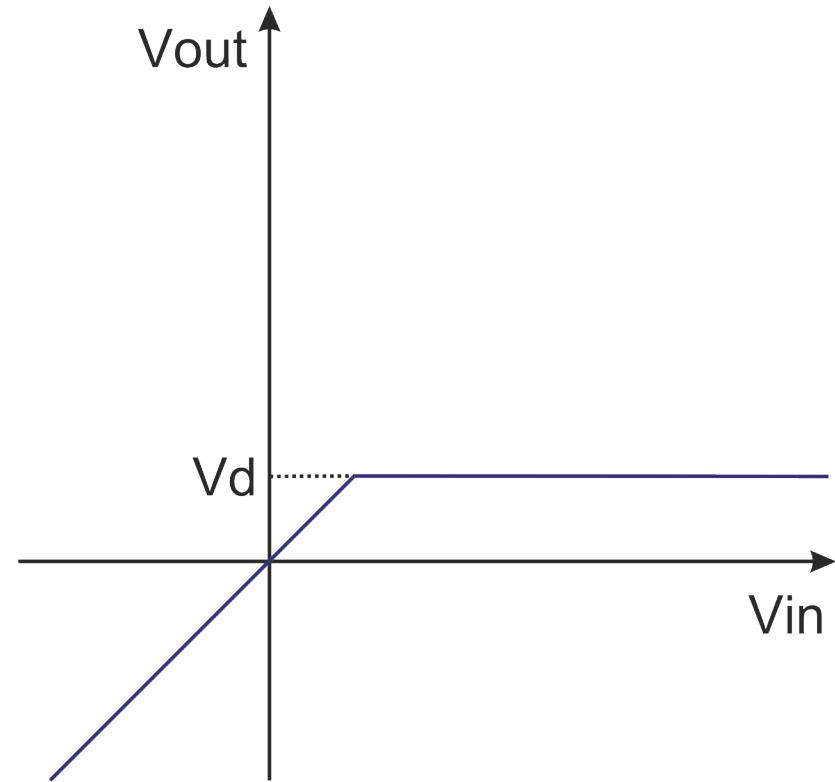
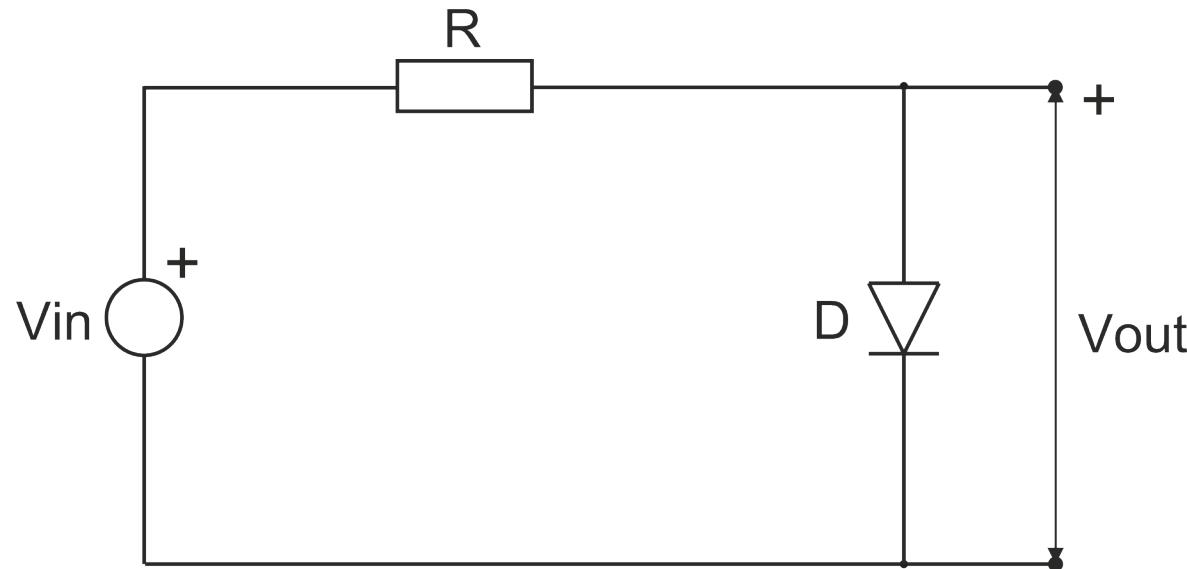
$$V_0 = \frac{2}{\pi} \frac{N_s}{N_p} \cdot V_{EEM}$$

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{2}{\pi} \frac{V_{EEM}}{V_0}$$



# Ograničavač napona

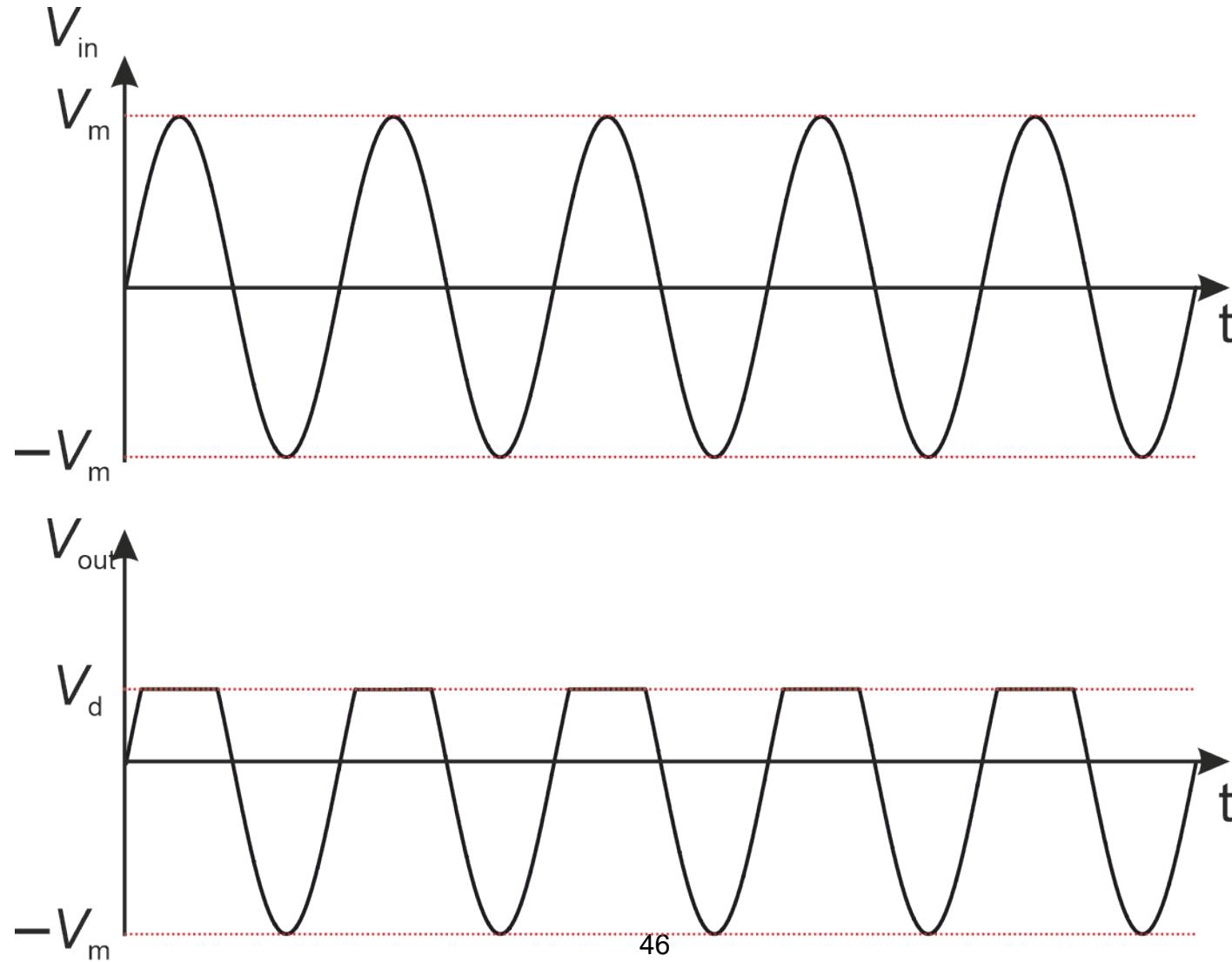
Prenosna karakteristika kola



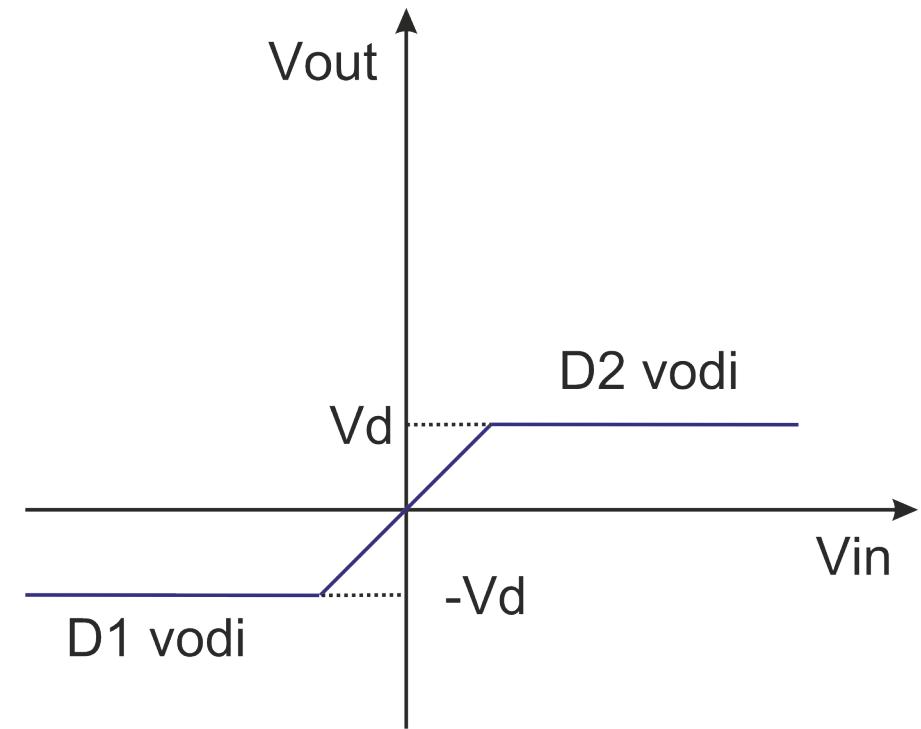
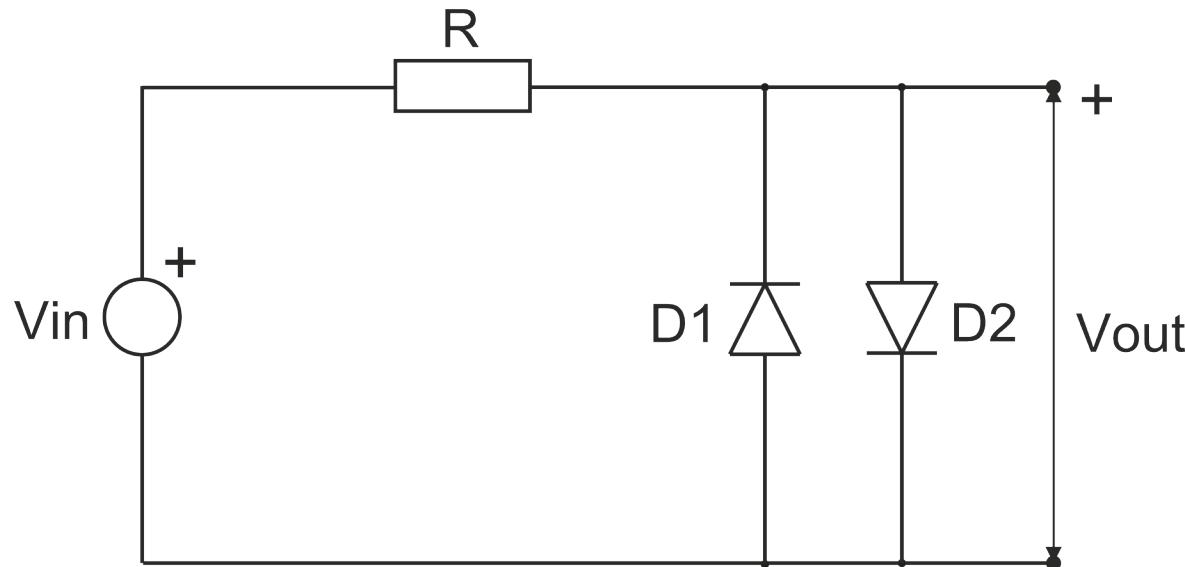
# Ograničavač napona – prenosna karakteristika

- Zavisnost izlazne veličine (struje, napona) od ulazne veličine (struje, napona) naziva se prenosna karakteristika.
- Prenosne karakteristike su svojstvene **četvoropolima**, mogu biti **naponsko-naponska (V-V)**, **strujno-naponska (I-V)**, **naponsko strujna (V-I)** i **strujno-strujna (I-I)**.
- Prenosna karakteristika ograničavača napona je **naponsko-naponska (V-V)**.

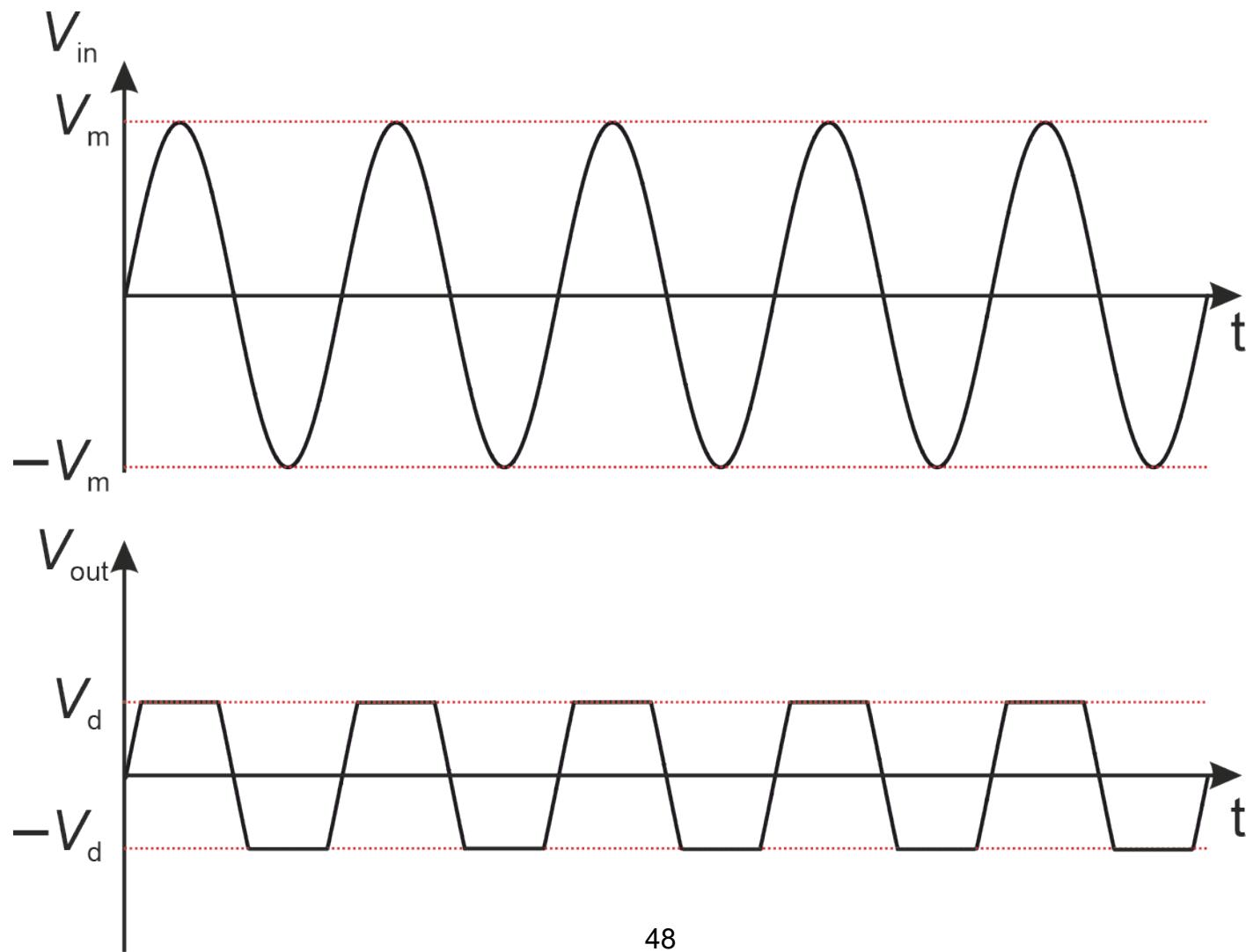
# Ograničavač napona – talasni oblici signala



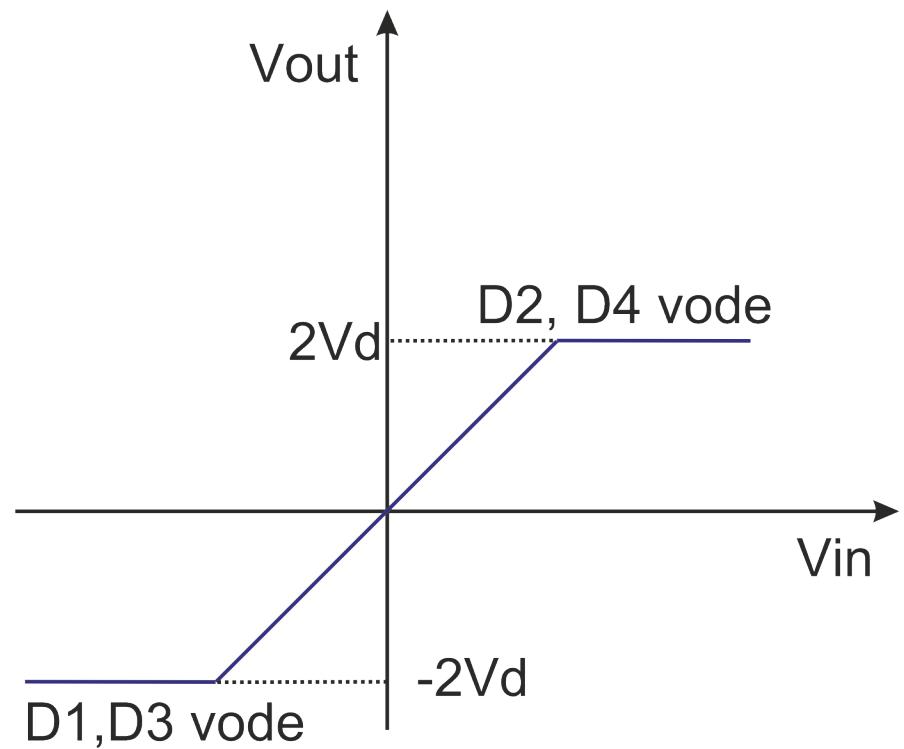
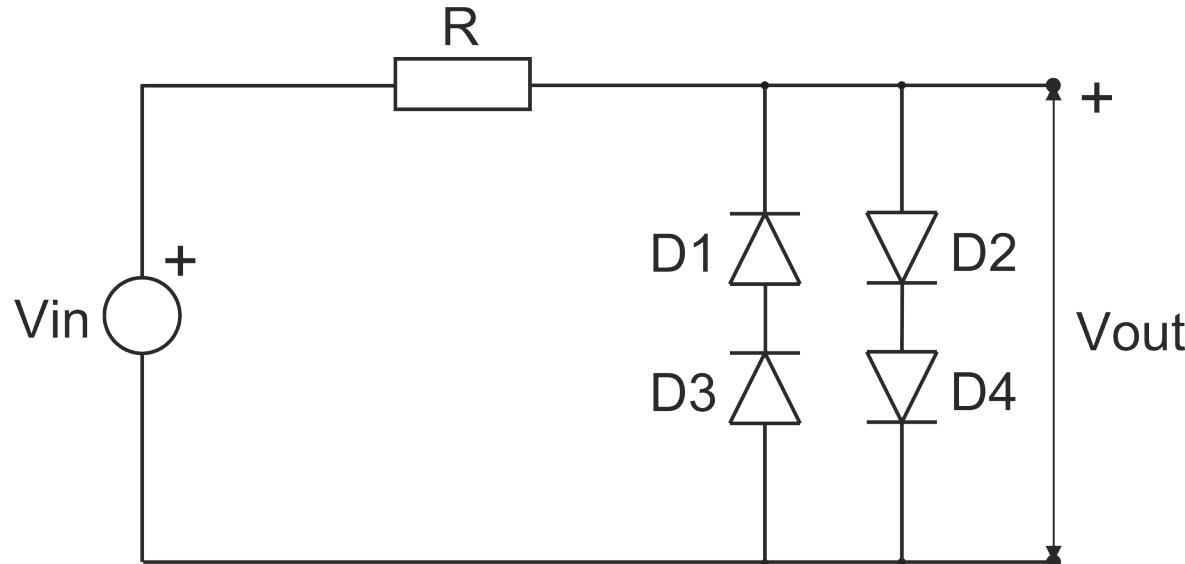
# Dvostrani ograničavač napona



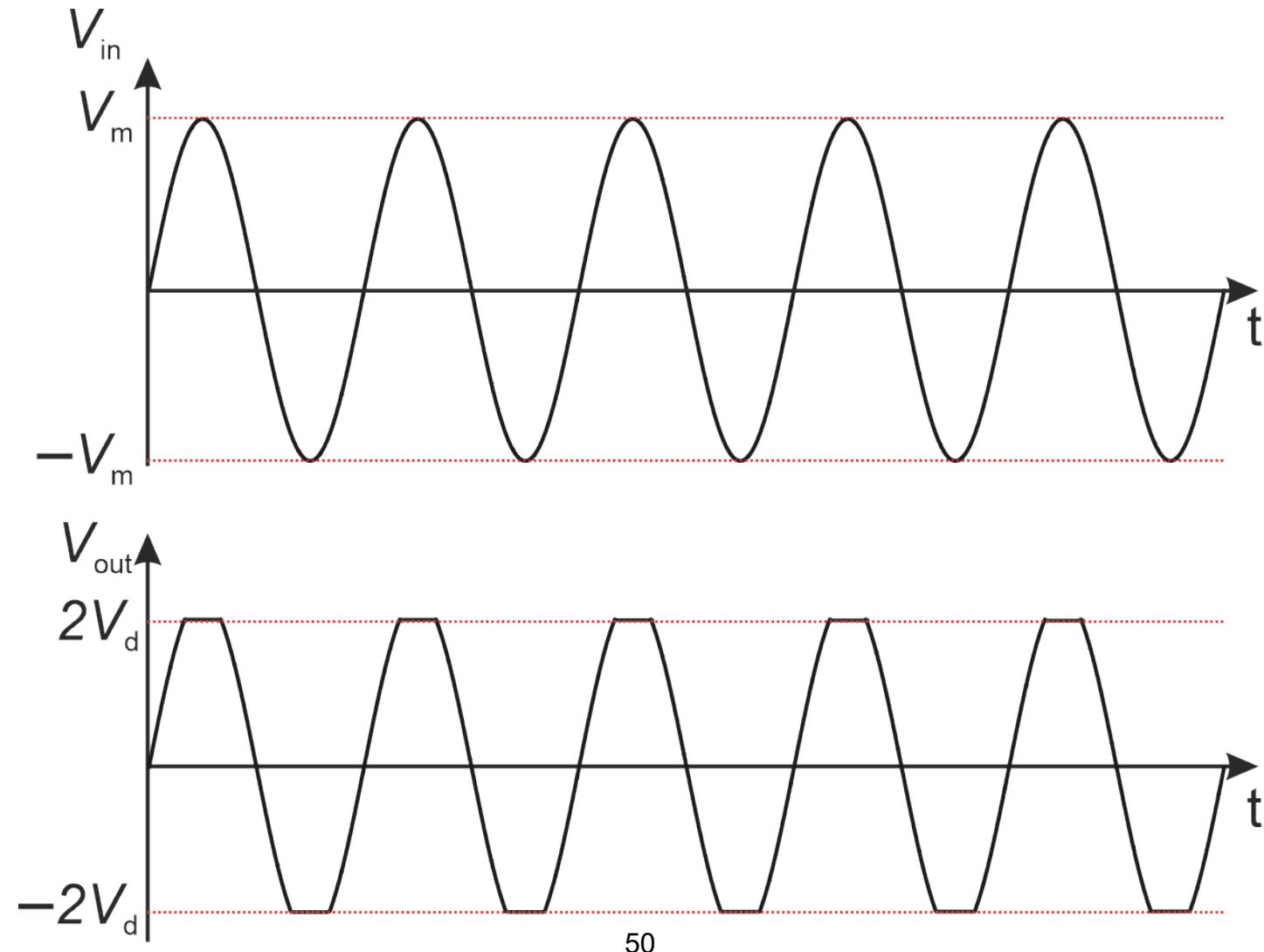
# Dvostrani ograničavač napona – talasni oblici s.



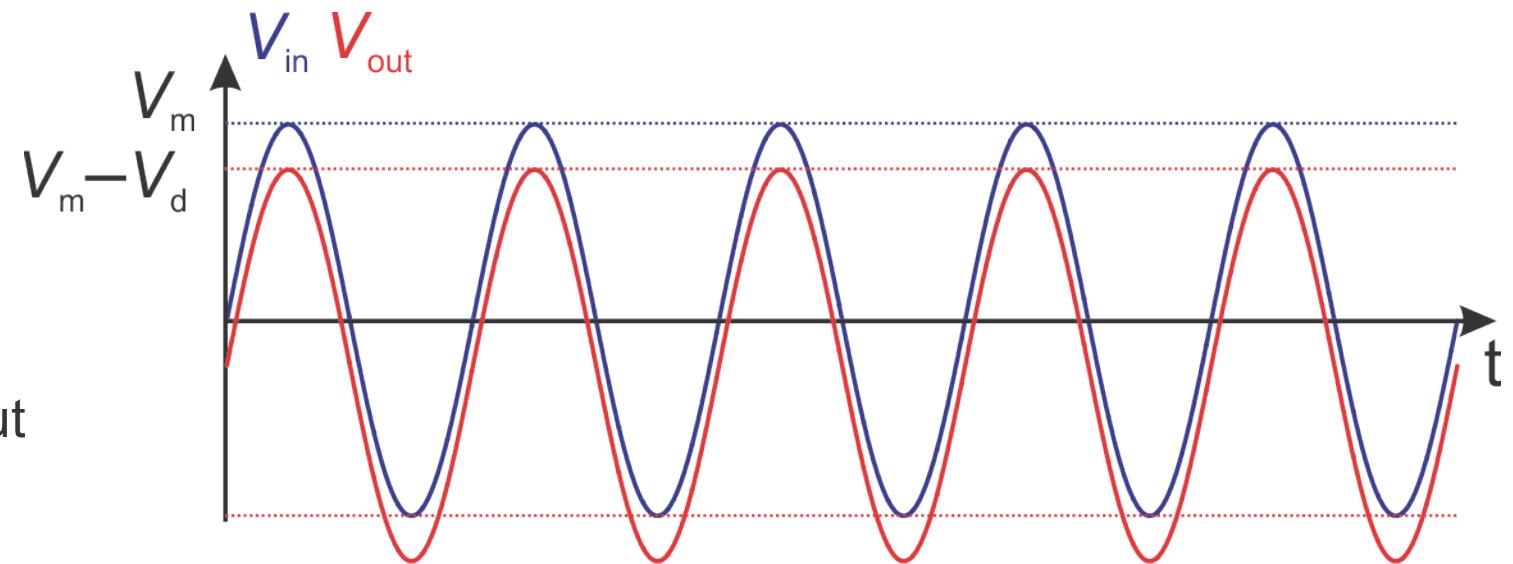
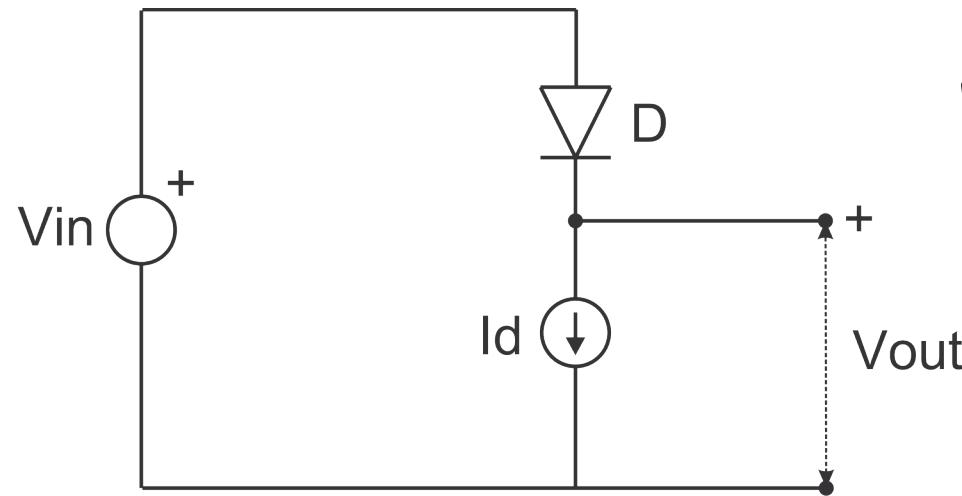
# Dvostrani ograničavač napona



# Dvostrani ograničavač napona – talasni oblici s.



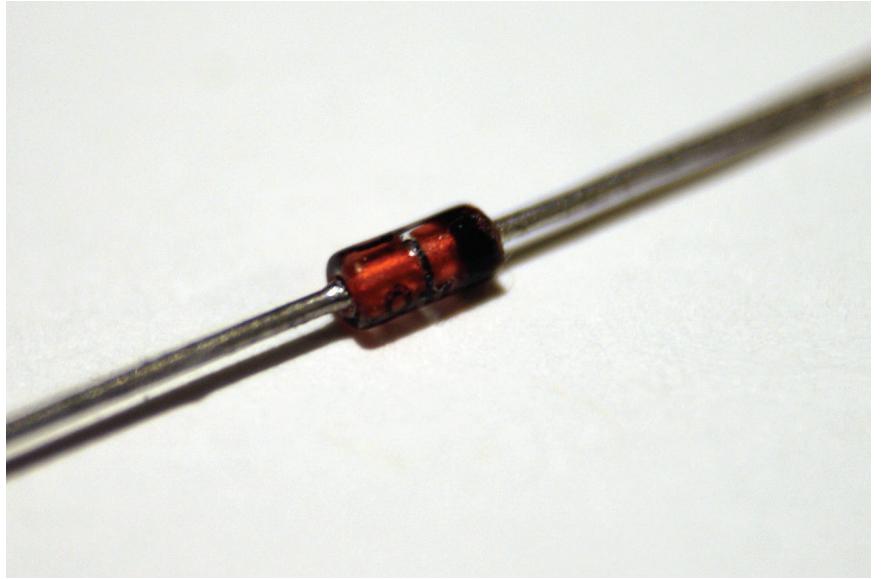
# Pomerač naponskog nivoa



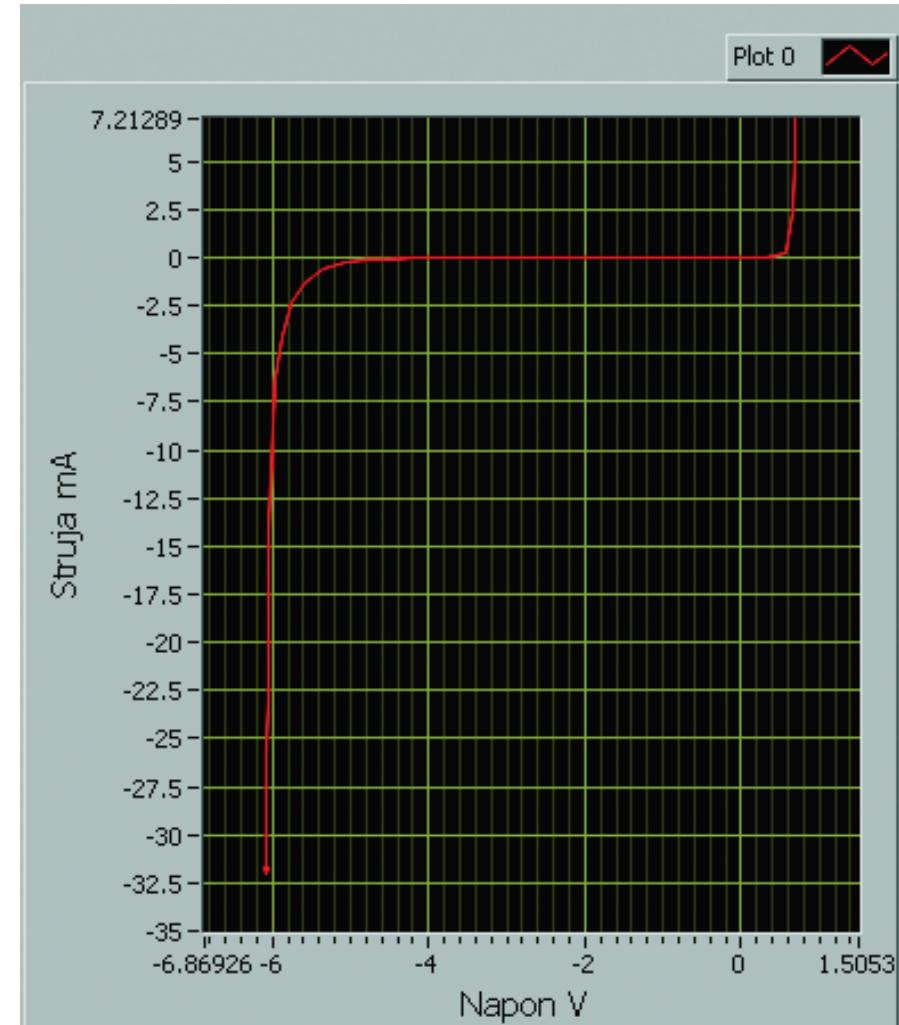
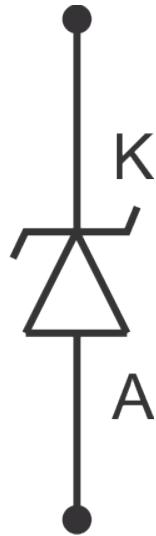
# Zener dioda

- **Zener dioda** radi u oblasti inverznog probaja.
- Prilikom povećanja napona pri inverznom režimu, mogu se dogoditi dva tipa probaja – lavinski i Zenerov probaj.
- **Zenerov probaj** predstavlja tunelovanje elektrona iz valentne u provodnu oblast. **Lavinski probaj** se javlja usled velike kinetičke energije elektrona koji u kristalu poluprovodnika oslobađaju vezane elektrone. Oba probaja su **reverzibilna**.
- Zenerov probaj se odvija na manjim naponima (tipično, manjim od 5,6V kod silicijumskih dioda).
- Zbog male dinamičke otpornosti u oblasti inverznog probaja, zener se koristi kao **naponski stabilizator ili ograničavač napona**.

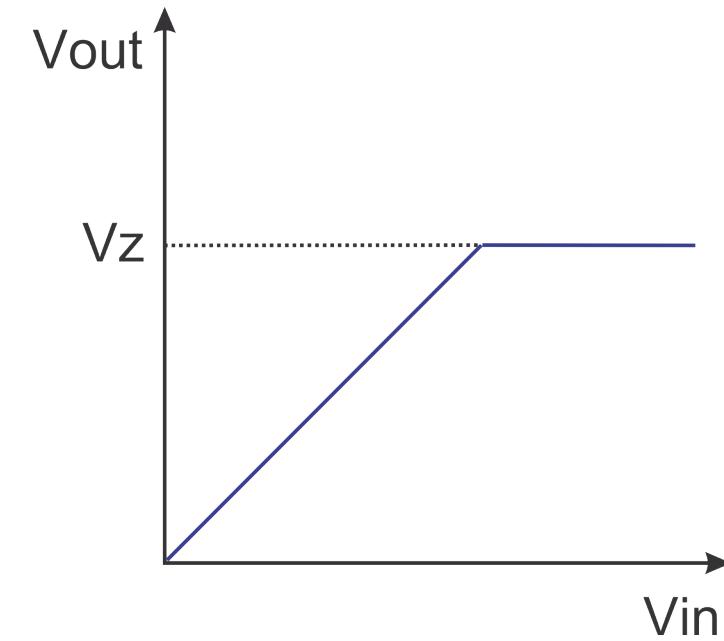
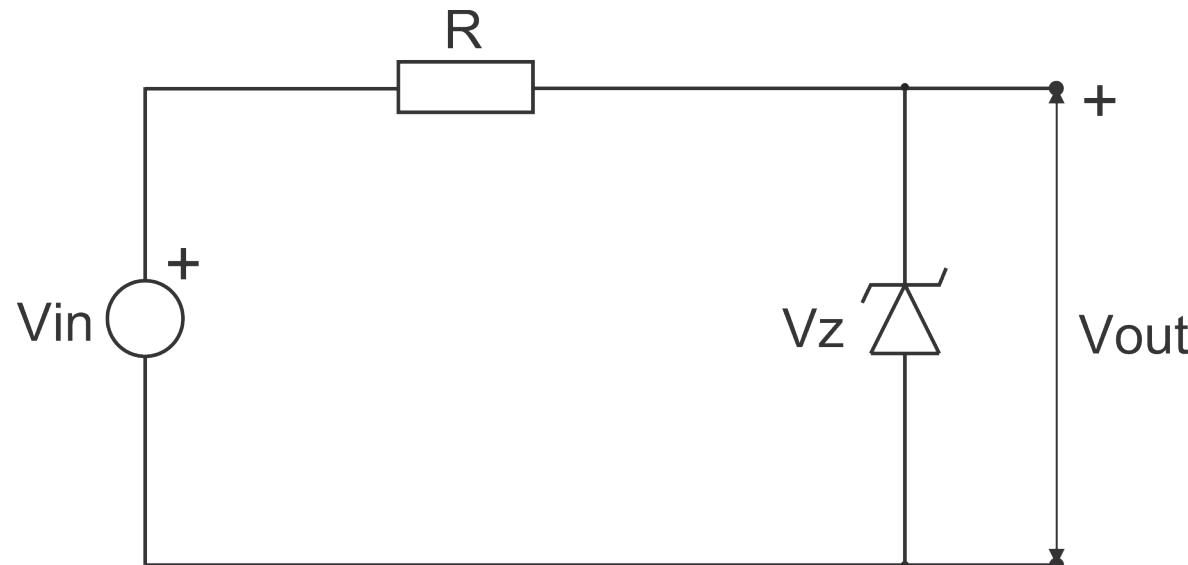
# Zener dioda



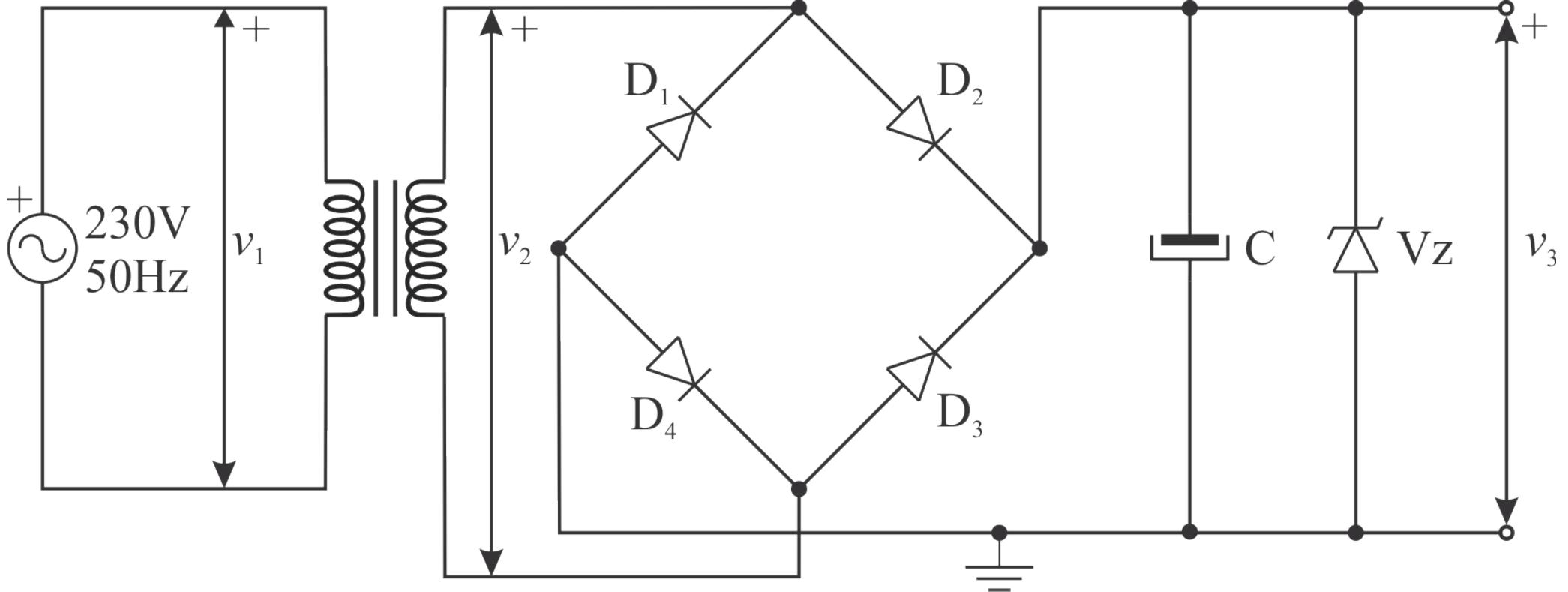
Izvor: wikipedia.com



# Zener dioda – primene: ograničavač napona

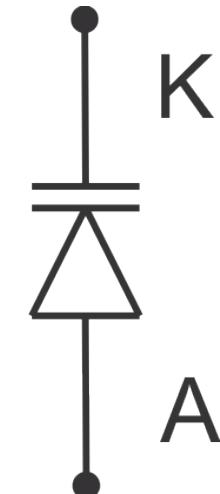
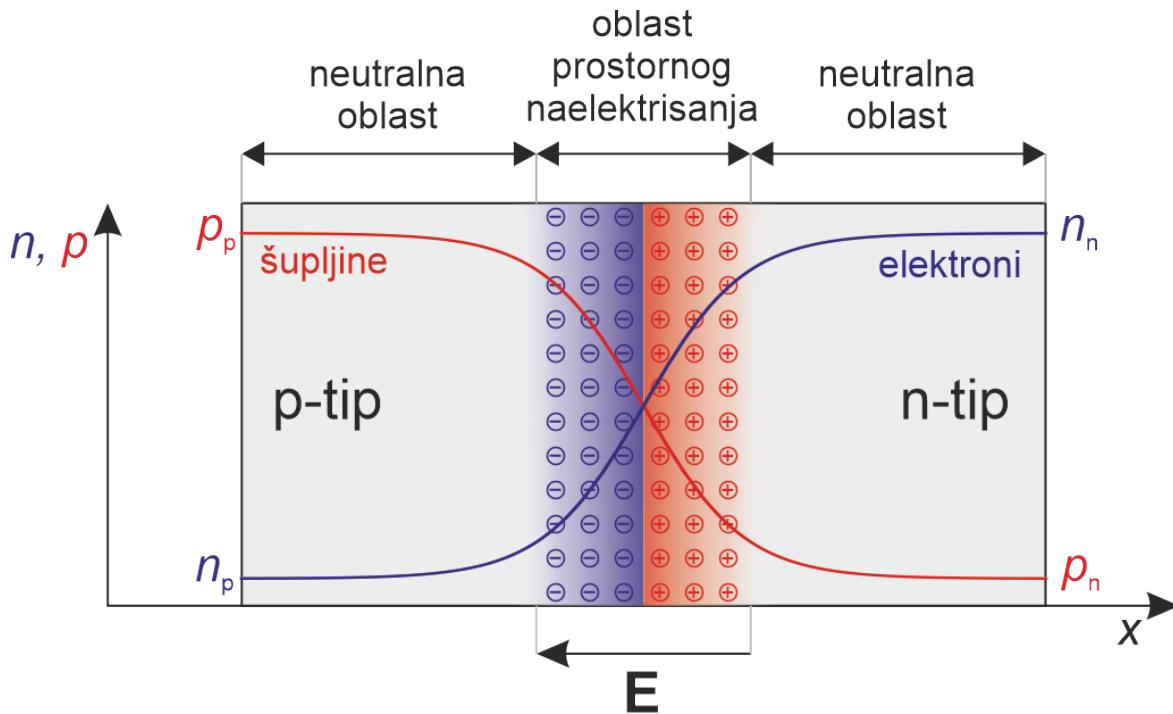


# Zener dioda – primene: stabilizator napona



# Varikap dioda

- Varikap dioda radi u oblasti **inverzne polarizacije**.
- Oblast prostornog naelektrisanja (osiromašena oblast) se ponaša kao **dielektrik** čija širina zavisi od inverznog napona.



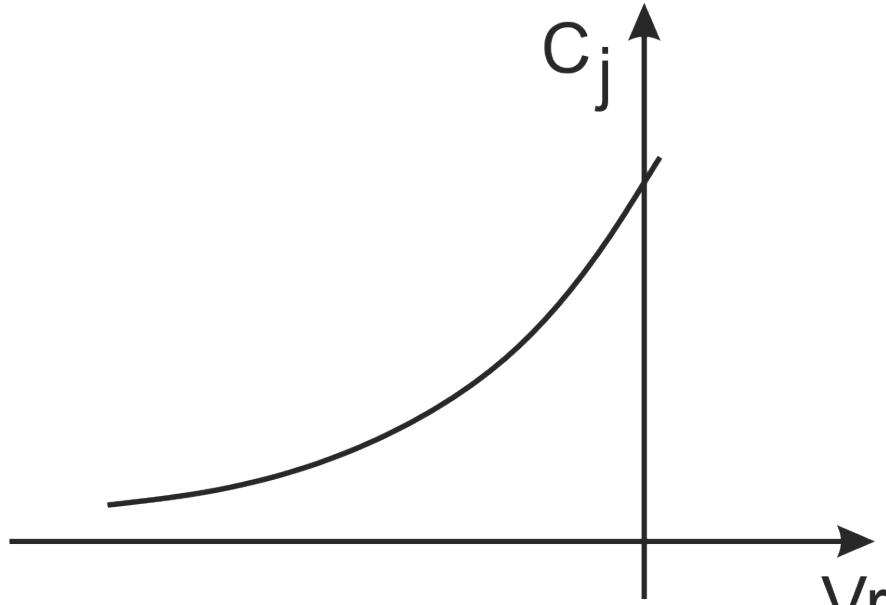
# Varikap dioda

- Inverzno polarisana dioda se ponaša kao kondenzator čija kapacitivnost  $C_j$  zavisi od inverznog napona  $V_r$ :

$$C_j = \frac{C_{j0}}{\sqrt{1 - \frac{V_r}{V_0}}}$$

$$V_0 = \frac{kT}{q_e} \ln \frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2}$$

$$C_{j0} = \sqrt{\frac{\epsilon_{Si} \cdot q_e}{2}} \cdot \frac{N_A \cdot N_D}{N_A + N_D} \cdot \frac{1}{V_0}$$



# Tunel dioda

- Dinamička otpornost može biti negativna veličina.
- Primer komponente sa **negativnom dinamičkom otpornošću** je tunel dioda.

$$\theta > 90^\circ, r < 0$$

