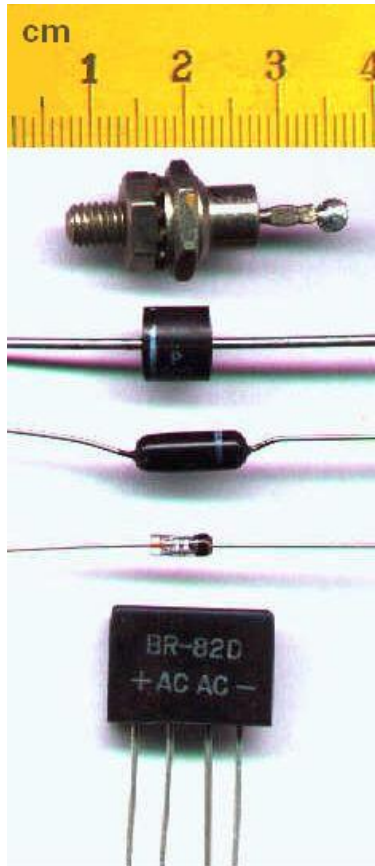


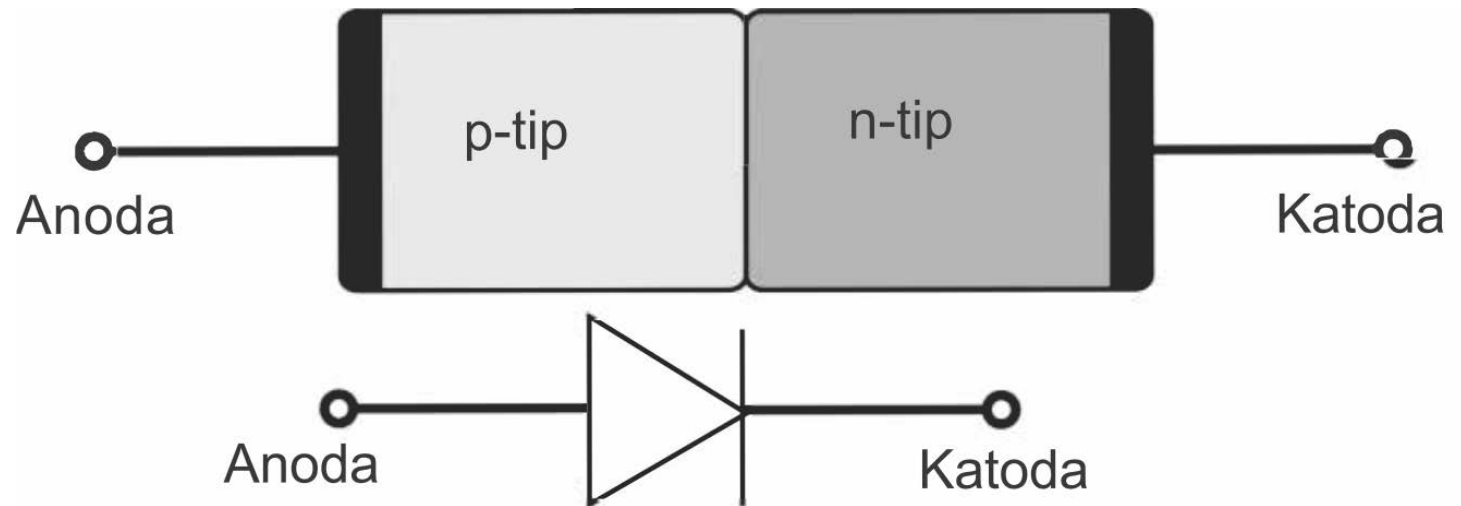
PN spoj, poluprovodnička dioda

PN spoj, poluprovodnička dioda

- Dioda je najjednostavniji poluprovodnički element



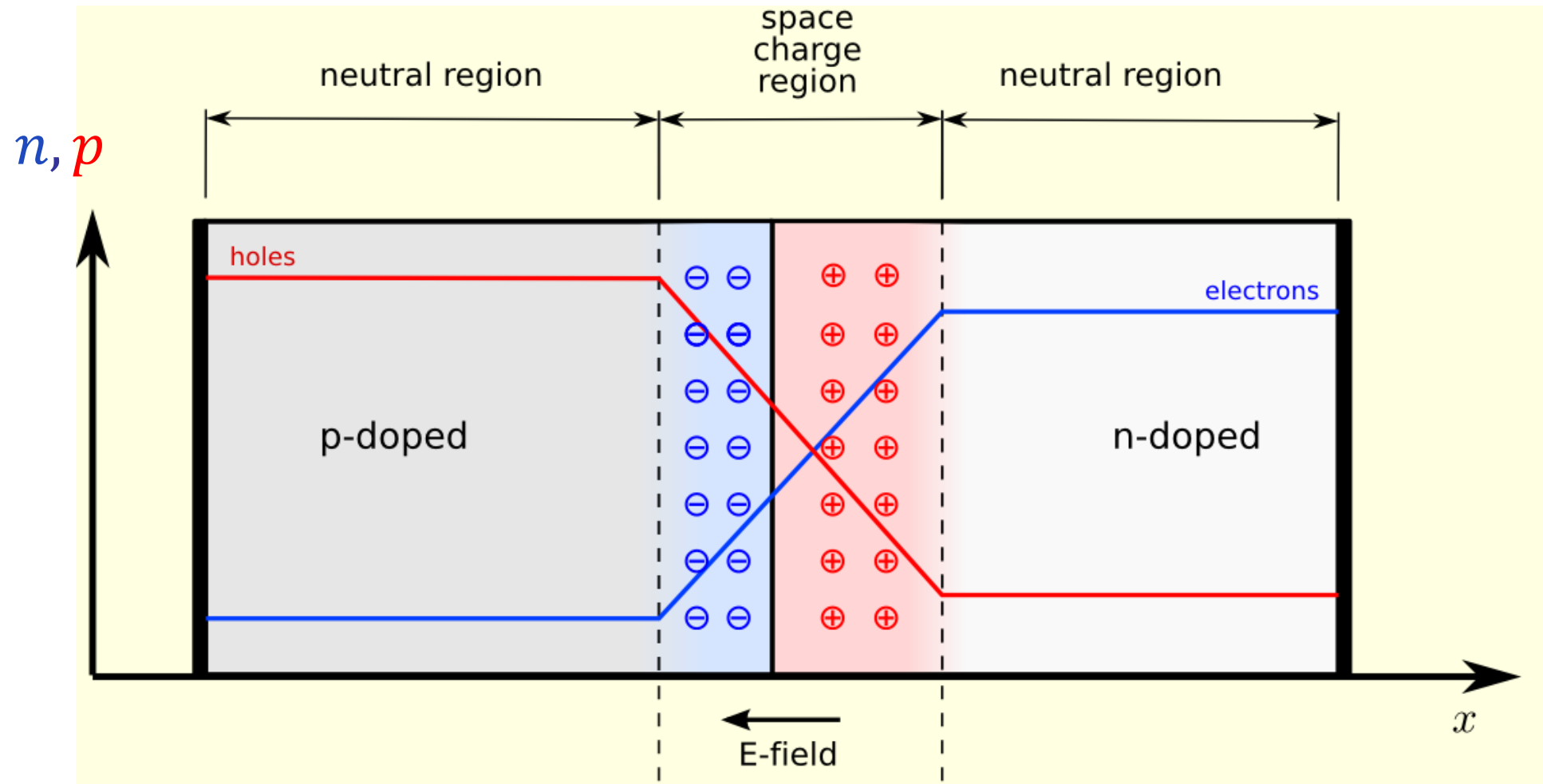
Izvor: Wikipedia.com



PN spoj, poluprovodnička dioda

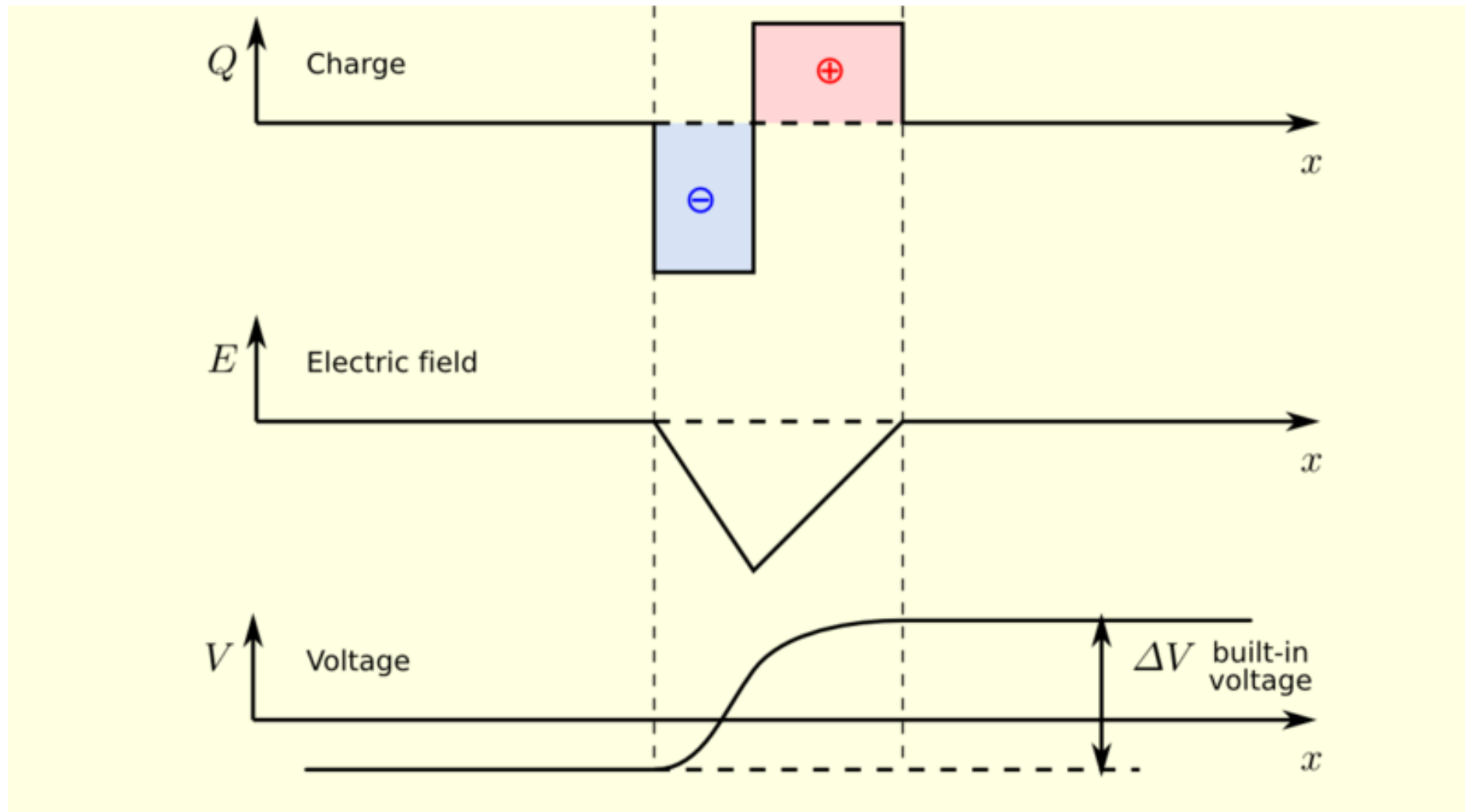
- Napon na diodi je razlika napona na anodi i katodi, $V_d = V_A - V_K$
- PN spoj može biti nepolarisan ($V_d = 0$), direktno polarisan ($V_d > 0$) i inverzno polarisan ($V_d < 0$).

Nepolarisani PN spoj

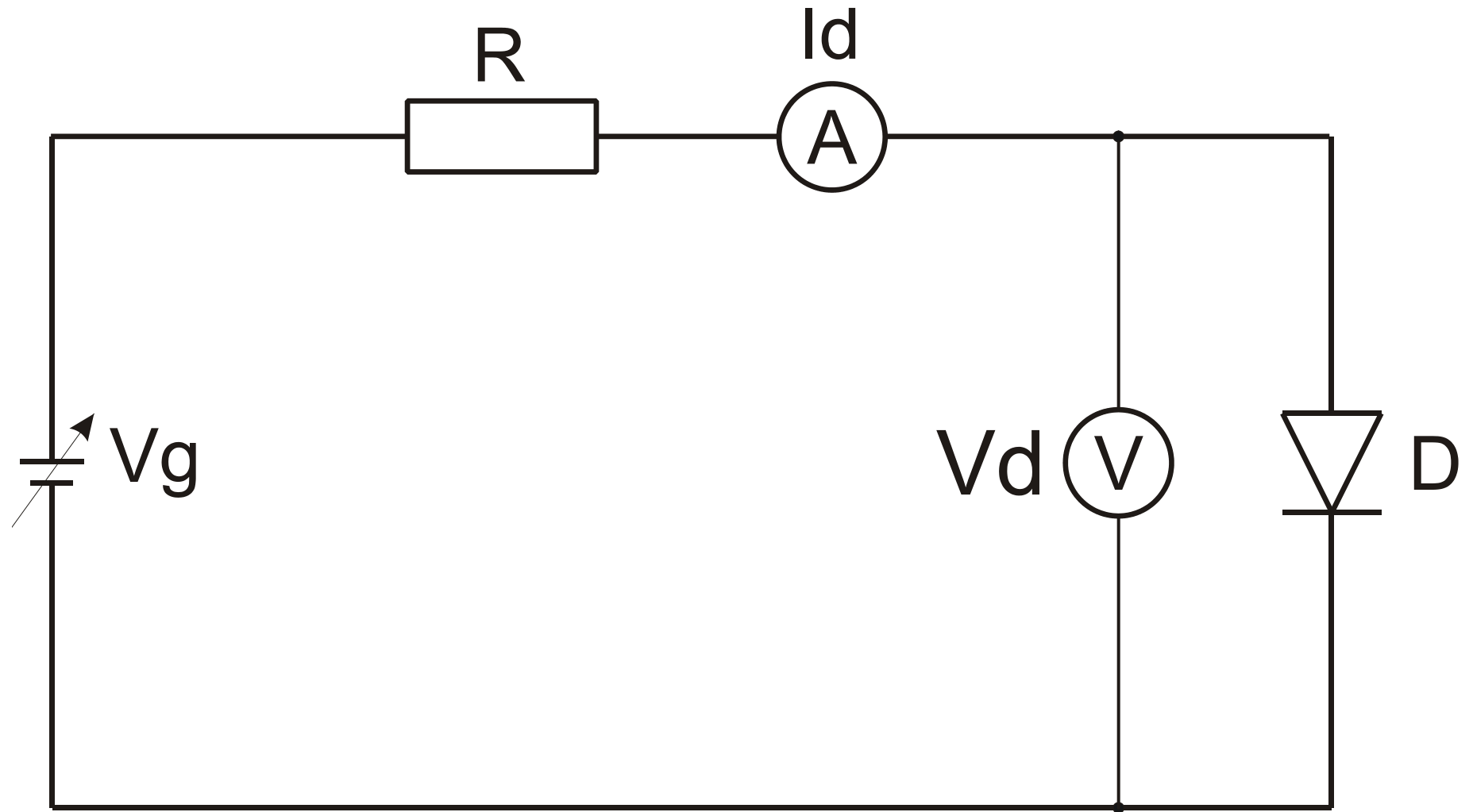


Izvor: Wikipedia.com

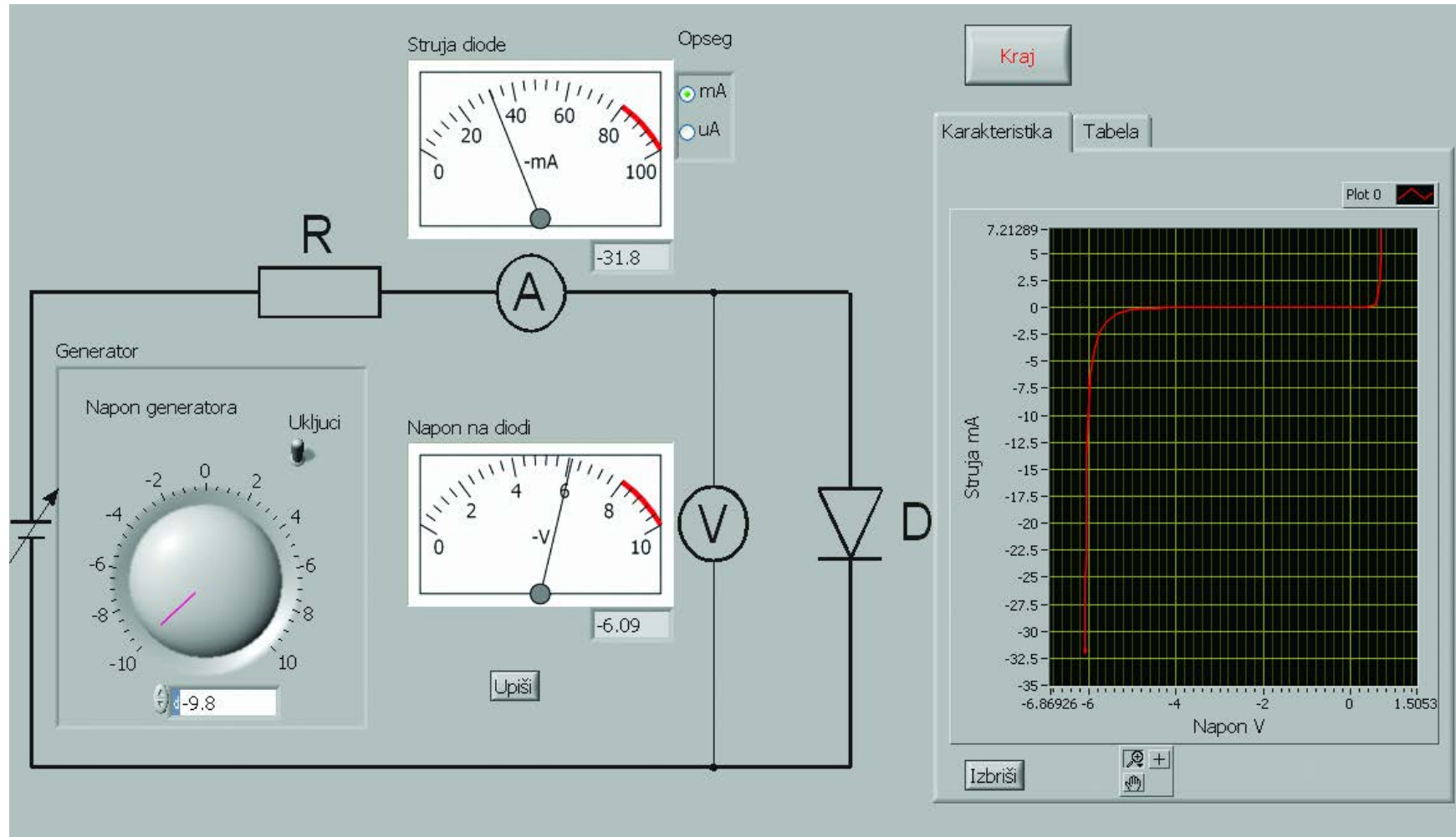
Nepolarisani PN spoj



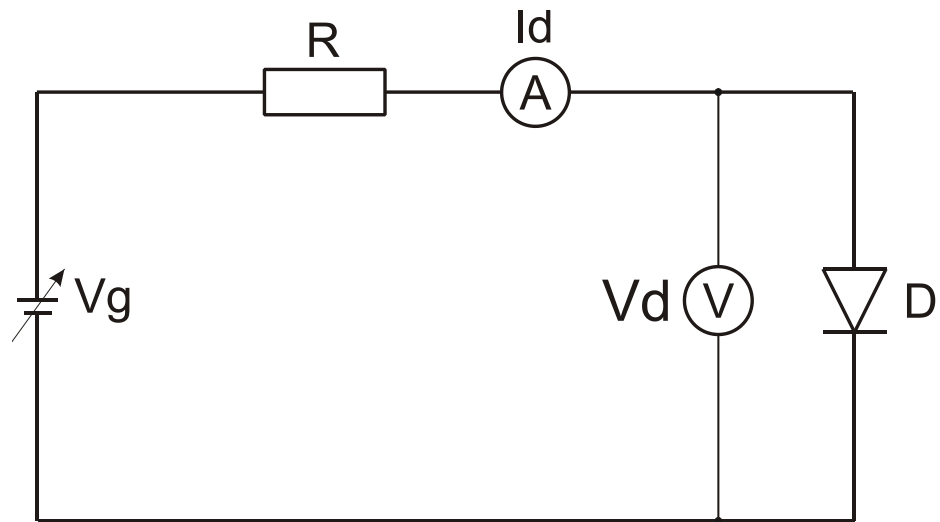
Polarisani PN spoj



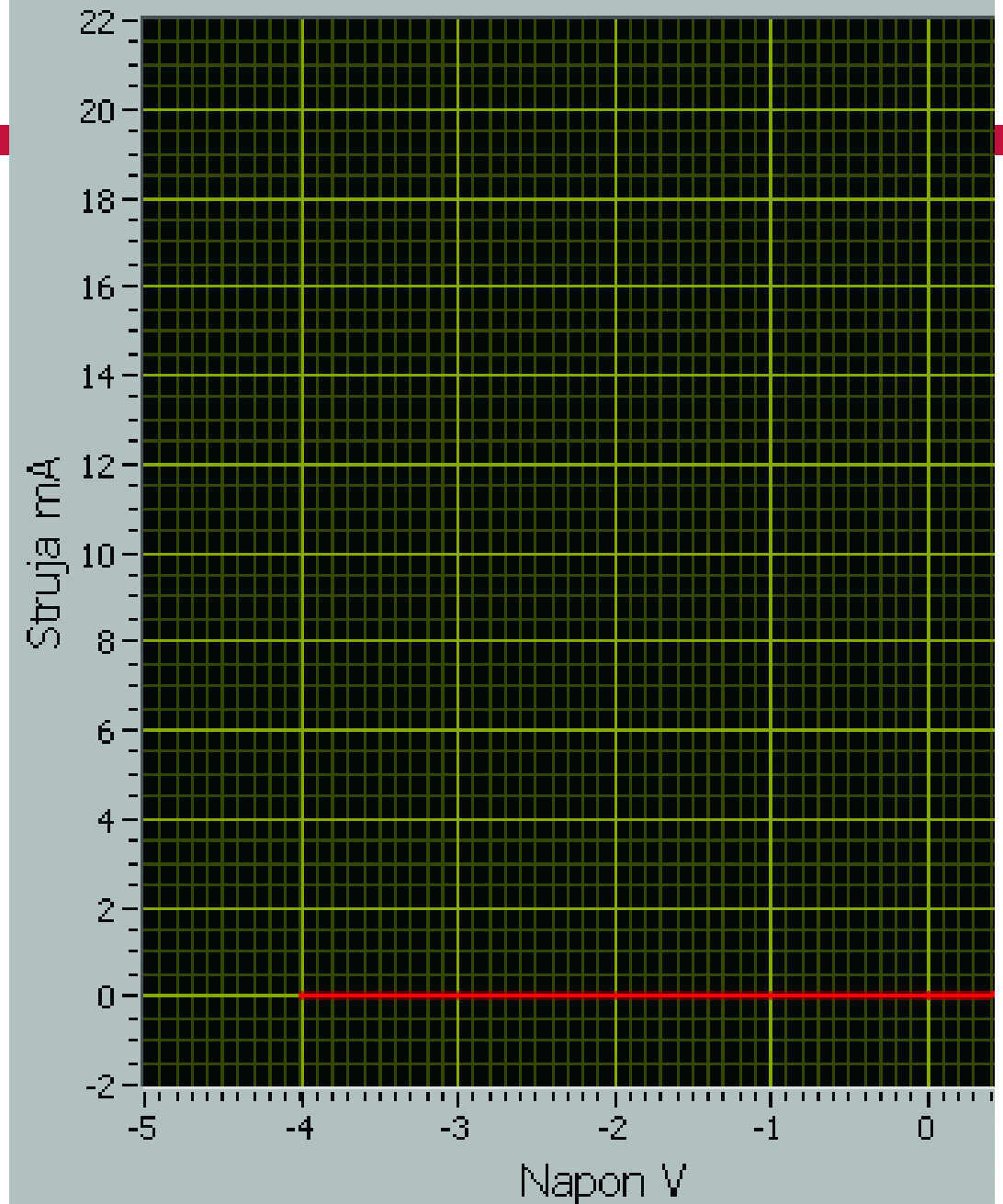
Inverzno polarisani PN spoj



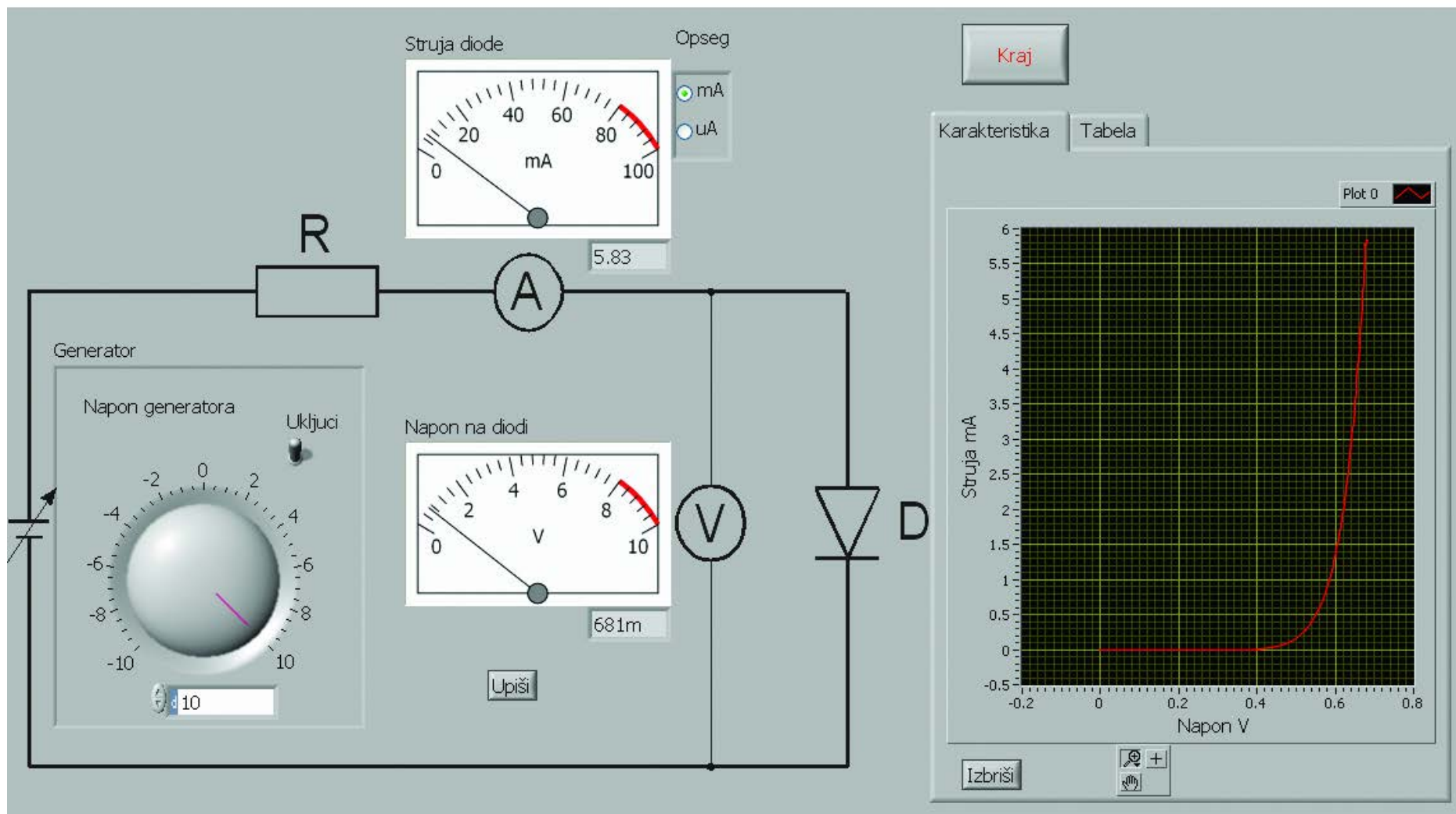
Inverzno polarisani PN spoj



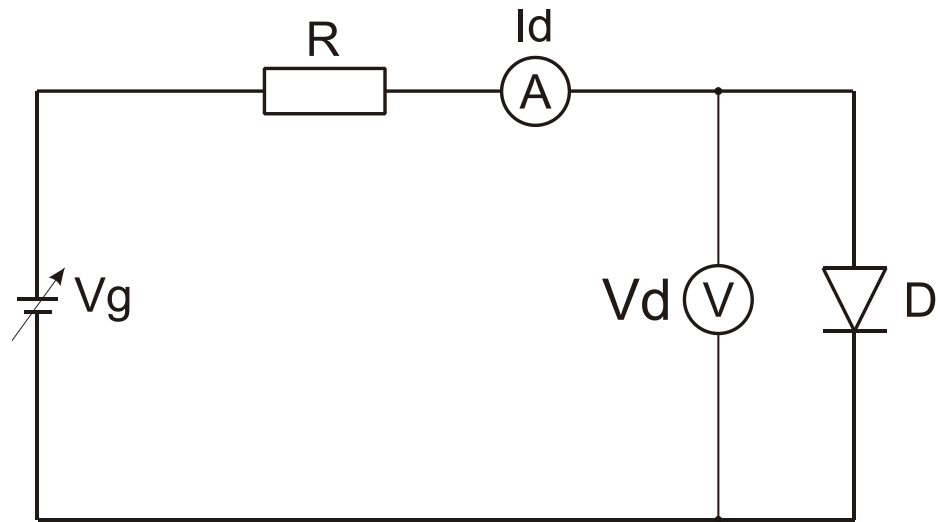
$V_g < 0$



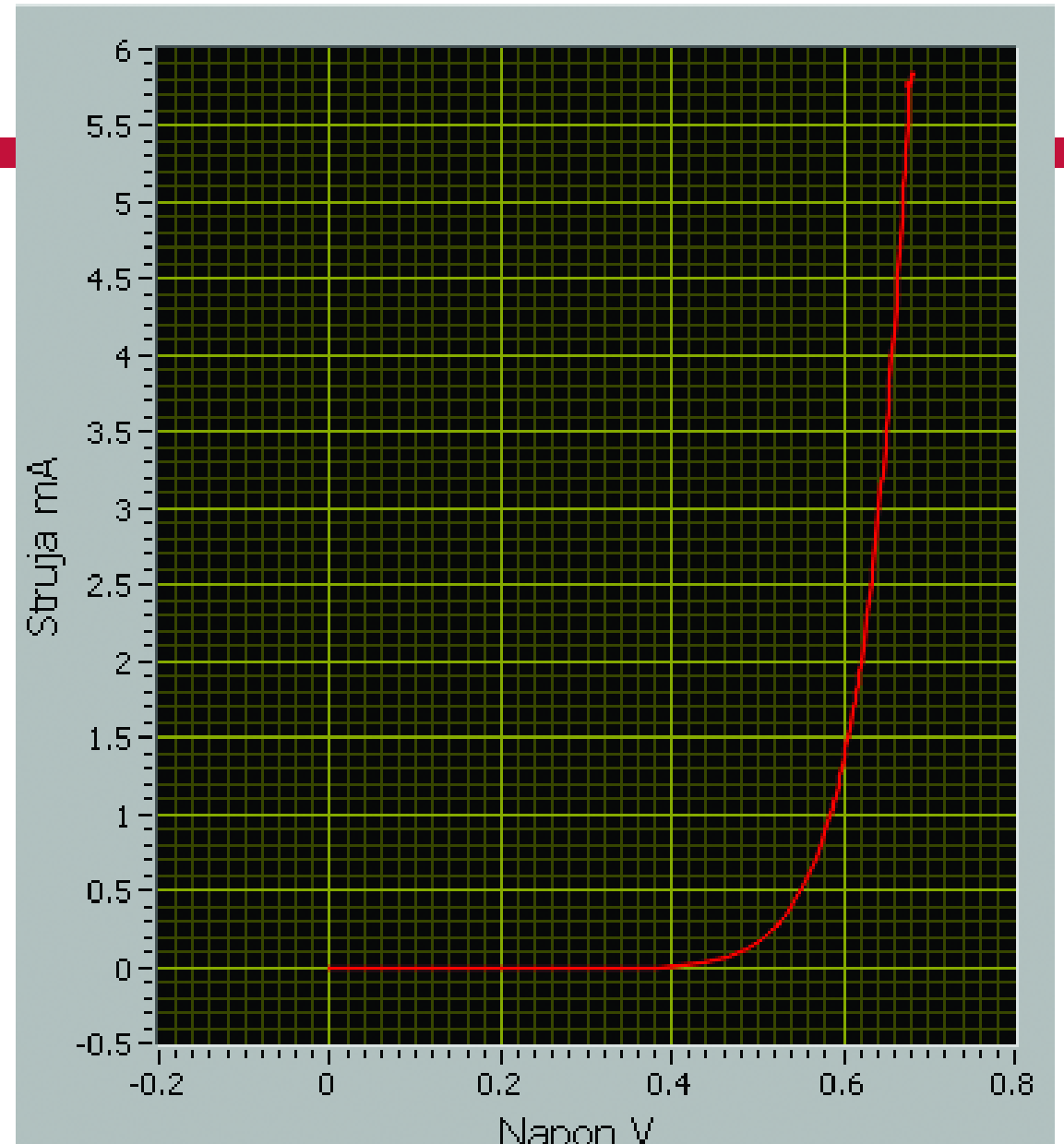
Direktno polarisani PN spoj



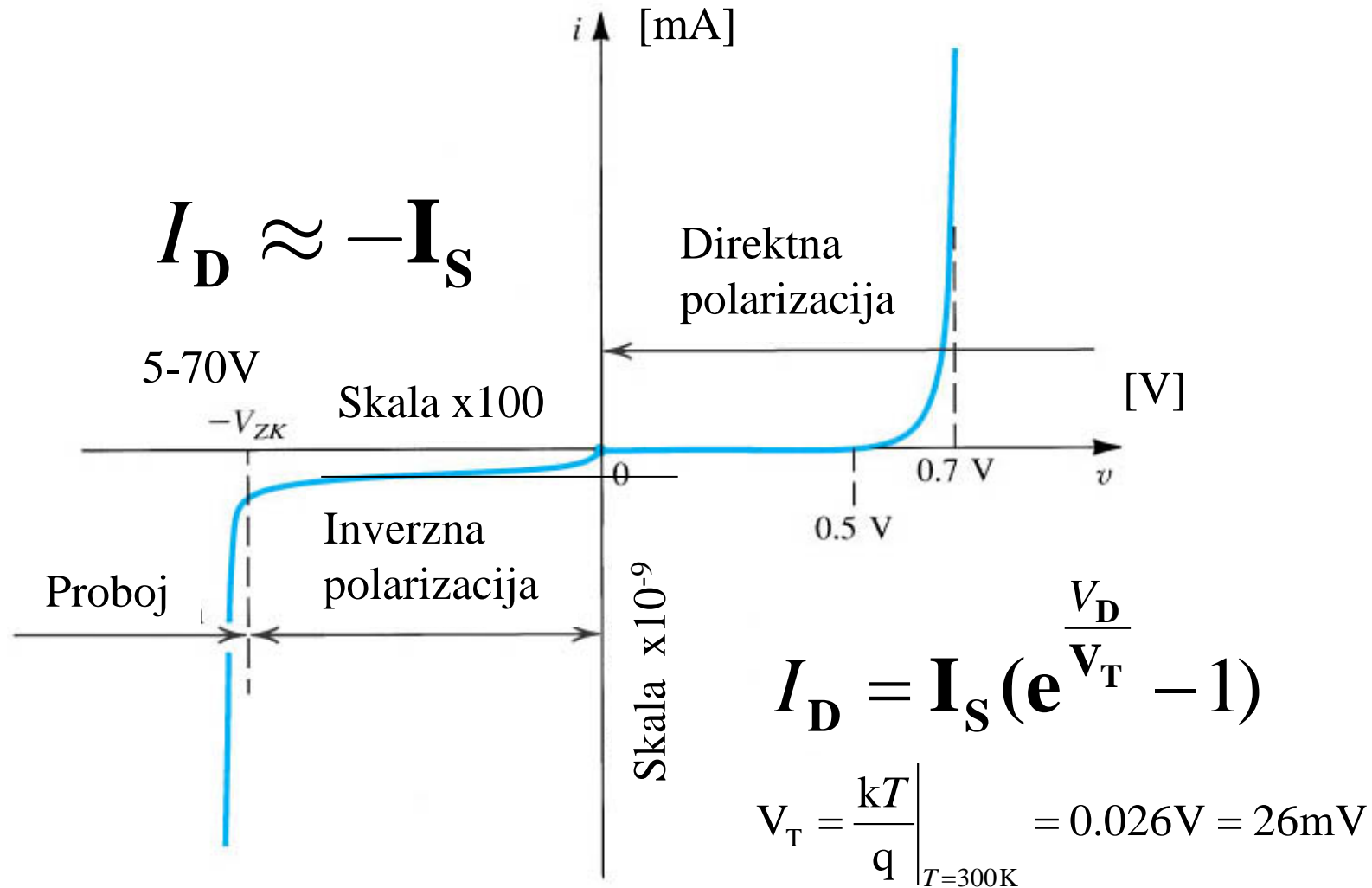
Direktno polarisani PN spoj



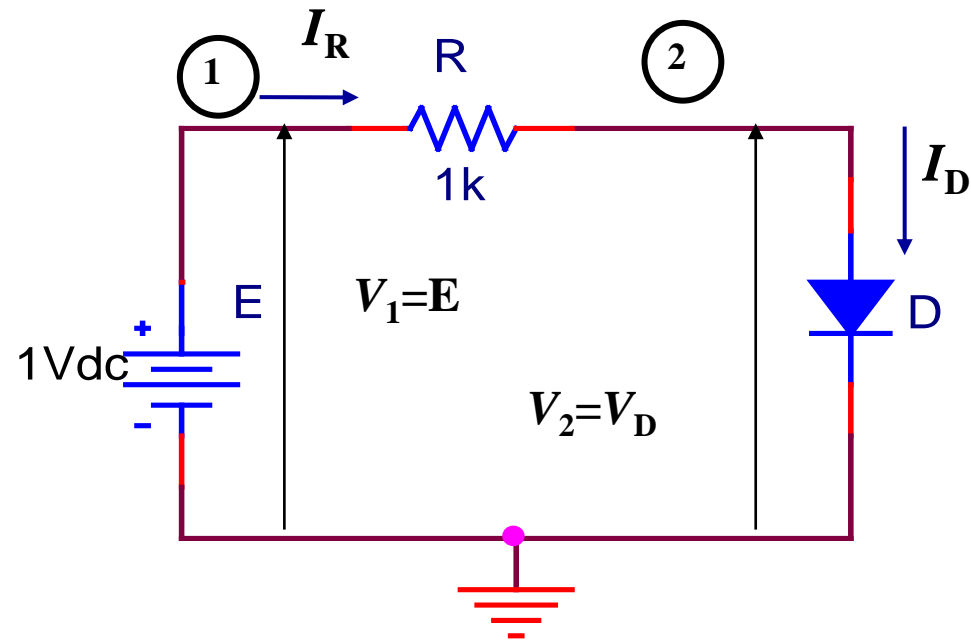
$V_g > 0$



Karakteristika diode



Modeli diode



$$\frac{V_1 - V_2}{R} = I_R$$

$$\frac{V_2 - V_1}{R} + I_D(V_D) = 0$$

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

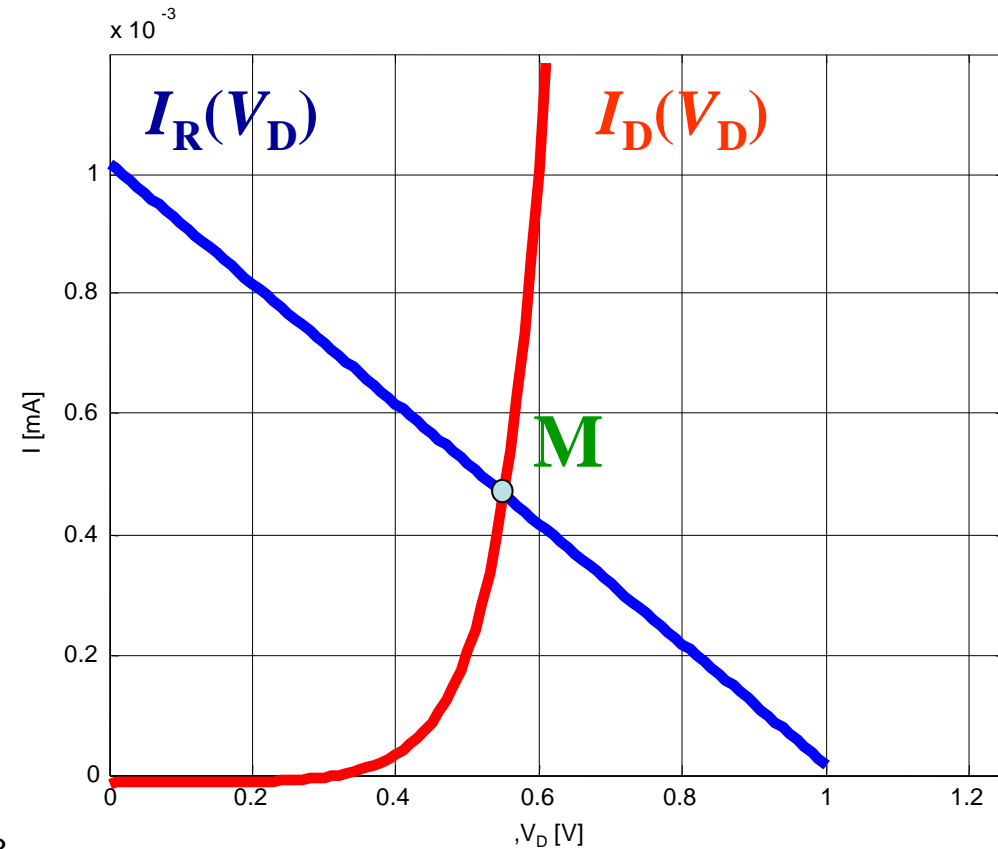
$$V_D = ?$$

Modeli diode

- Grafička interpretacija problema

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

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

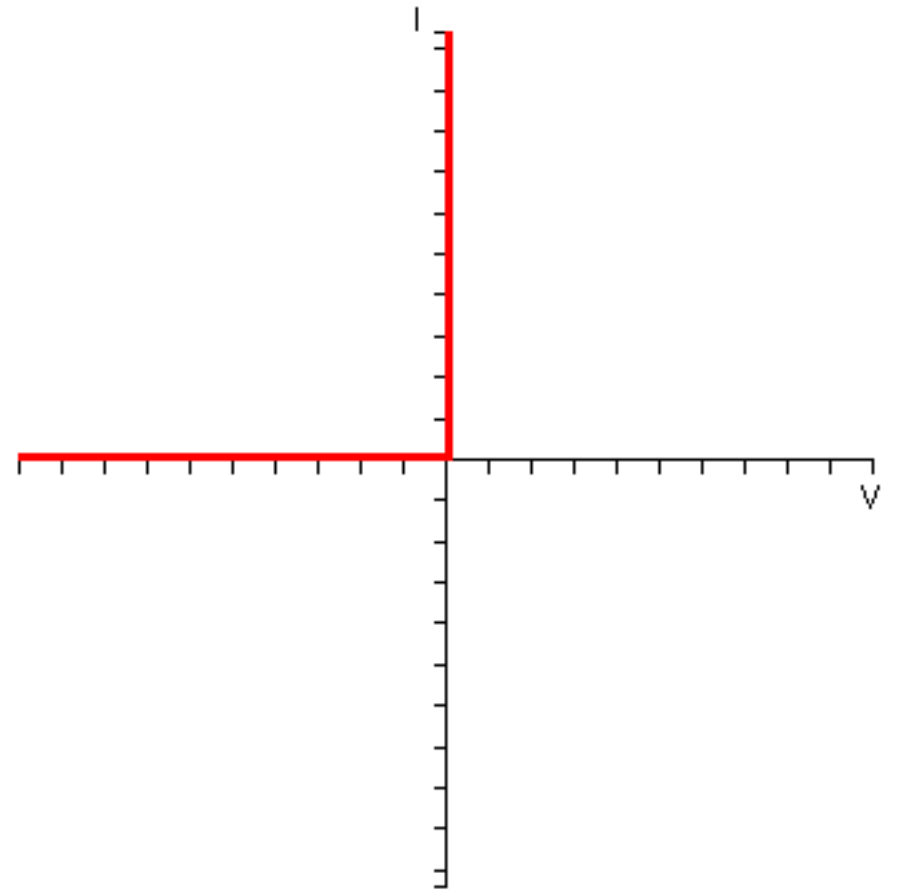


Modeli diode

- Karakteristika diode je nelinearna
- Neophodno je primeniti numerički metod za rešavanje sistema nelinearnih jednačina ili primeniti neki model koji je jednostavniji (linearan)
- Tri modela diode: model idealne diode, model konstantnog napona i model eksponencijalne zavisnosti struje

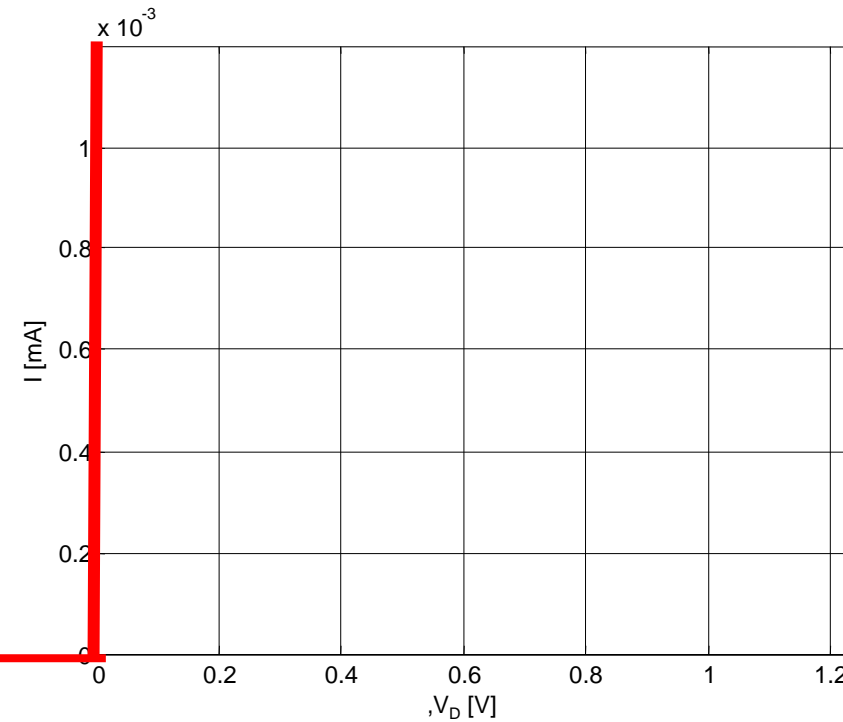
Modeli diode – idealna dioda

- Dioda vodi kada je direktno polarisana – kratak spoj, kada je inverzno polarisana ne vodi – prekid u kolu



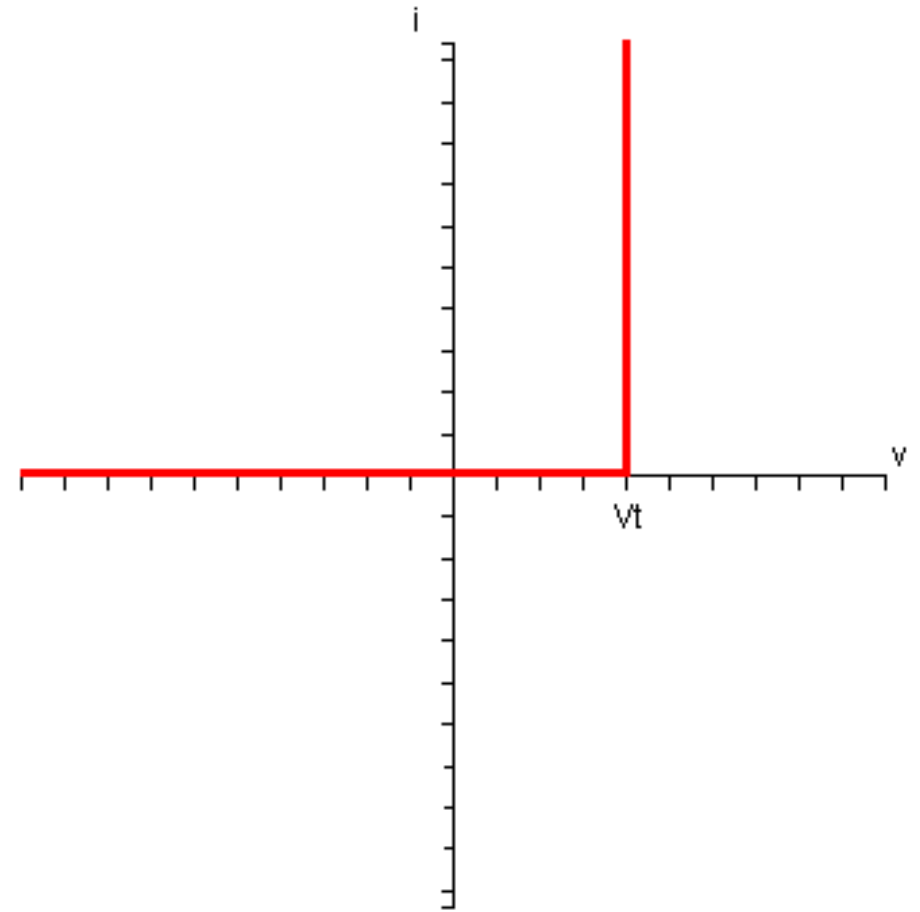
Modeli diode – idealna dioda

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

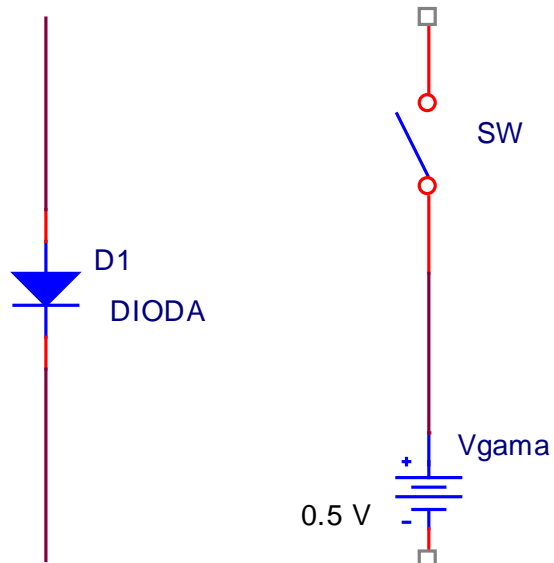


Modeli diode – model konstantnog napona

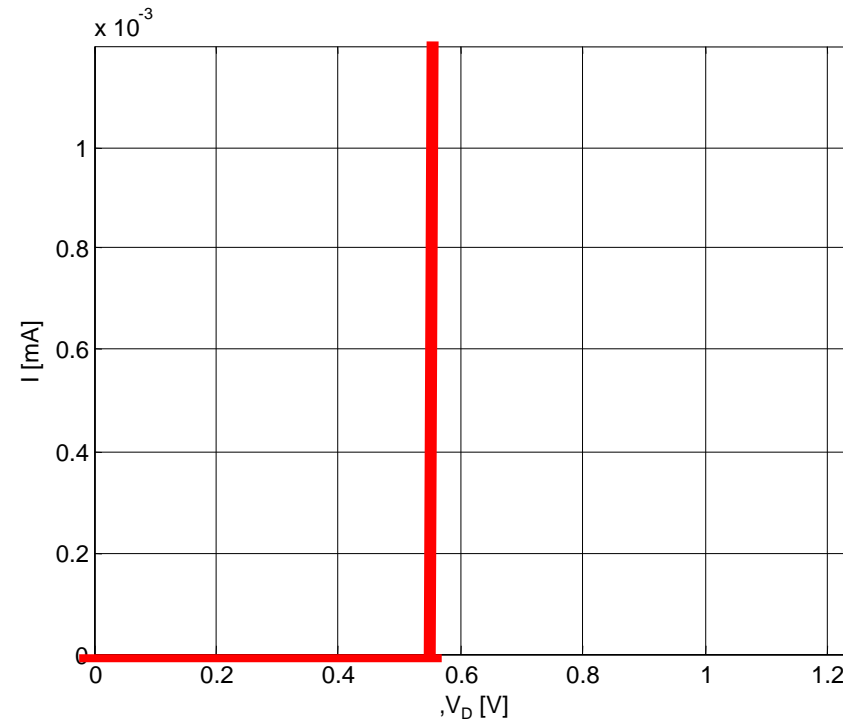
- Dioda vodi kada je direktno polarisana – idealni naponski generator, kada je inverzno polarisana ne vodi – prekid u kolu



Modeli diode – model konstantnog napona

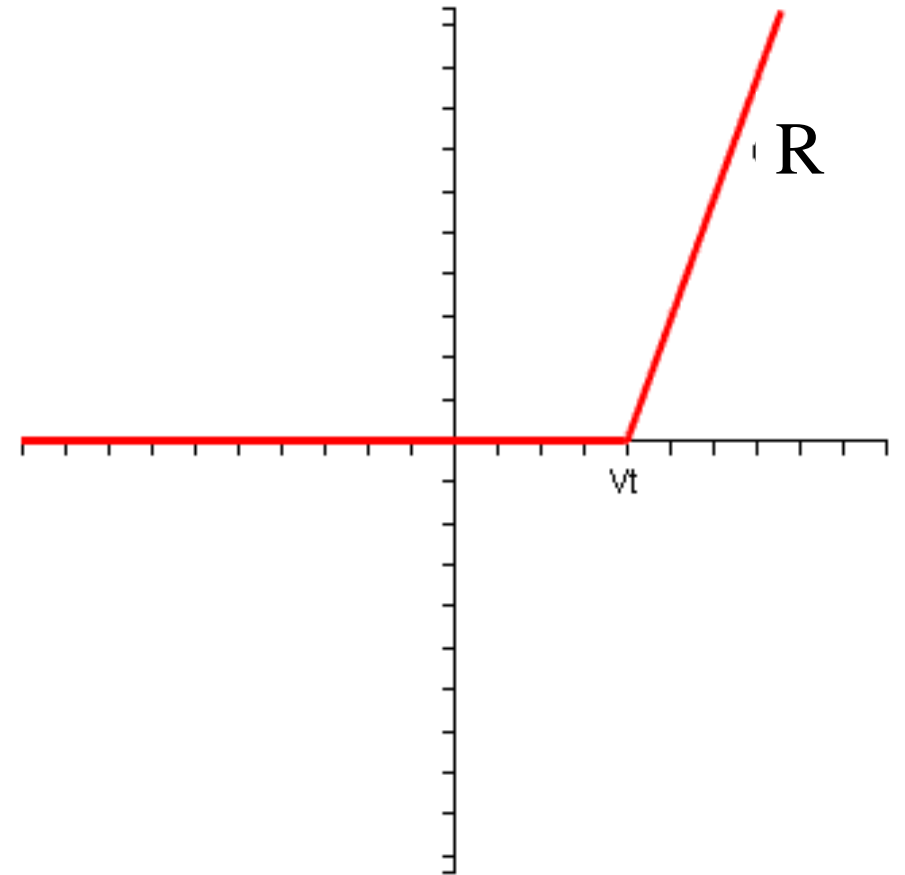


$$I_D = 0 \quad \text{za } V_D < V_\gamma = 0.55\text{V}$$
$$V_D = V_\gamma \quad \text{za } V_D \geq V_\gamma$$

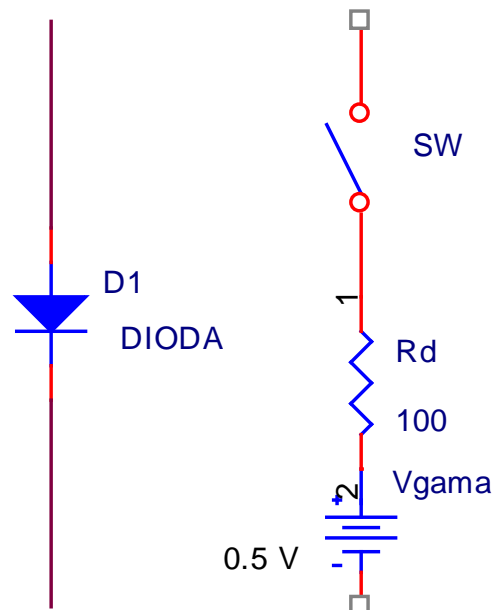


Modeli diode – model konstantnog napona

- Dioda vodi kada je direktno polarisana – realni naponski generator, kada je inverzno polarisana ne vodi – prekid u kolu

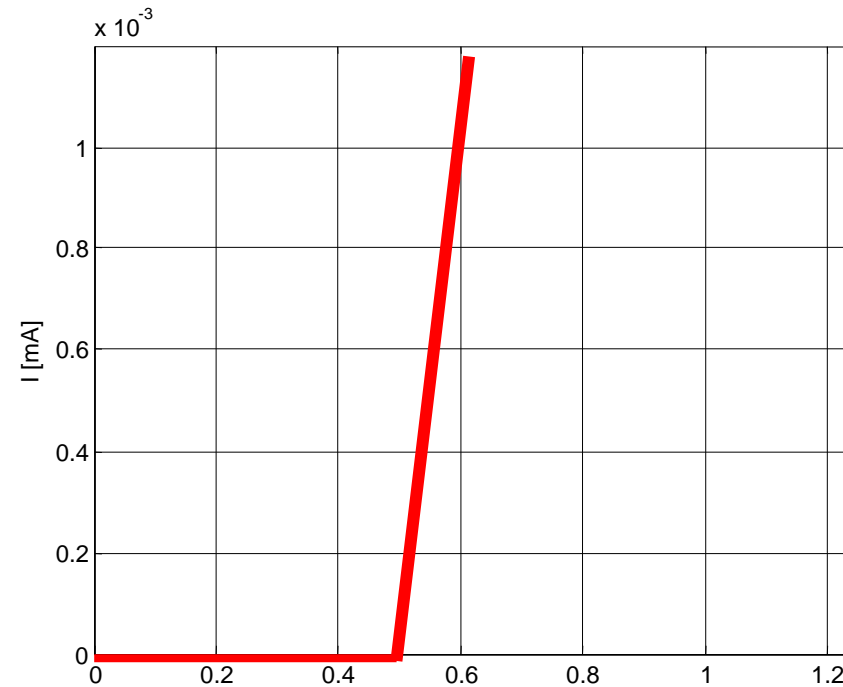


Modeli diode – model konstantnog napona



$I_D = 0$ za $V_D < V_\gamma = 0.5V$

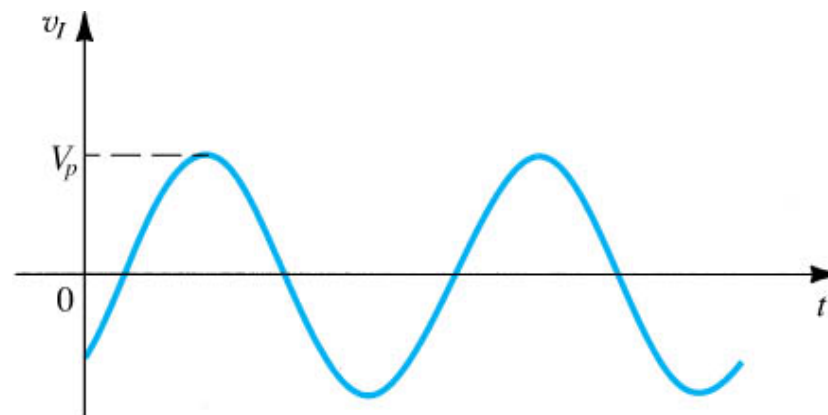
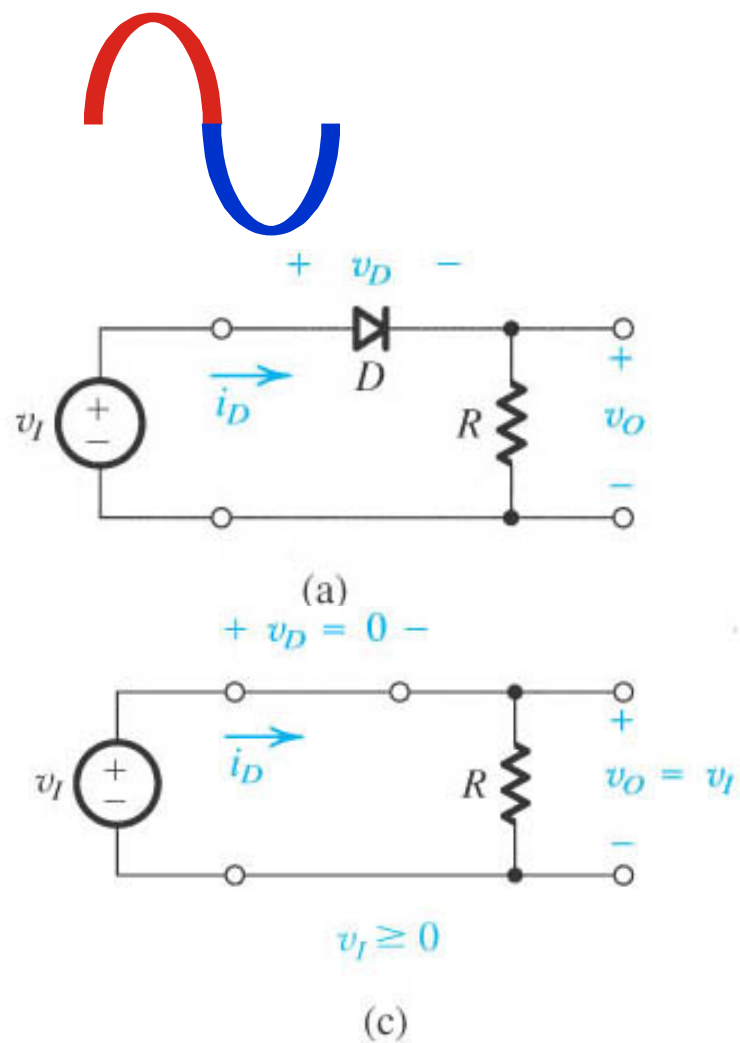
$$I_D = \frac{V_D}{R_d} \text{ za } V_D > V_\gamma$$



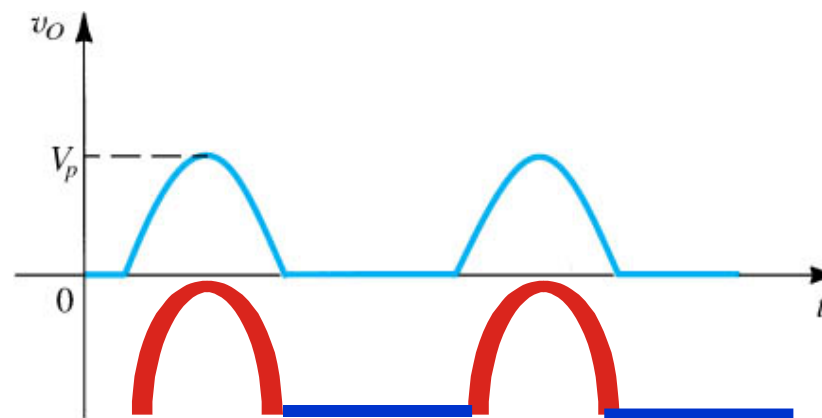
Primena dioda – usmeravanje

- Osobina diode da provodi samo kada je direktno polarisana se može iskoristiti za konstrukciju kola koje pretvara naizmenični napon u jednosmerni
- Ovakva kola se nazivaju usmerači napona
- Postoje dve vrste usmerača – polutalasni i punotalasni

Primena dioda – polutalasno usmeravanje

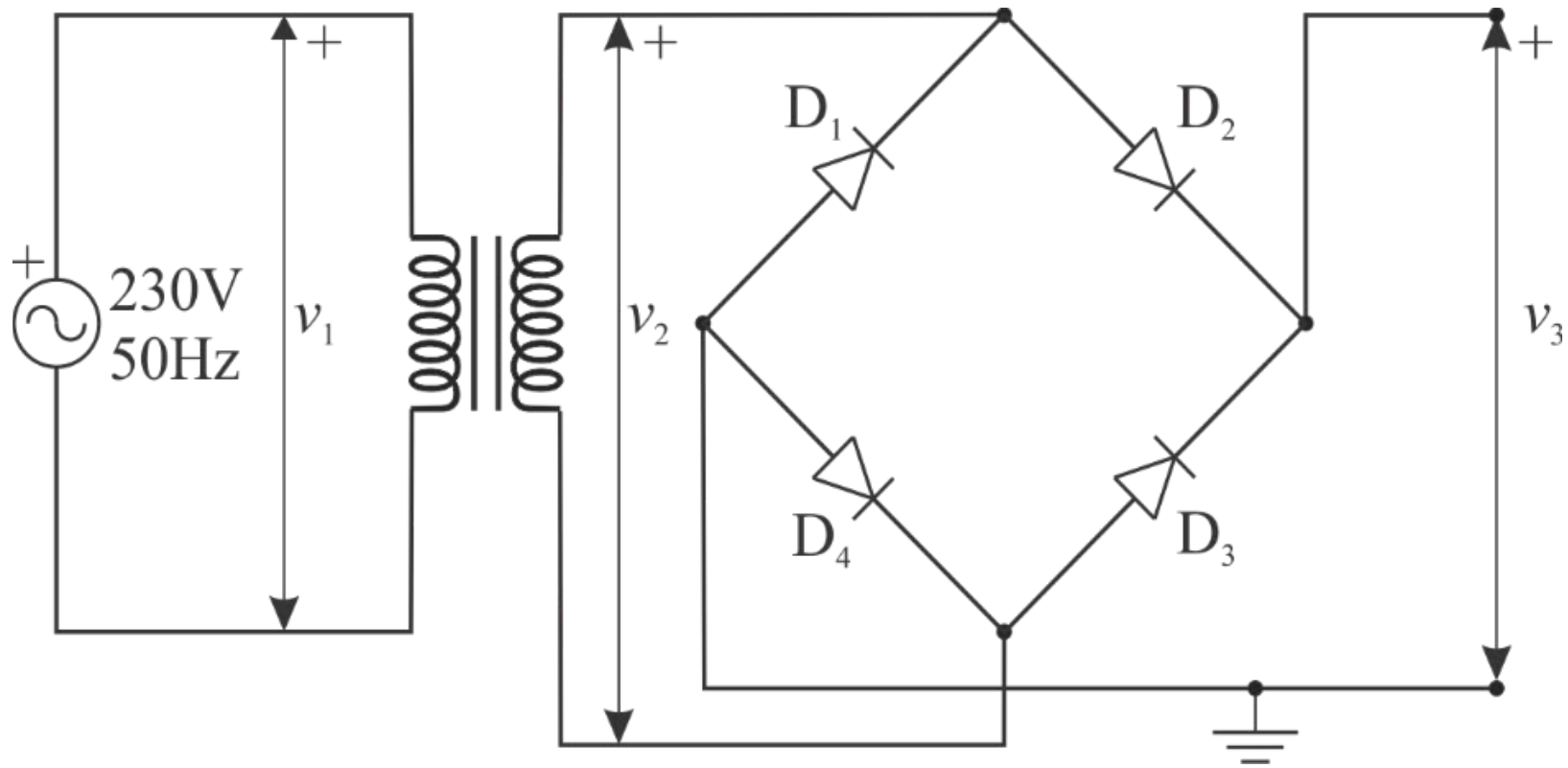


(b)

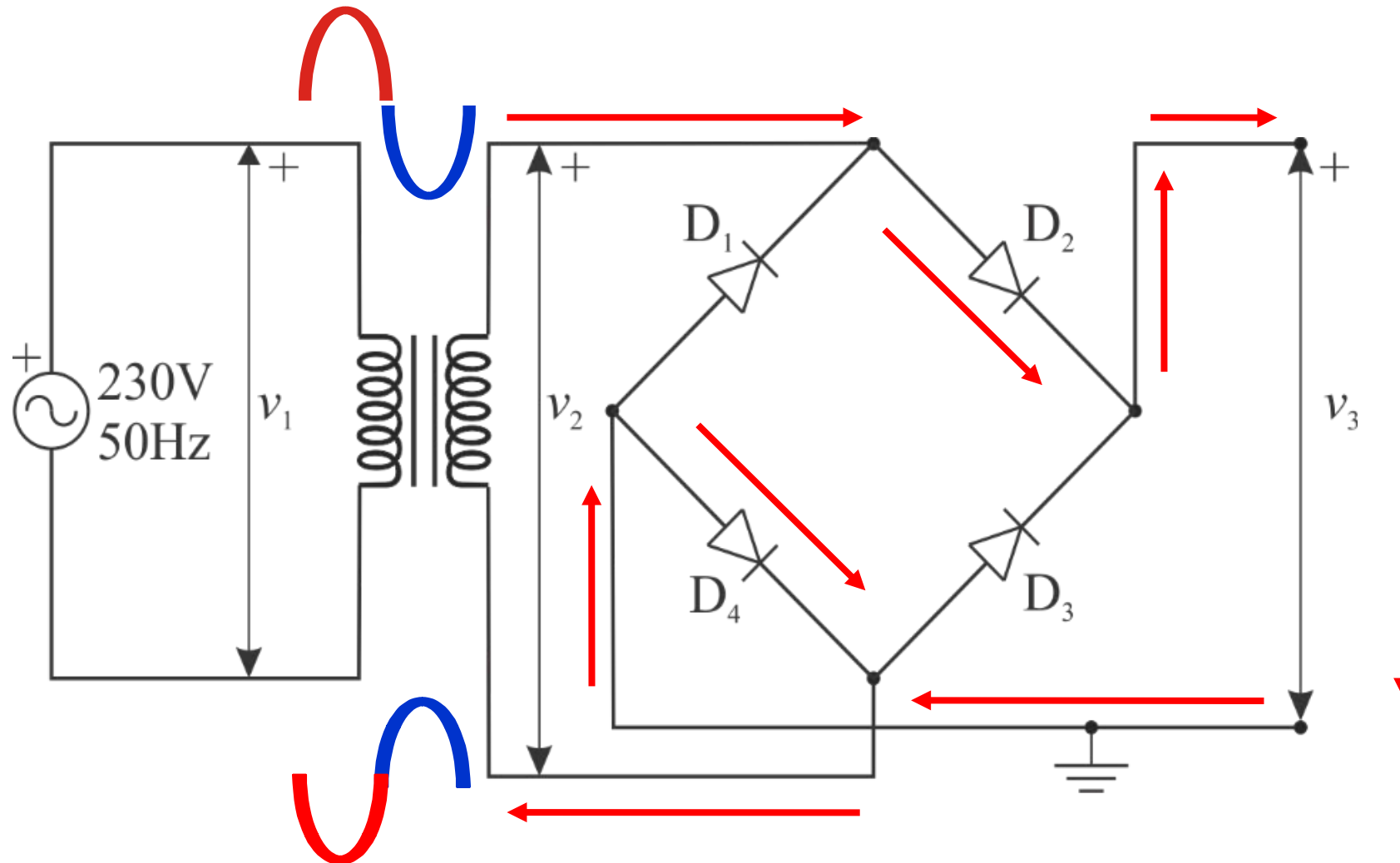


(e)

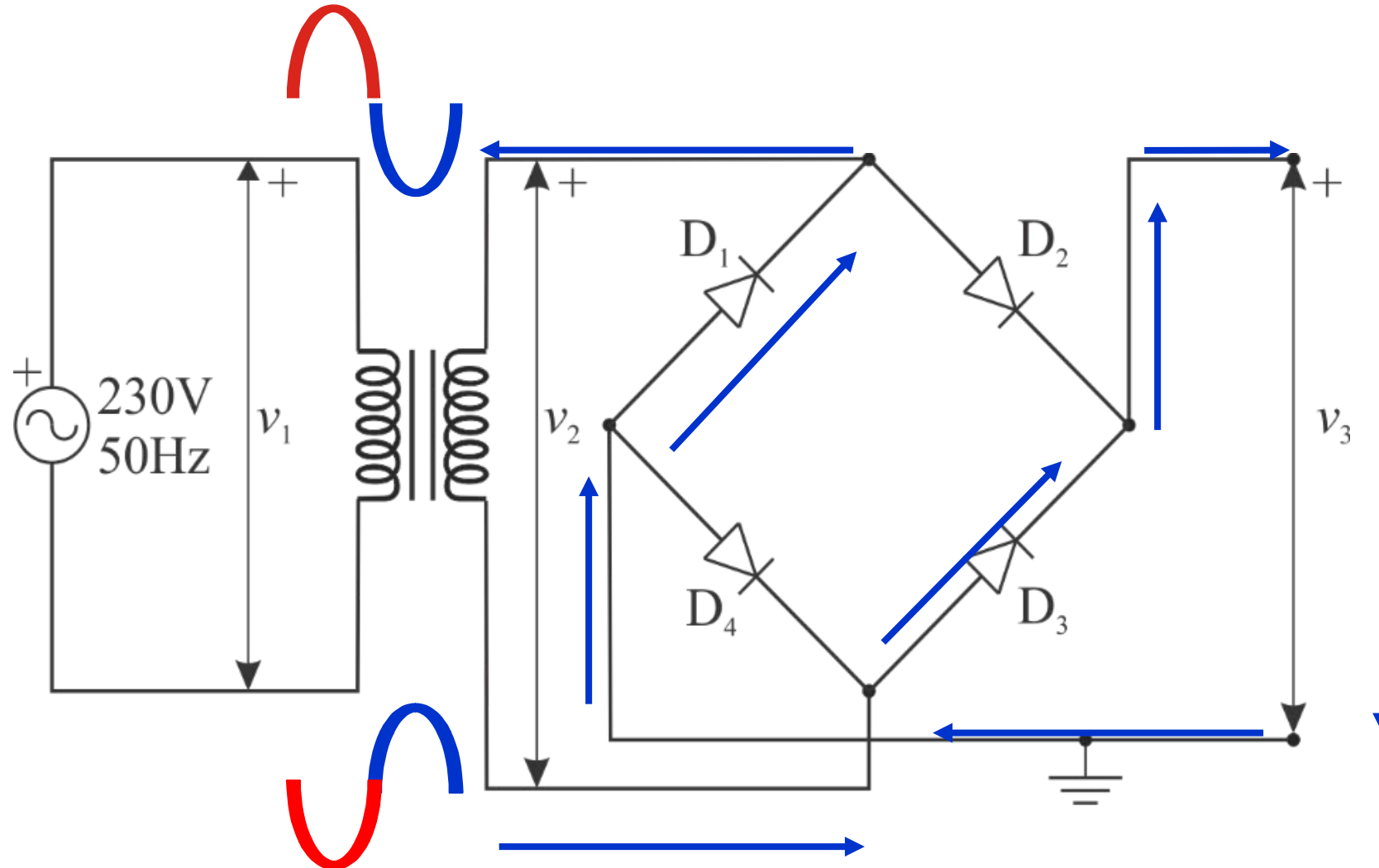
Primena dioda – punotalasno usmeravanje



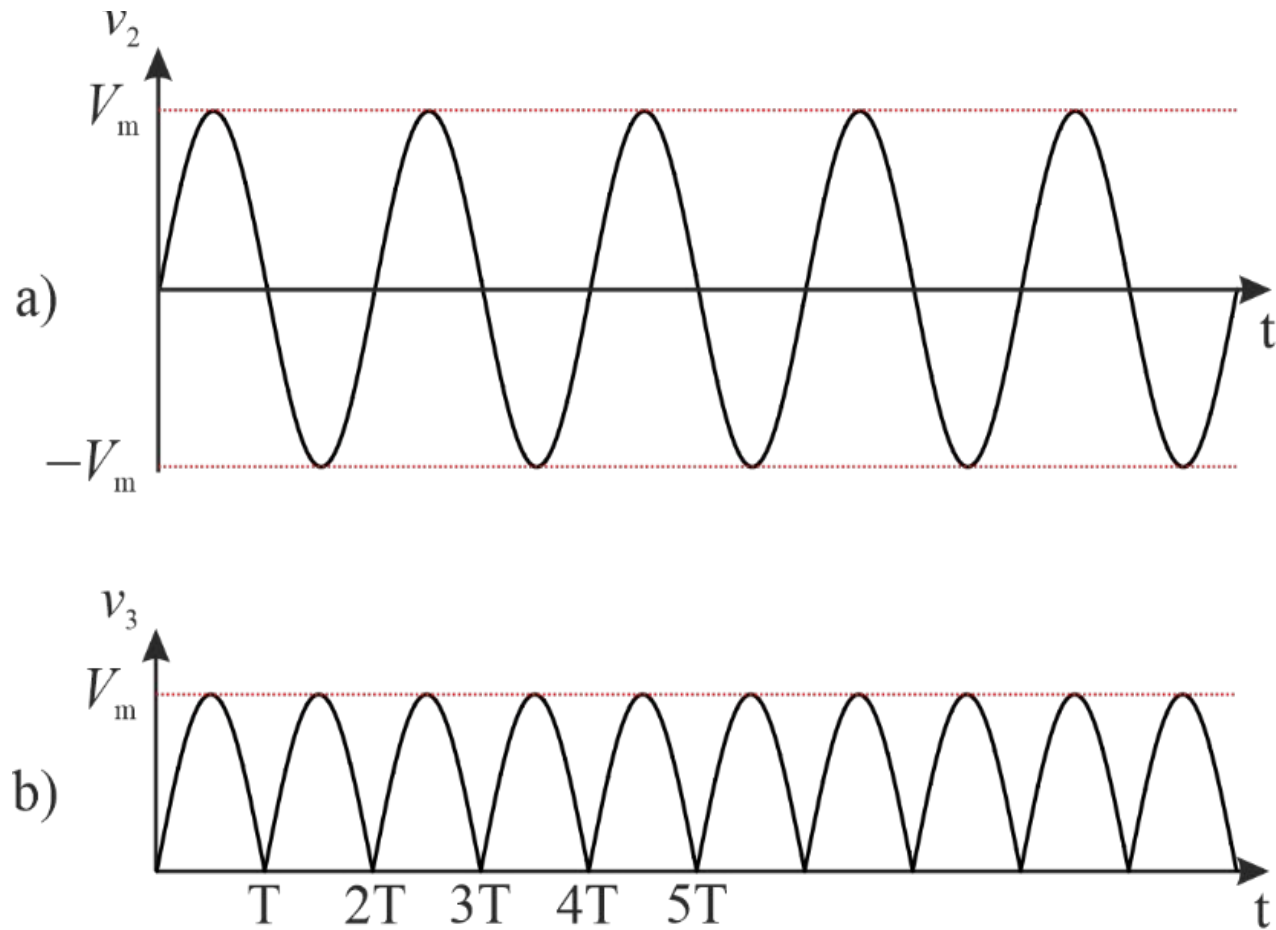
Primena dioda – punotalasno usmeravanje



Primena dioda – punotalasno usmeravanje



Analiza usmerenog napona



Analiza usmerenog napona

- Frekvencija napona na izlazu punotalasnog usmerača v_3 je dvostruko veća on frekvencije prostoperiodičnog napona na ulazu v_2 .
- Napon v_3 je **složenoperiodičan**.
- Svaki periodičan signal može se primenom **Furijeove** (*Fourier*) transformacije predstaviti kao superpozicija (zbir) jednosmernog (vremenski nepromenljivog) i prostoperiodičnih signala – **harmonika** – čije su frekvencije jednake celobrojnim umnošcima osnovne frekvencije (frekvencije periodičnog signala koji se analizira).

Analiza usmerenog napona

- Složenoperidični napon (v_3) se može matematički 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 φ_k njegovu fazu. k je red harmonika. Prvi harmonik ($k=1$) se zove **osnovni harmonik**.

Analiza usmerenog napona

- Od posebnog značaja je jednosmerna komponenta napona (V_0) koja se može matematički izraziti jednačinom:

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

- Jednosmerna komponenta predstavlja srednju vrednost napona v_3 .

Analiza usmerenog napona

- Amplitude harmonika (V_k) se izračunavaju prema formulama:

$$V_k = \sqrt{V_k'^2 + V_k''^2}$$

$$V_k' = \frac{2}{T} \int_0^T v_3(t) \cdot \cos\left(\frac{2k\pi t}{T}\right) dt$$

$$V_k'' = \frac{2}{T} \int_0^T v_3(t) \cdot \sin\left(\frac{2k\pi t}{T}\right) dt.$$

Analiza usmerenog napona

- Napon v_3 je vremenski zavistan, može se predstaviti formulom:

$$v_3(t) = V_m \cdot \left| \sin\left(\frac{\pi t}{T}\right) \right|$$

- Rešavanjem integrala, dobijamo da je jednosmerna komponenta napona (V_0) jednaka:

$$V_0 = \frac{2V_m}{\pi} \approx 0,6366 \cdot V_m$$

Analiza usmerenog napona

- Izražena preko efektivne vrednosti napona na sekundaru transformatora $V_{2\text{ef}}$, jednosmerna komponenta je:

$$V_0 = \frac{2\sqrt{2} \cdot V_{2\text{ef}}}{\pi} \approx 0,9003 \cdot V_{2\text{ef}}$$

- Prilikom izbora transformatora, potrebno je da odnos transformacije primara i sekundara bude odgovarajući, tako da V_0 bude jednak ili veći od potrebnog jednosmernog napona.

Analiza usmerenog napona

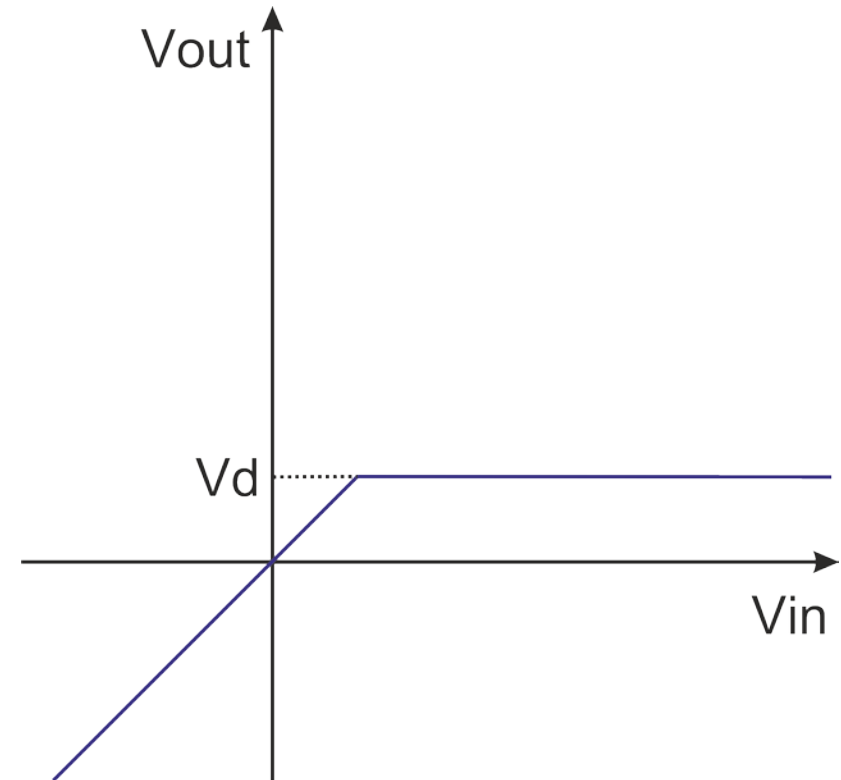
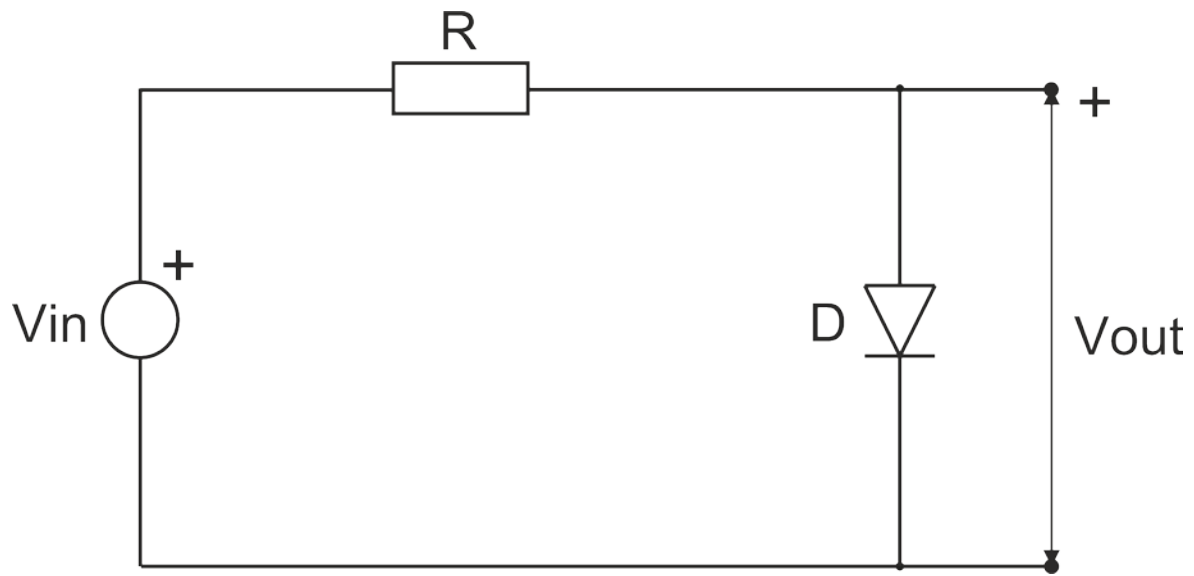
- Kao mera sadržaja naizmenične komponente u usmerenom naponu, samim tim i mera kvaliteta usmerača, definiše se faktor talasnosti:

$$\gamma = \frac{\sqrt{V_{2ef}^2 - V_0^2}}{V_0}$$

- Faktor talasnosti je efektivna vrednost naizmenične komponente usmerenog napona bez jednosmerne komponente ($V_{2ef} = V_{3ef}$).
- Za punotalasni usmerač $\gamma = 0,4835$.

Limiter napona

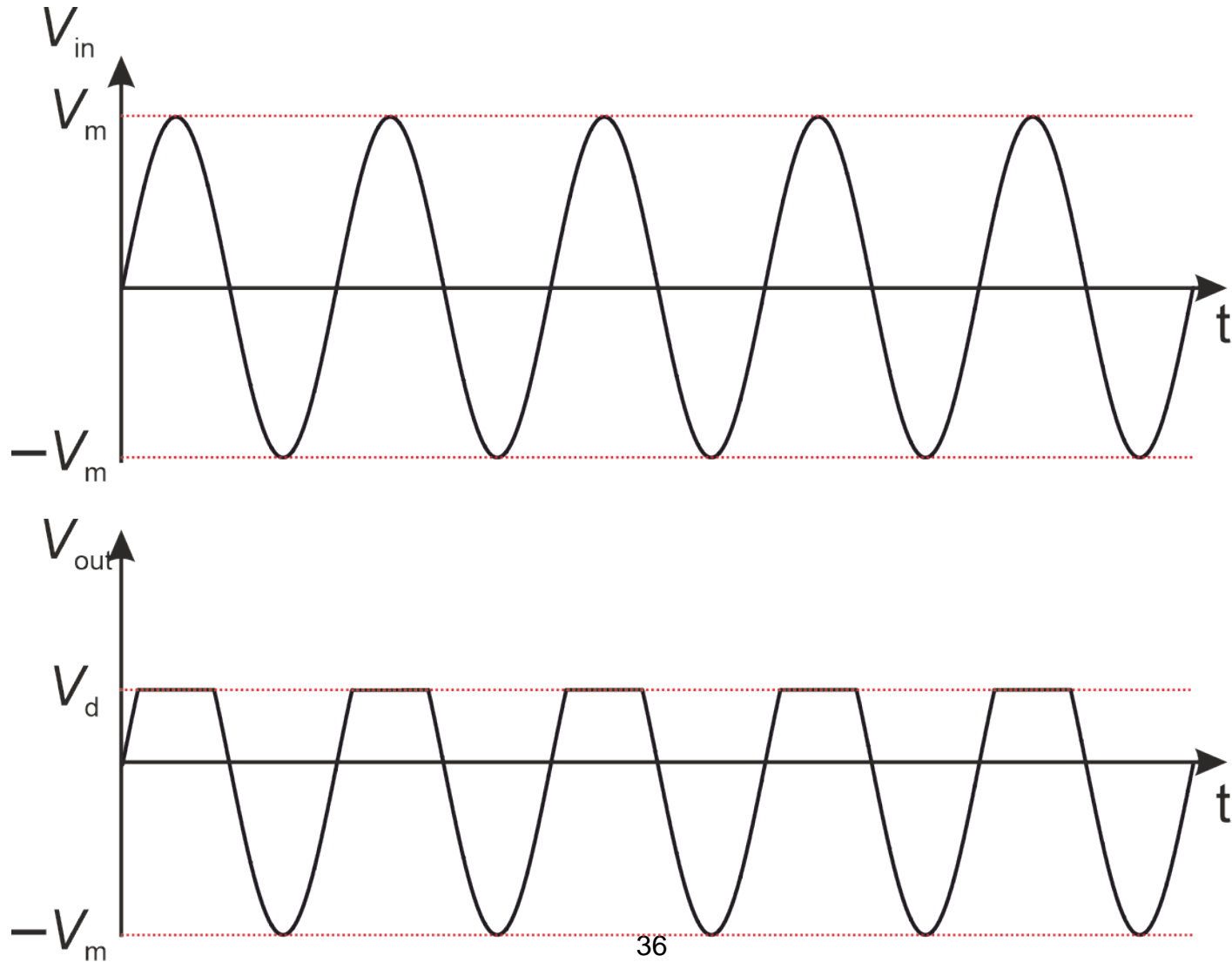
Prenosna karakteristika kola



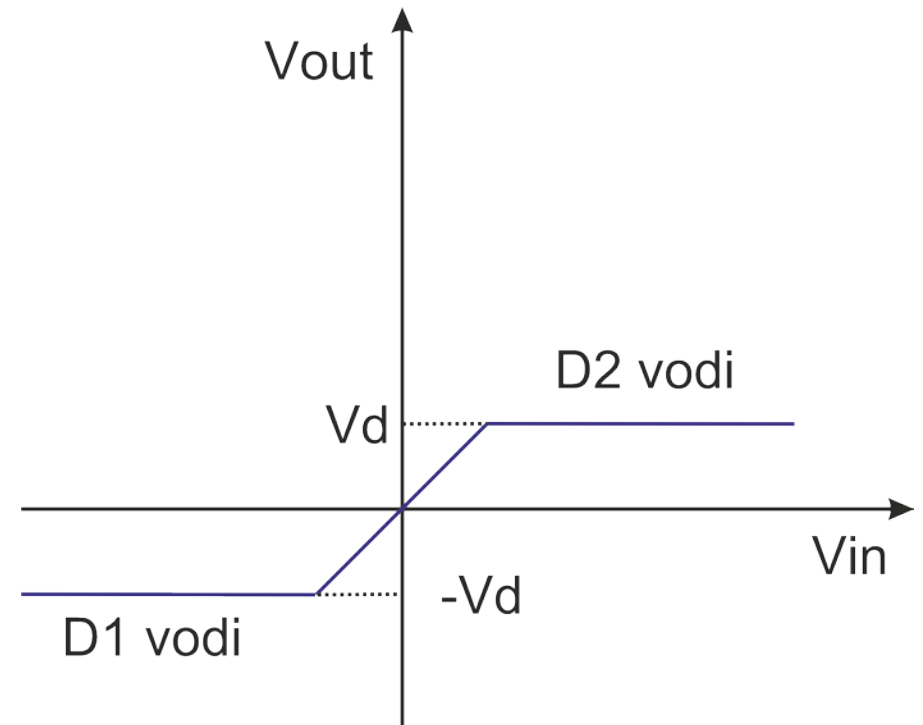
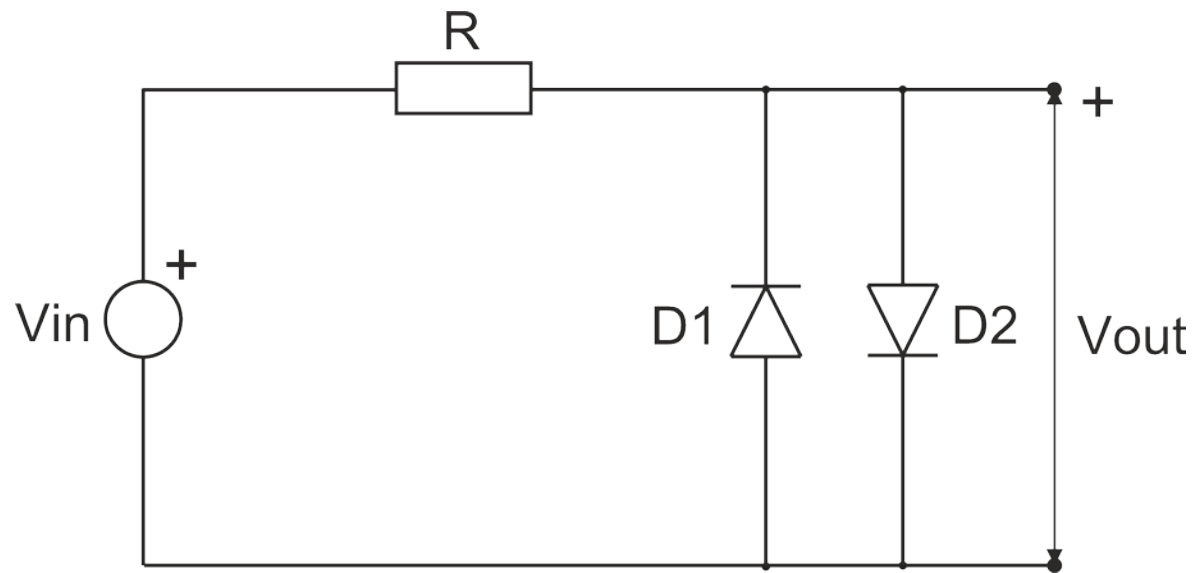
Prenosna karakteristika

- Zavisnost izlazne veličine (struje, napona) od ulazne veličine (struje, napona) naziva se prenosna karakteristika
- Prenosne karakteristike su svojstvene četvoropolima.
- V-V, I-V, V-I, I-I

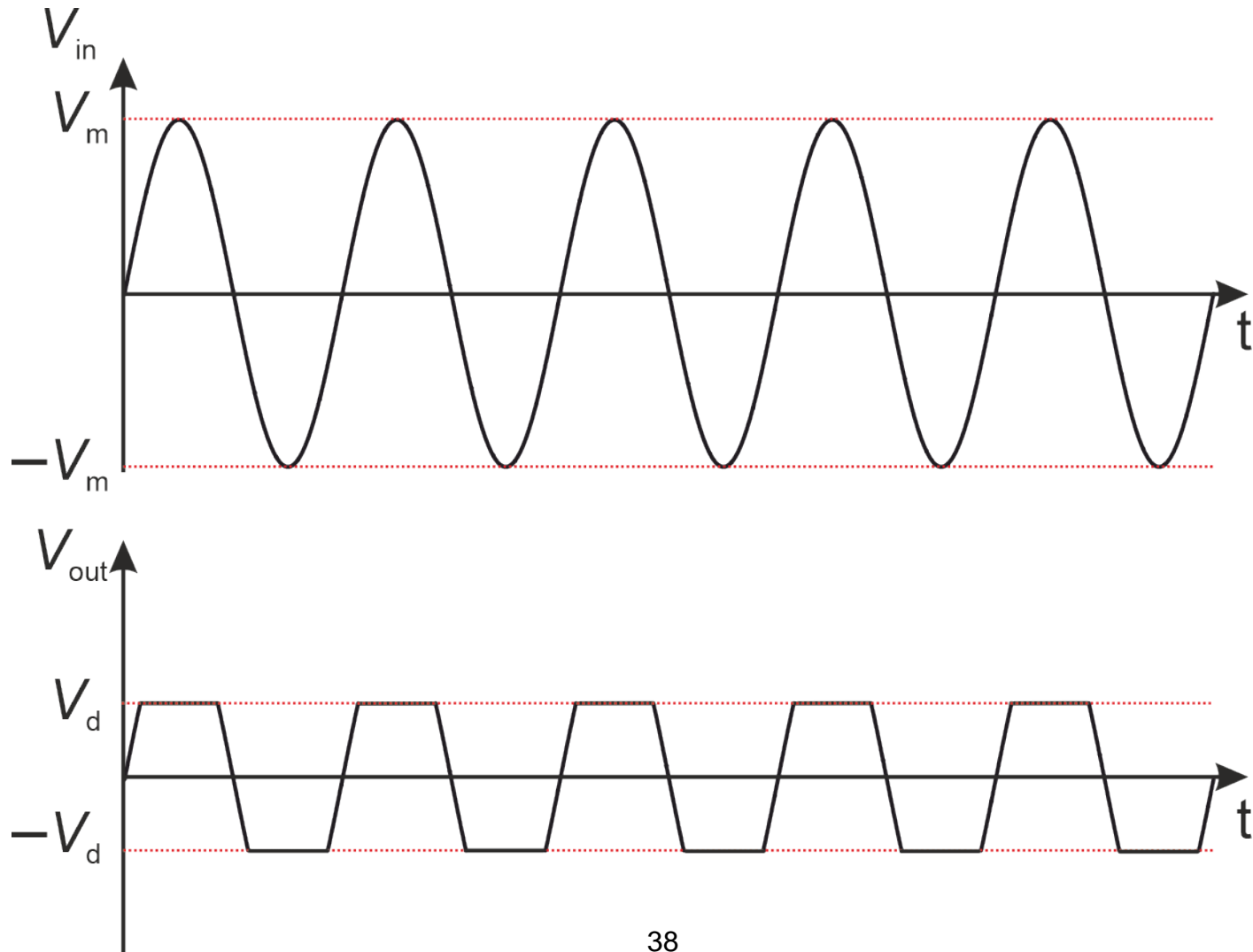
Limiter napona



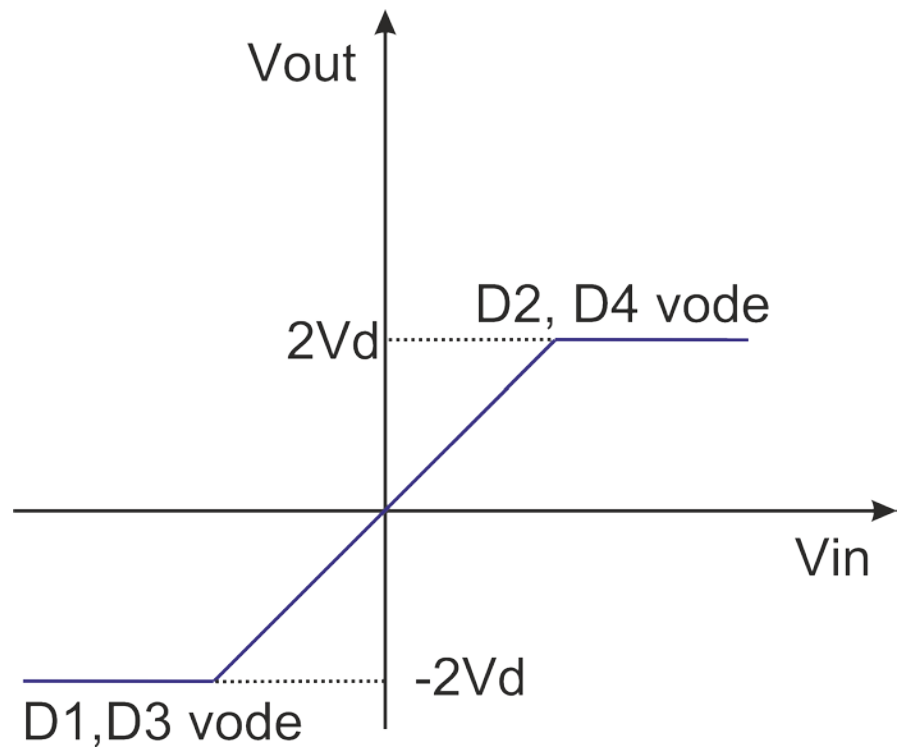
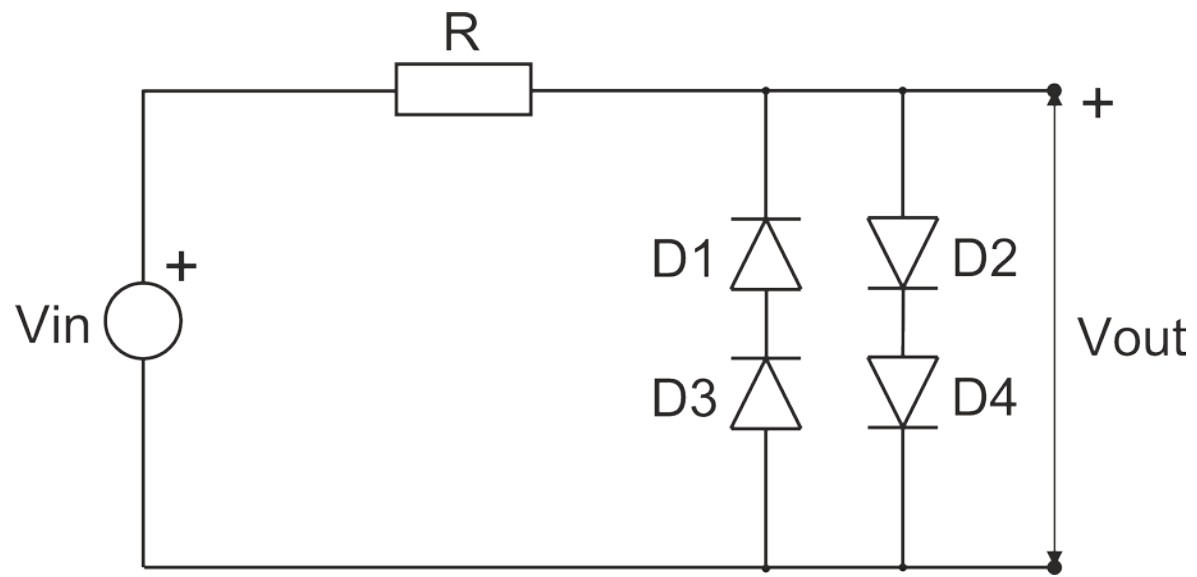
Limiter napona



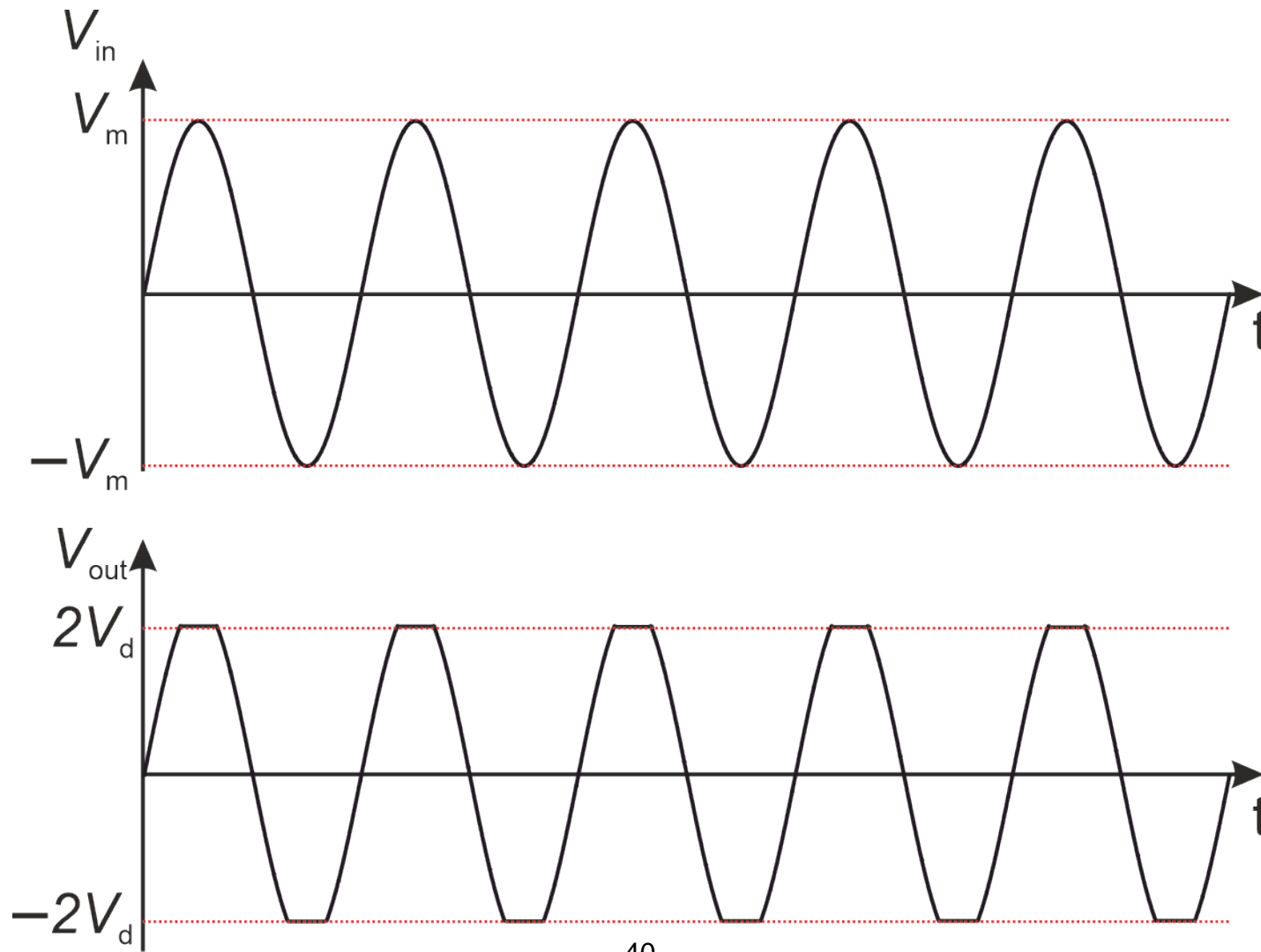
Limiter napona



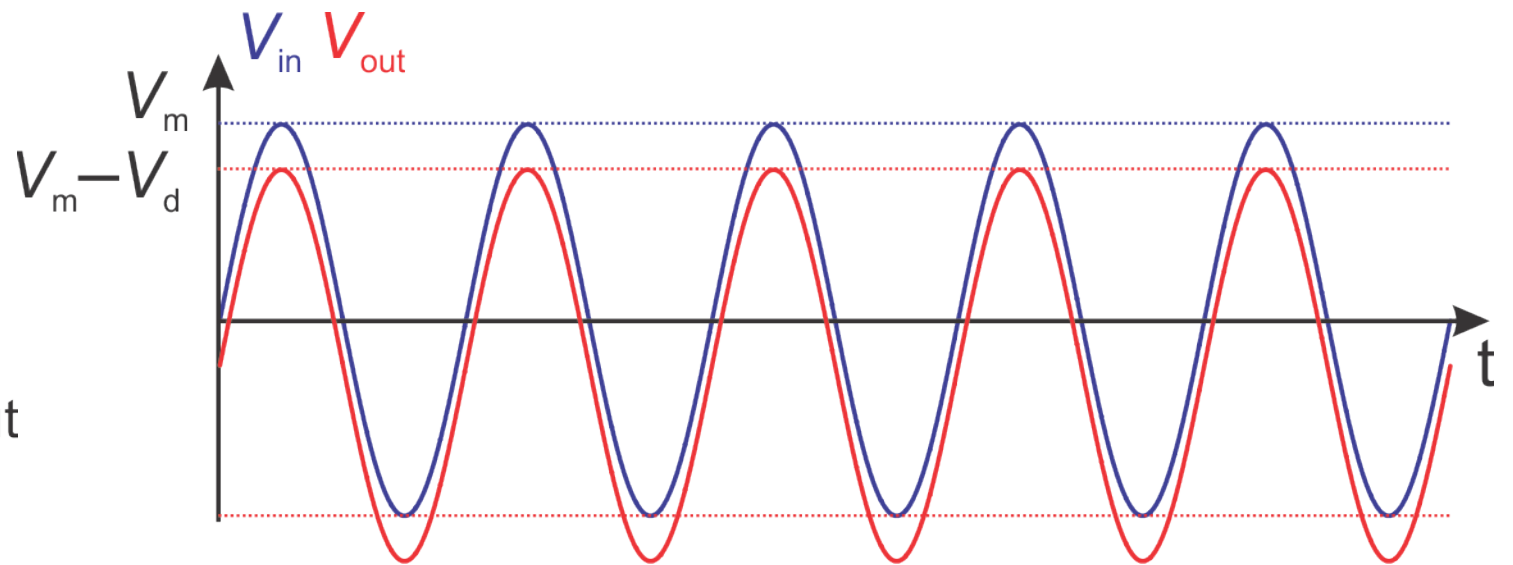
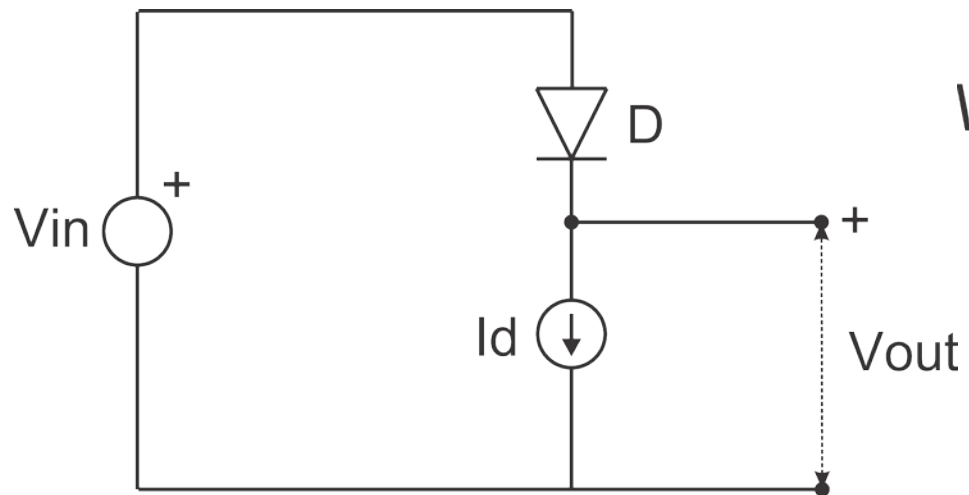
Limiter napona



Limiter napona



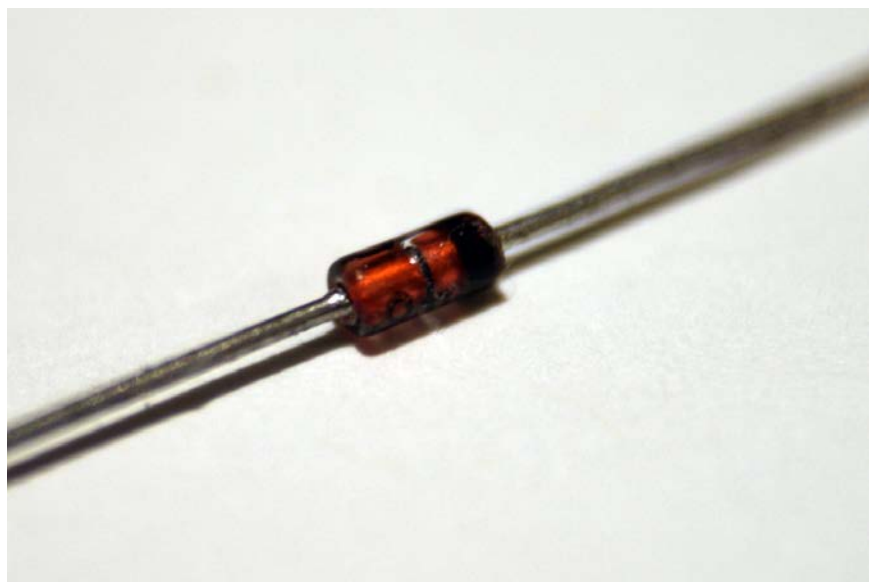
Pomerač naponskog nivoa



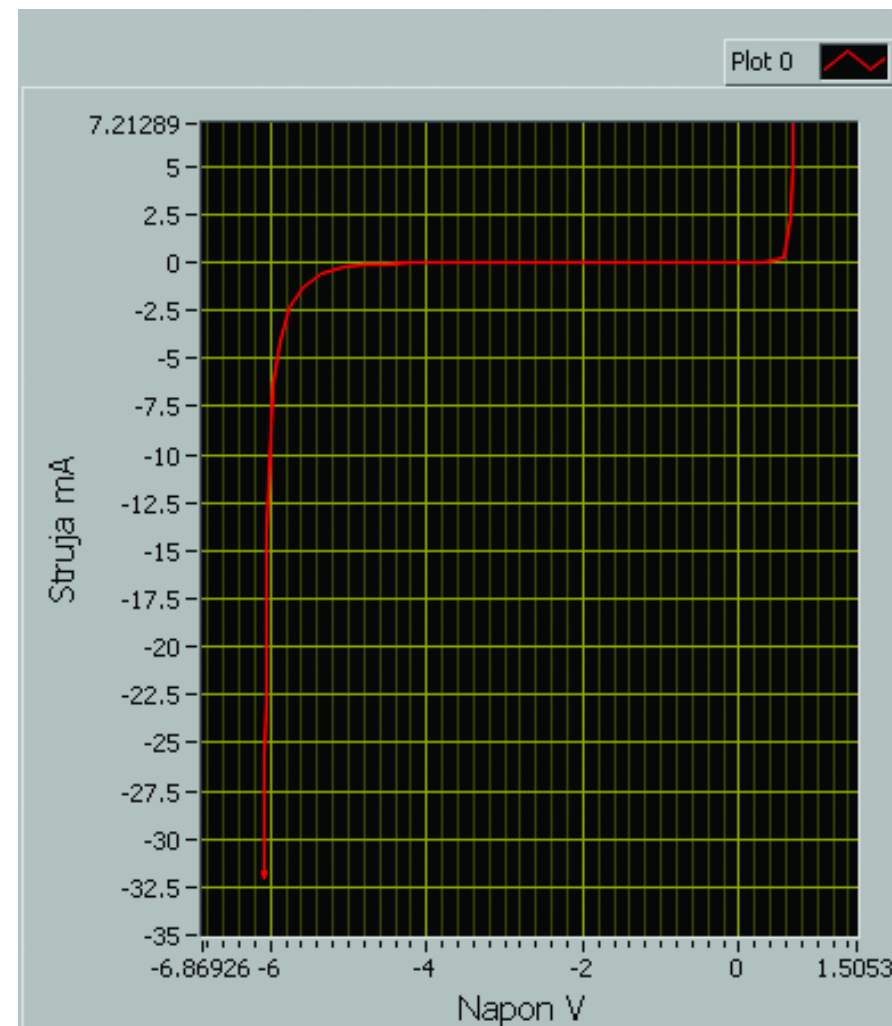
Zener dioda

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

Zener dioda



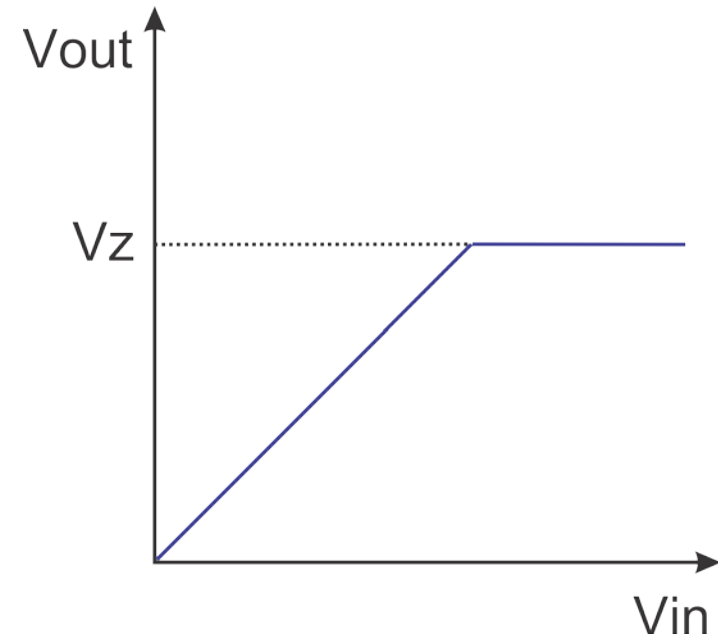
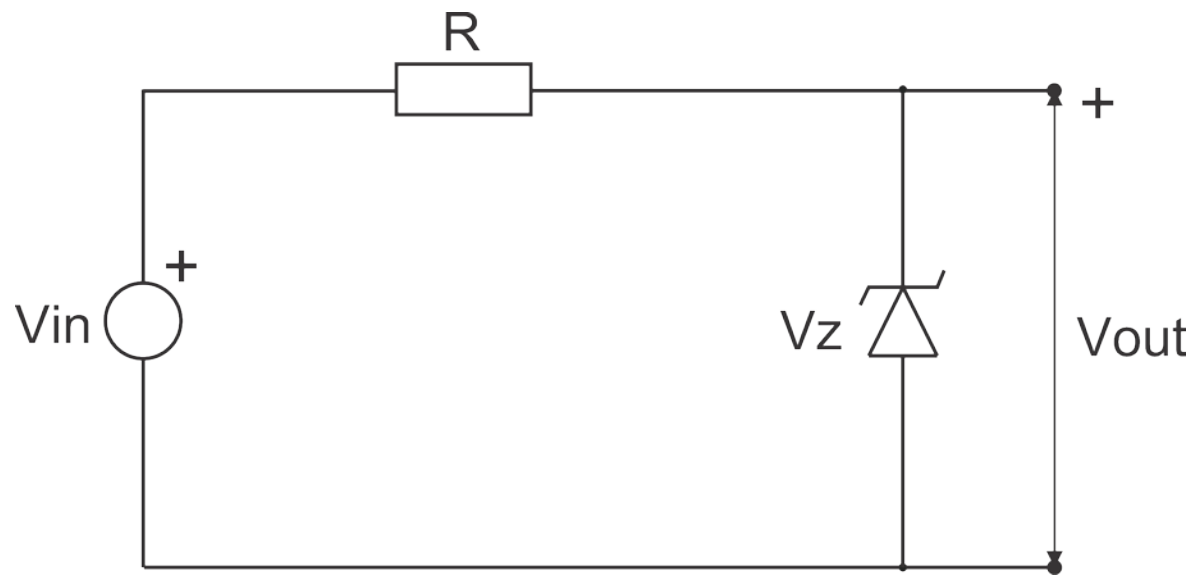
Izvor: wikipedia.com



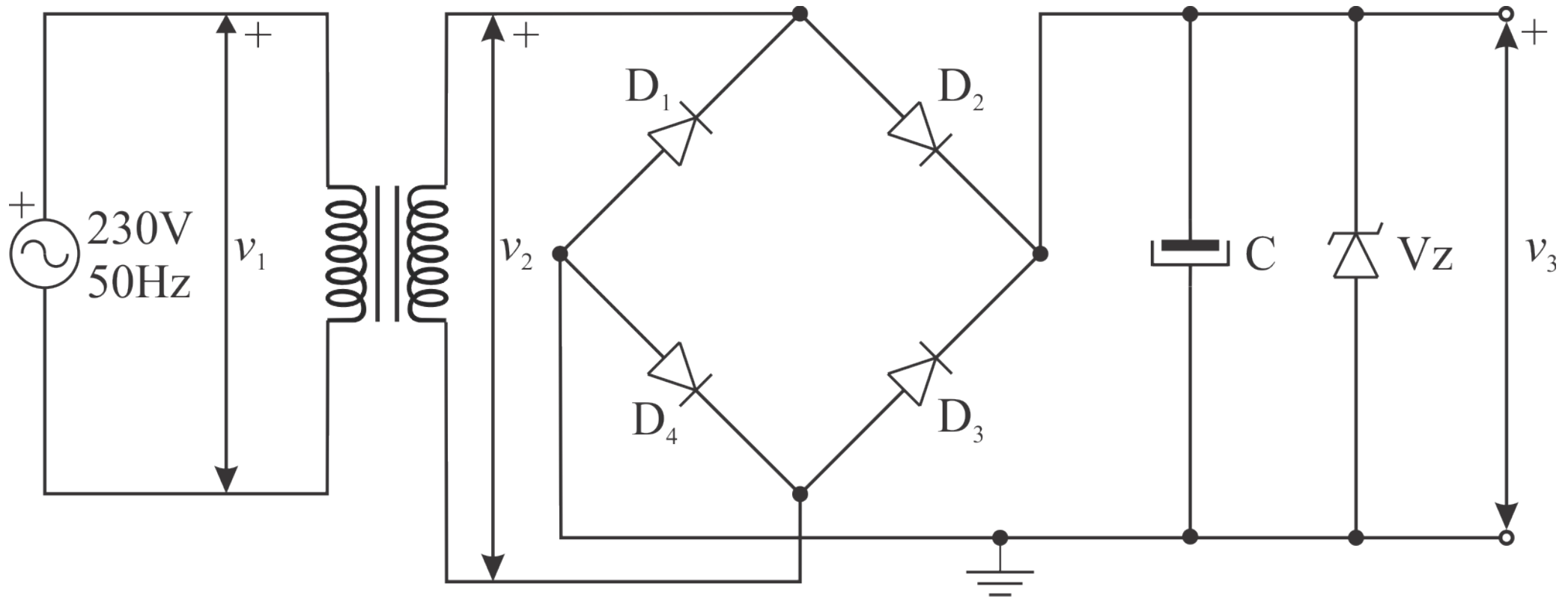
Zener dioda

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

Zener dioda – primene

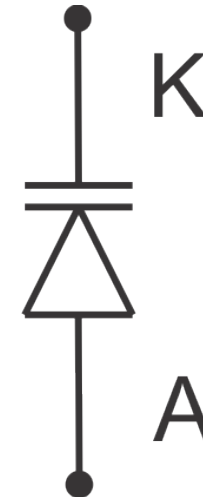
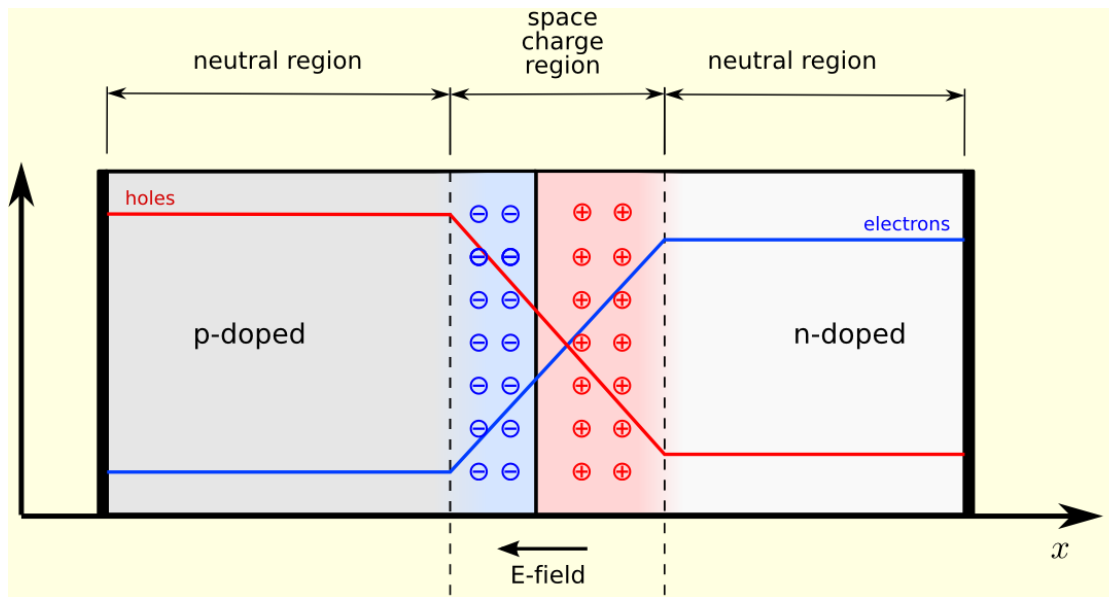


Zener dioda – primene



Varikap dioda

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



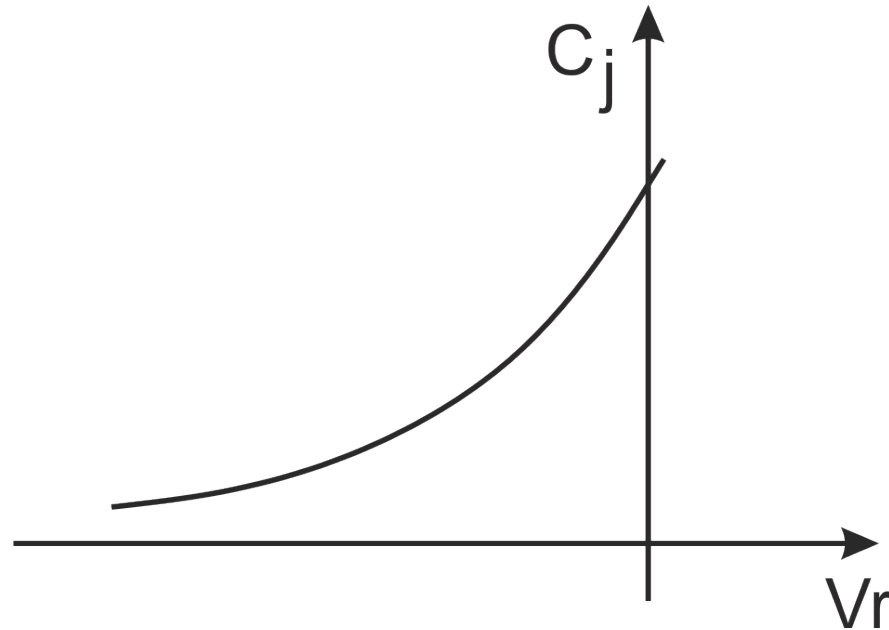
Varikap dioda

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

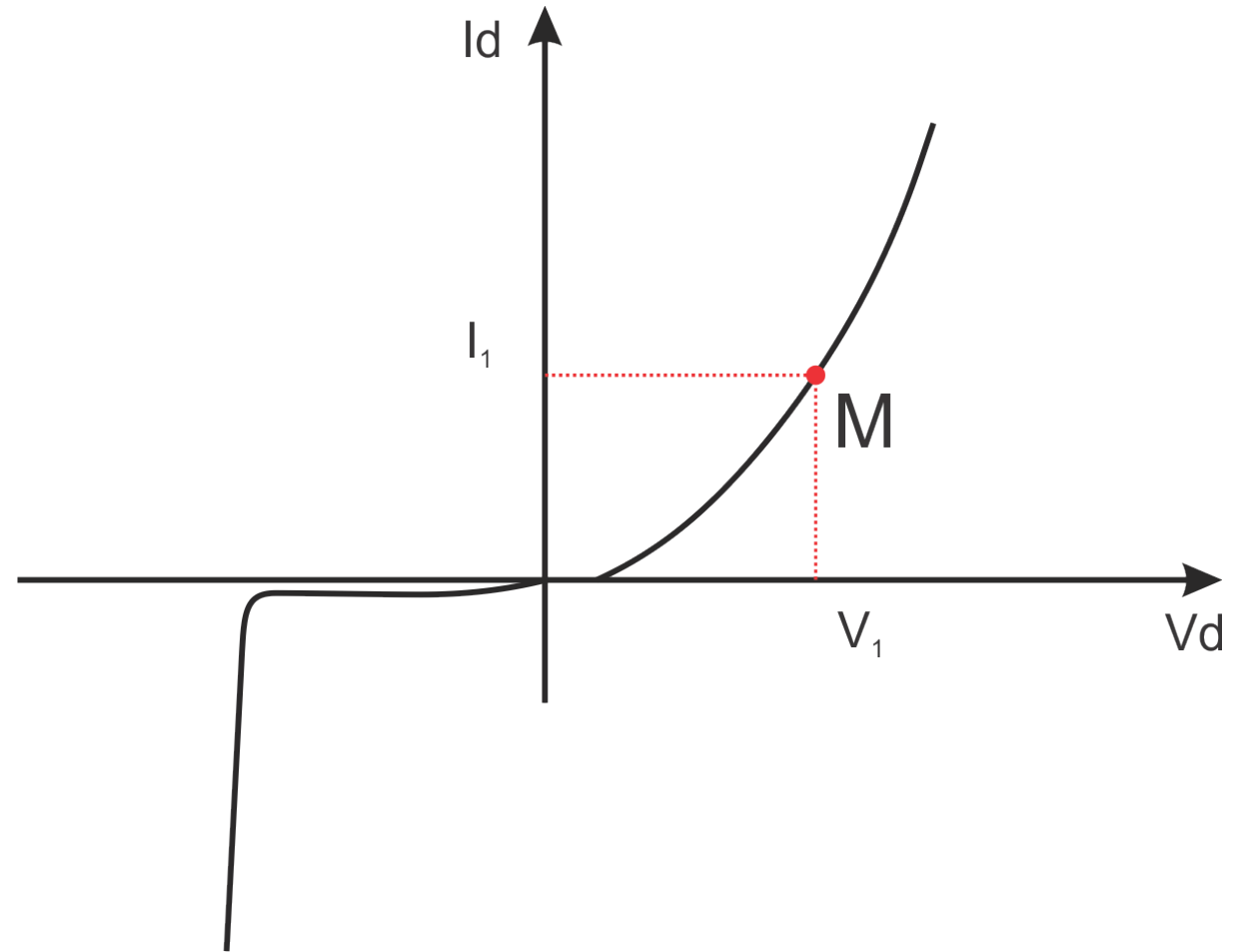
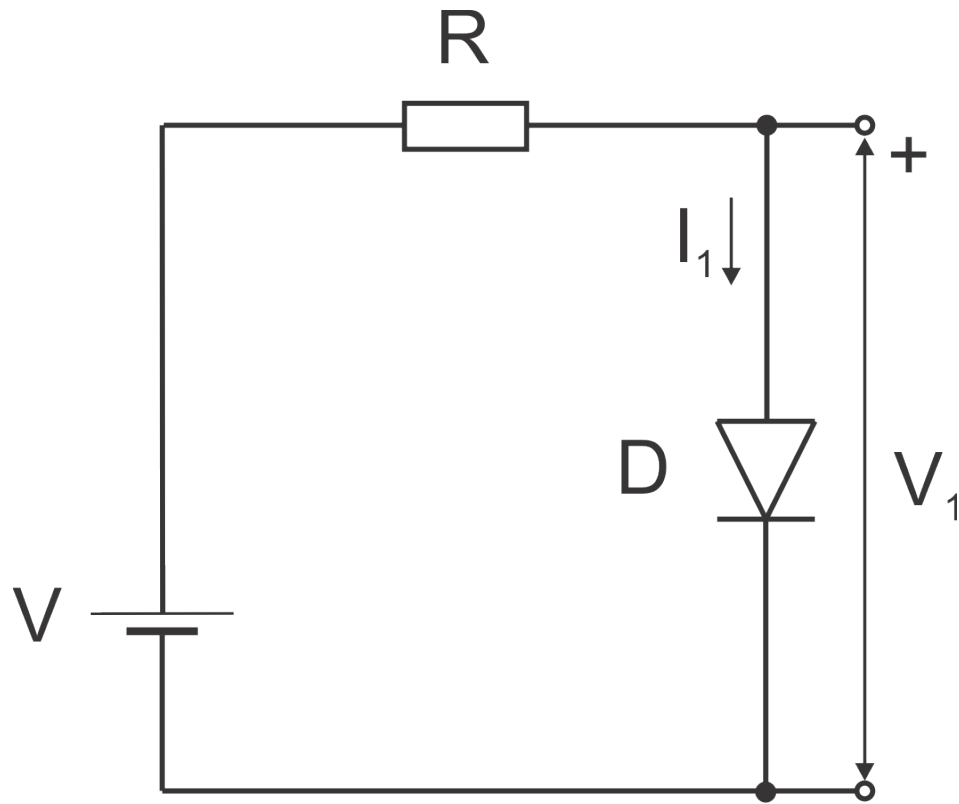
$$C_j = \frac{C_{j0}}{\sqrt{1 - \frac{V_r}{V_0}}}$$

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

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



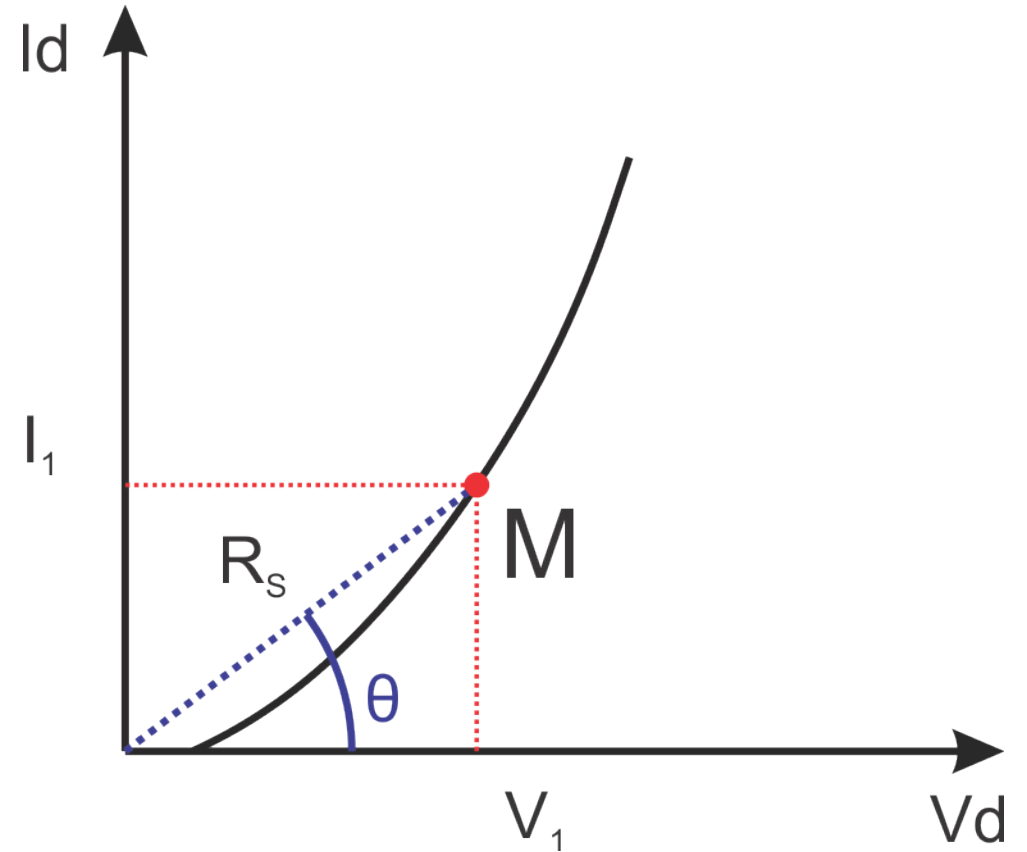
Model za vremenski promenljive signale



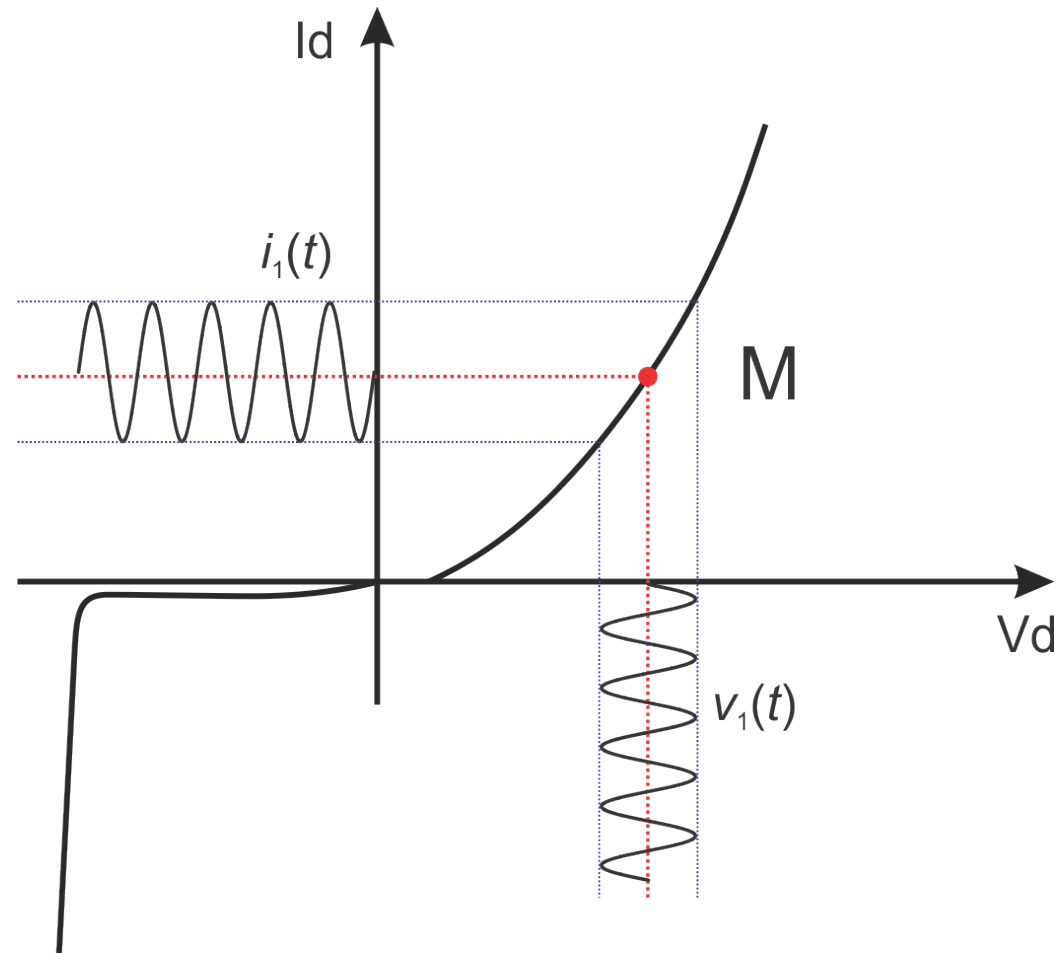
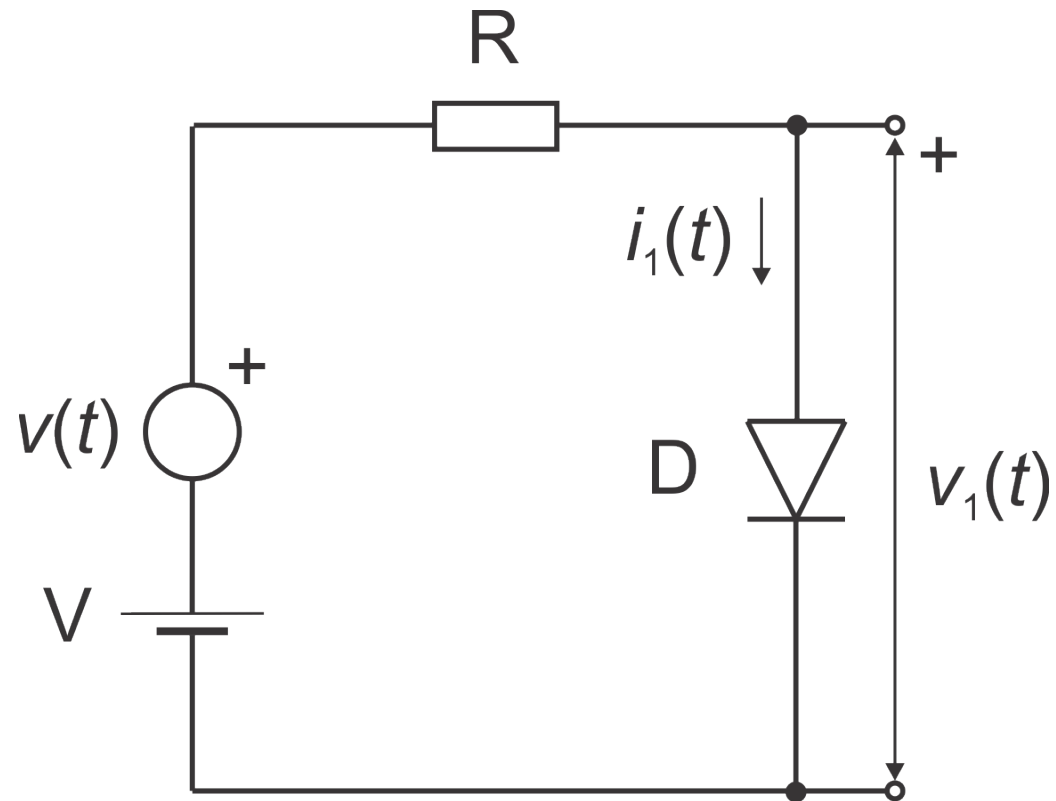
Statička otpornost diode

- Statička otpornost zavisi od radne tačke

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



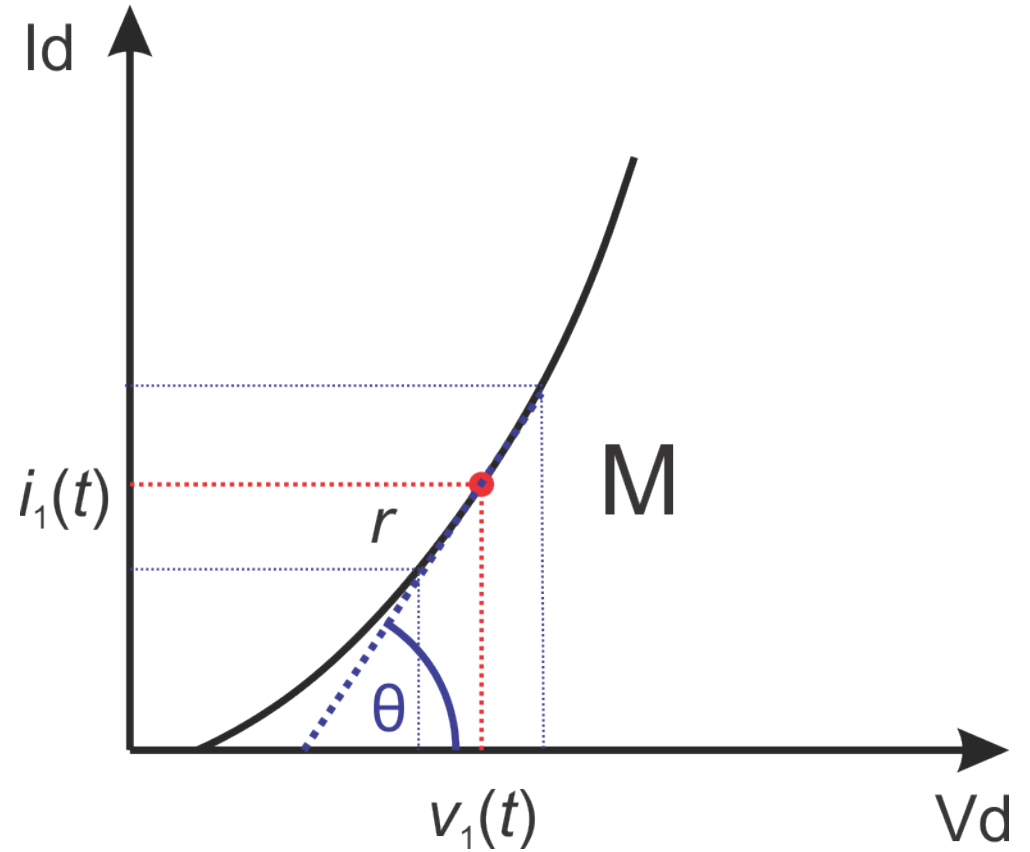
Model za vremenski promenljive signale



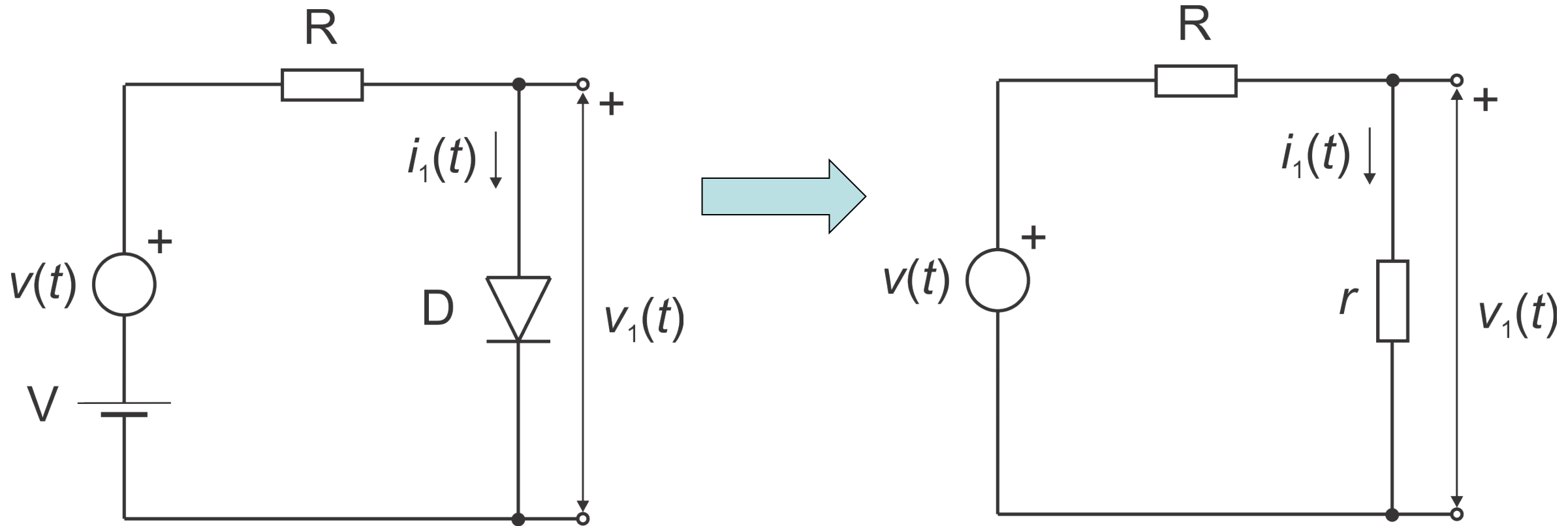
Dinamička otpornost diode

- Dinamička otpornost zavisi od radne tačke

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



Dinamička otpornost diode – ekvivalentno kolo



Tunel dioda

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

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

