



Poluprovodnički elementi u električnim kolima – uvod, diode

Marko Dimitrijević, Dragan Mančić

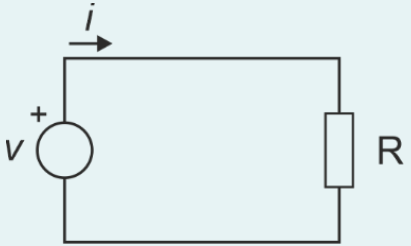
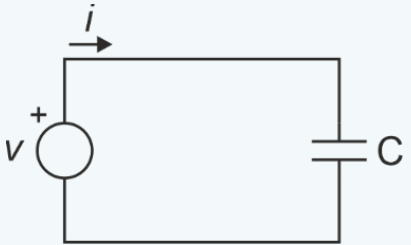
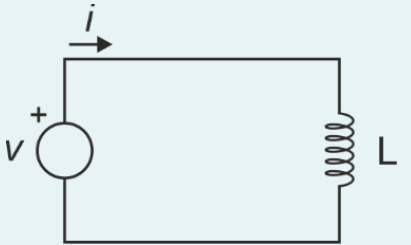
Uvod

- U elektrotehnici se analiziraju jednostavna kola sa jednosmernim ili prostoperiodičnim pobudama (signalima), koja sadrže **otpornike, kondenzatore i kalemove**. Ovo su **osnovni električni elementi**.
- Ovi elementi imaju dva priključka i nazivaju se **dvopoli**. Pomenuti elementi su **pasivni**, zato što deo električne energije pretvaraju u neki drugi oblik energije (otpornici) ili u idealizovanom slučaju akumuliraju energiju (kondenzatori i kalemovi).
- Na primer, otpornik pretvara električnu energiju u toplotnu (princip rada električnog grejača), sijalica sa vlaknom u toplotnu i svetlosnu, LED dioda u svetlosnu, itd.

Uvod

- Pretvaranje električne energije u neželjenu toplotnu energiju se naziva **disipacija**. Snaga koja se razvija na pasivnim elementima je **snaga disipacije**.
- Kondenzatori mogu akumulirati energiju u električnom polju koje se uspostavlja u dielektriku, između obloga kondenzatora. Slično, kalemovi mogu akumulirati energiju u magnetnom polju koje se uspostavlja u namotaju kalema. Akumulirana energija se može vratiti u kolo. Kondenzatori i kalemovi se nazivaju **reaktivni elementi**.
- Signali koje razmatramo su električni napon i struja i kod svakog dvopola se može uspostaviti funkcionalna veza između ove dve fizičke veličine.

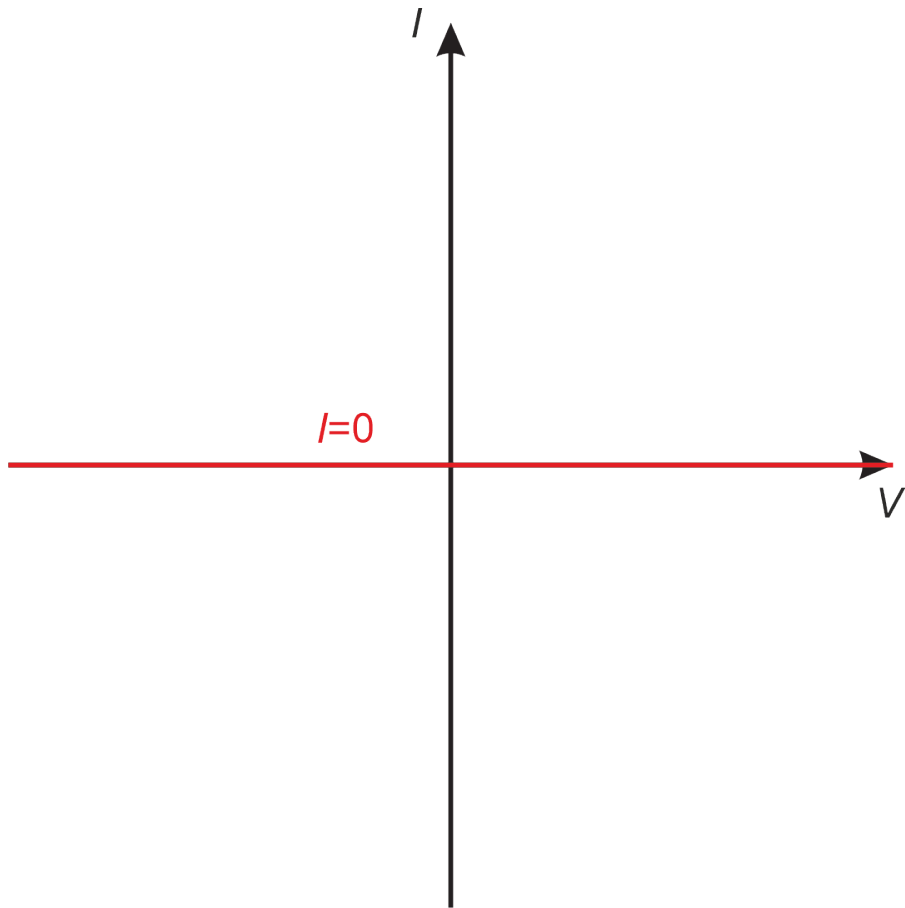
Osnovni električni elementi

Element	Kolo	Vremenski d.	Frekvencijski d.
Otpornik		$v = iR$	$V = IR$
Kondenzator		$v = \frac{1}{C} \int i dt$	$V = \frac{I}{j\omega C}$
Kalem		$v = L \frac{di}{dt}$	$V = j\omega L \cdot I$

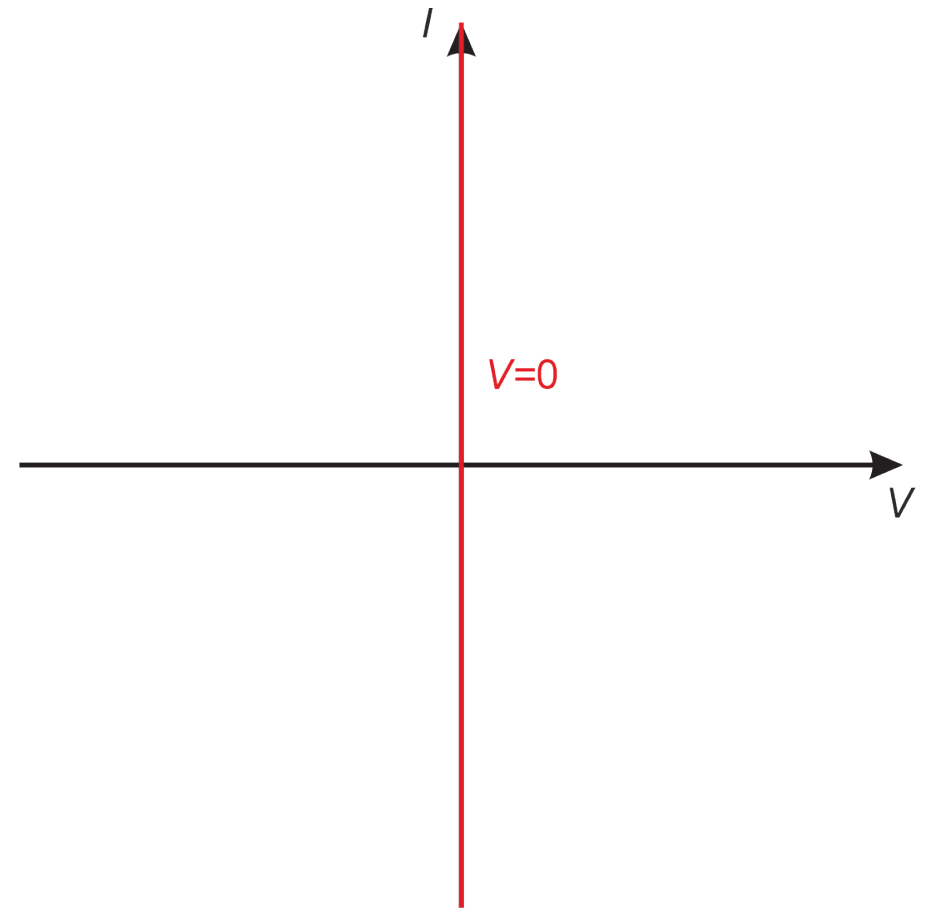
Osnovni električni elementi

- Zavisnost napona i struje kod otpornika, kondenzatora i kalema je **linearna**; ovi elementi se nazivaju **linearni elementi**.
- Nezavisni (konstantni) **naponski** i **strujni generatori**, kao i **kontrolisani generatori**, kod kojih su napon i struja linearno zavisni, takođe spadaju u linearne elemente.
- Zavisnost struje dvopola od napona dvopola se naziva i **strujno-naponska karakteristika**, ili samo **karakteristika** dvopola.
- U linearne elemente spadaju i posebna stanja električnog kola koja se mogu razmatrati kao dvopoli: **kratak spoj** i **otvorena grana**.

Karakteristike dvopola

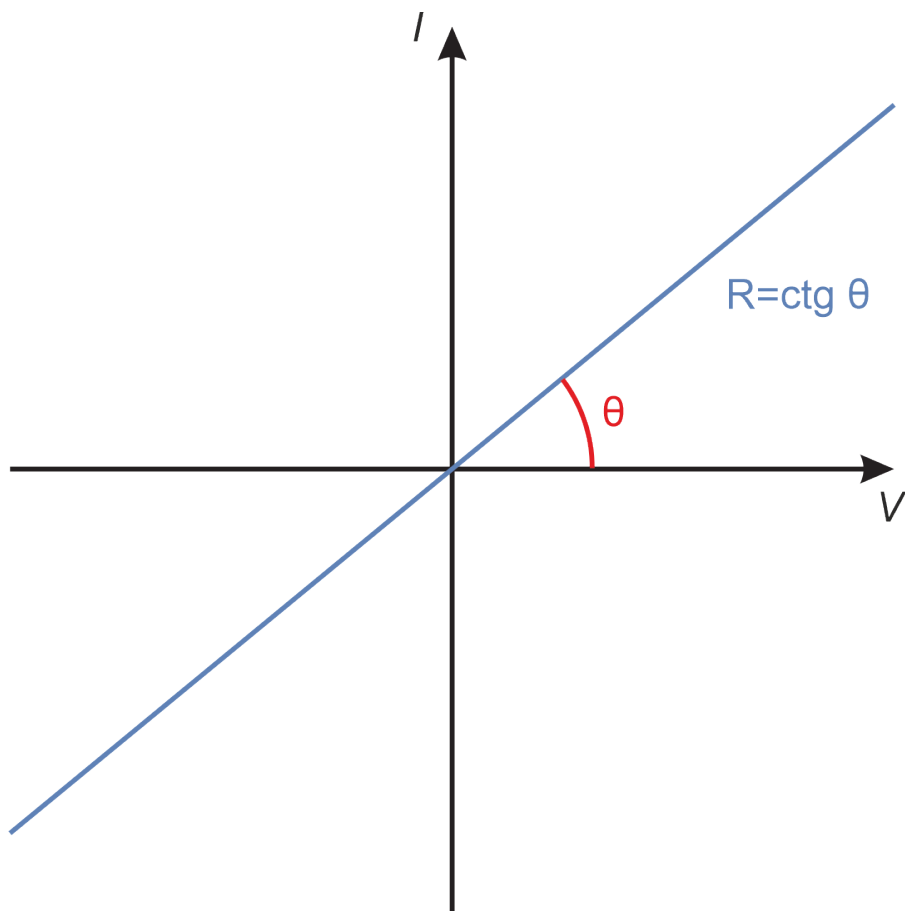


Karakteristika
otvorene grane

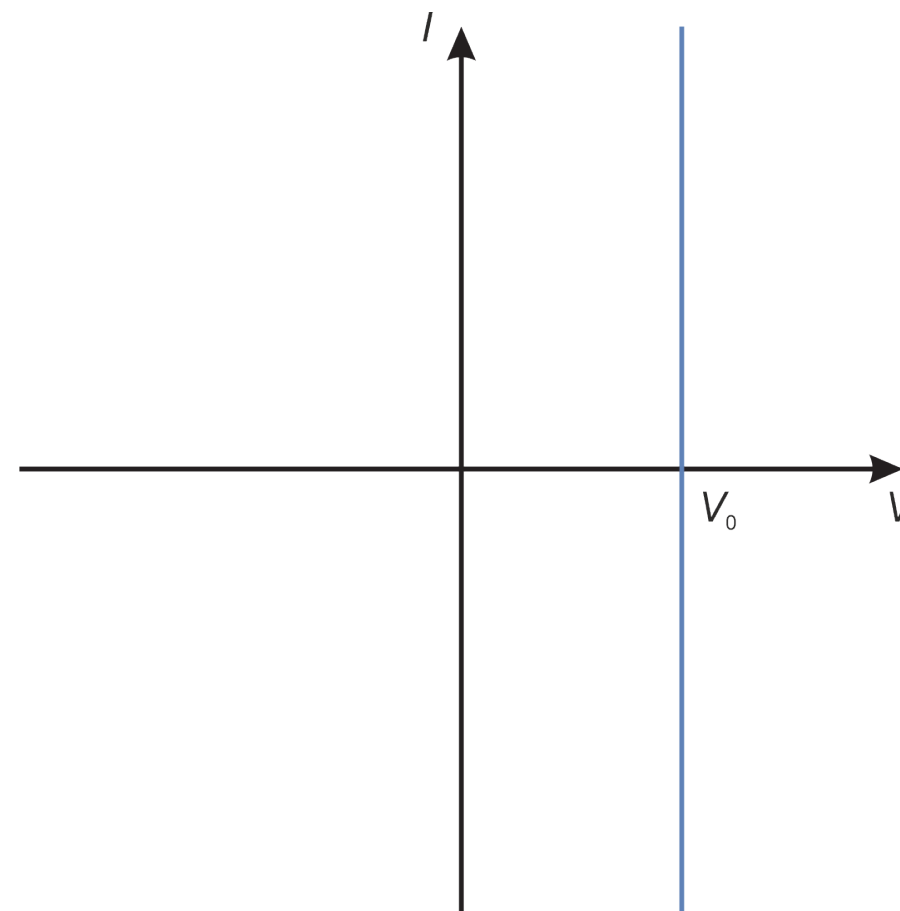


Karakteristika kratkog spoja

Karakteristike dvopola

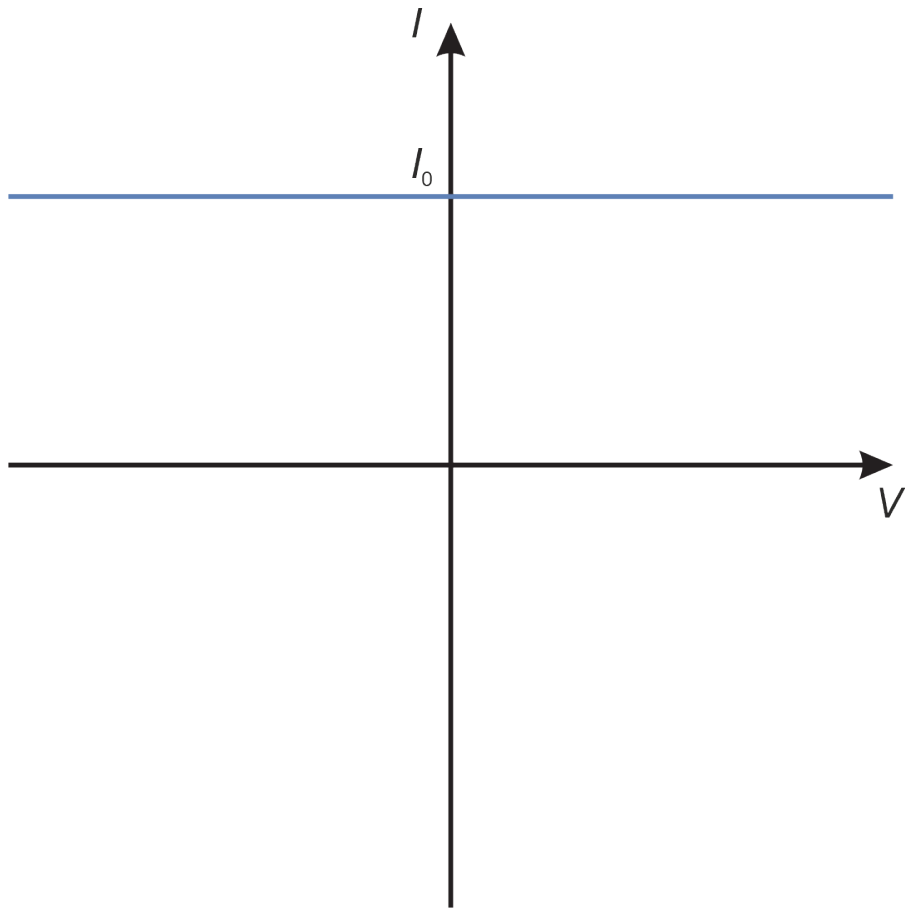


Karakteristika
otpornika

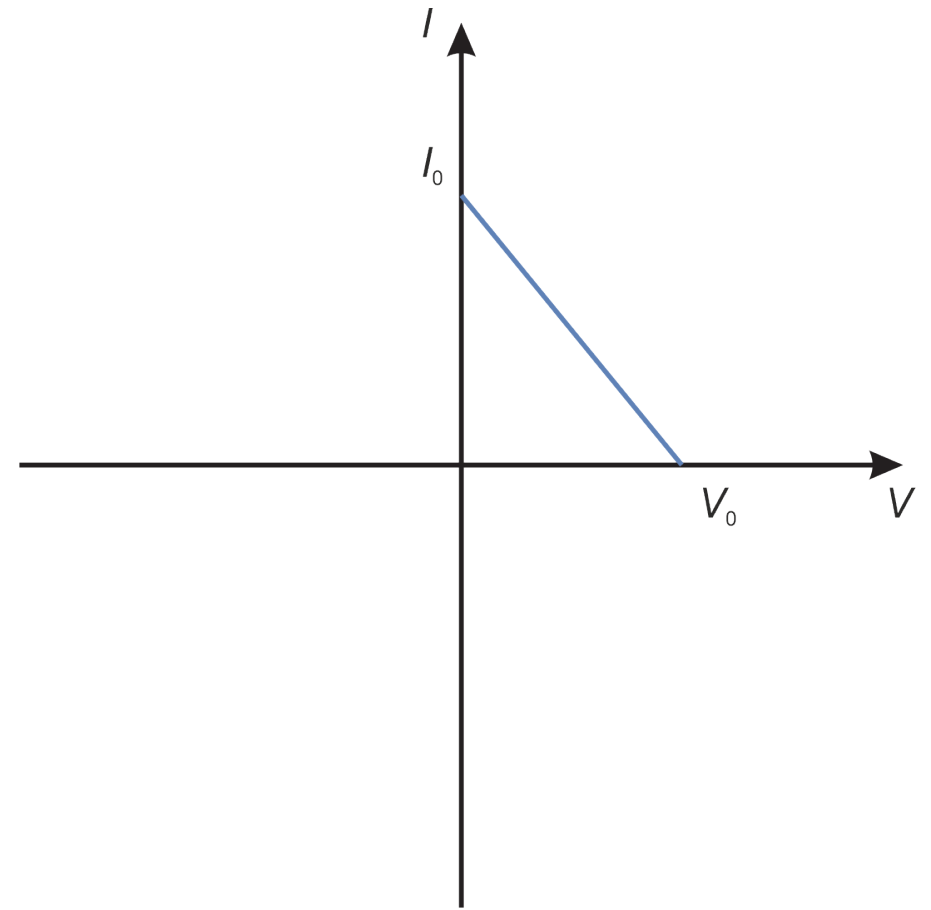


Karakteristika idealnog naponskog
generatora

Karakteristike dvopola



Karakteristika idealnog strujnog generatora



Karakteristika realnog generatora

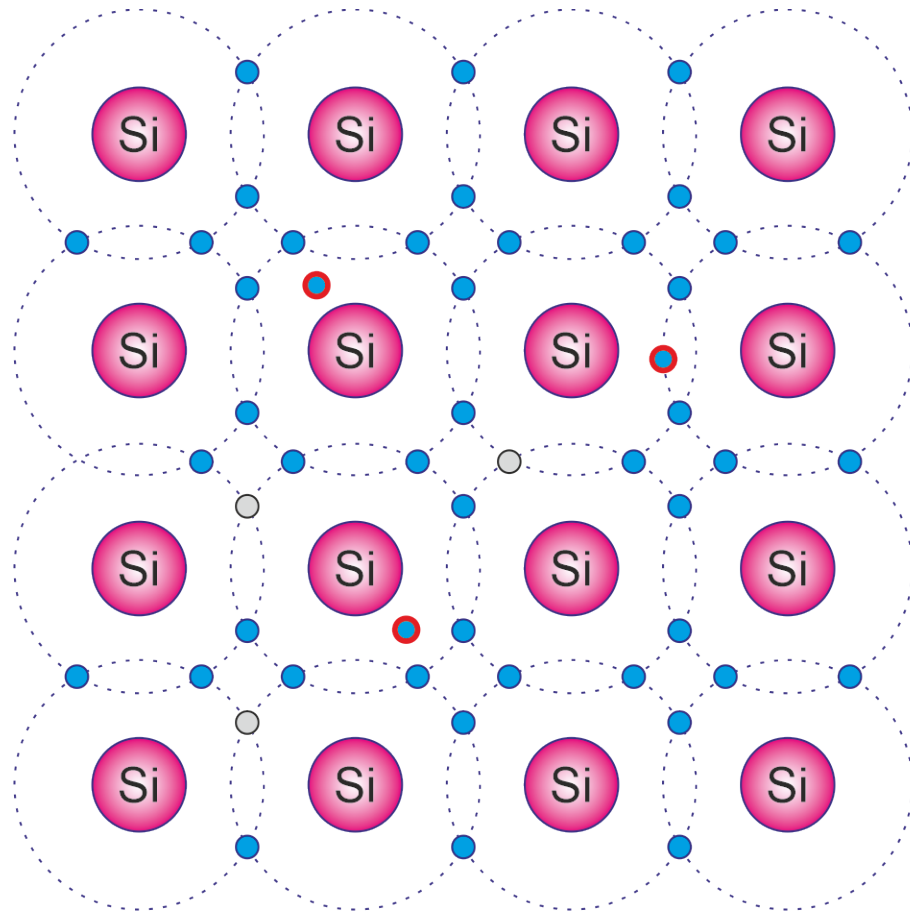
Poluprovodnički elementi

- Primenom osnovnih električnih elemenata vrlo je teško realizovati kola i uređaje sa različitim korisnim funkcijama. Kola koja sadrže samo ove elemente nemaju veliki broj različitih primena i uglavnom imaju teorijski značaj.
- U elektronici pored ovih osnovnih elemenata koristimo i druge, tzv. poluprovodničke elemente: diode, bipolarne tranzistore, tranzistore sa efektom polja, tiristore i druge. Ovi elementi pružaju mnoge nove mogućnosti.
- Poluprovodnički elementi su izrađeni od materijala koji se nazivaju **poluprovodnički materijali** ili jednostavnije, **poluprovodnici**.

Poluprovodnički elementi

- Najčešće korišćeni poluprovodnici su elementi **silicijum (Si)**, **germanijum (Ge)** i **III-V elementi** (galijum arsenid, **GaAs**).
- Poluprovodnički materijali (**Si**, **Ge**) pripadaju IV grupi periodnog sistema i imaju četiri valentna elektrona.
- Usled termičke ekscitacije, valentni elektroni se mogu osloboditi i doprineti električnoj provodnosti materijala. Usled ekscitacije, nastaju **šupljine** koje se efektivno ponašaju kao pozitivna naelektrisanja.
- Koncentracija elektrona u poluprovodniku zavisi od temperature i poluprovodnog materijala.

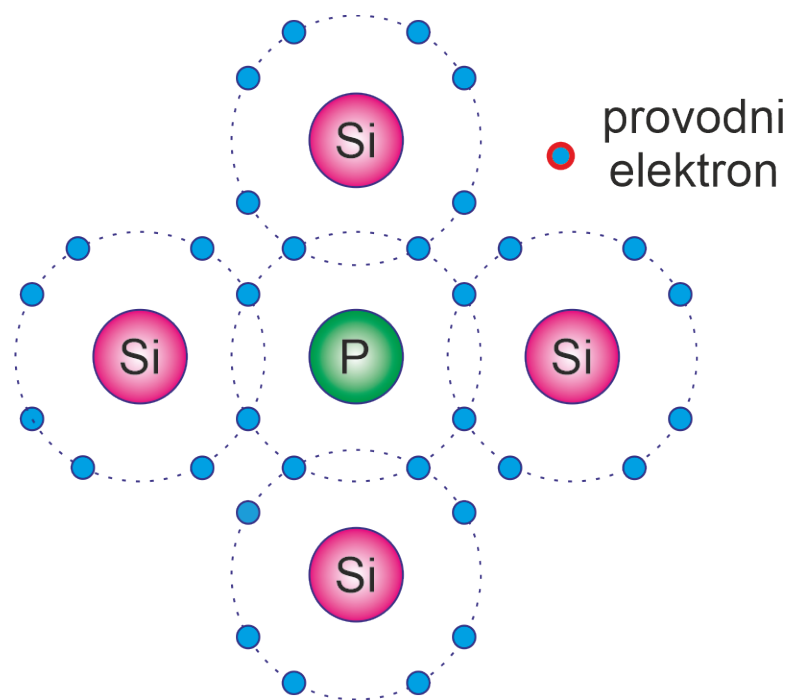
Poluprovodnički elementi



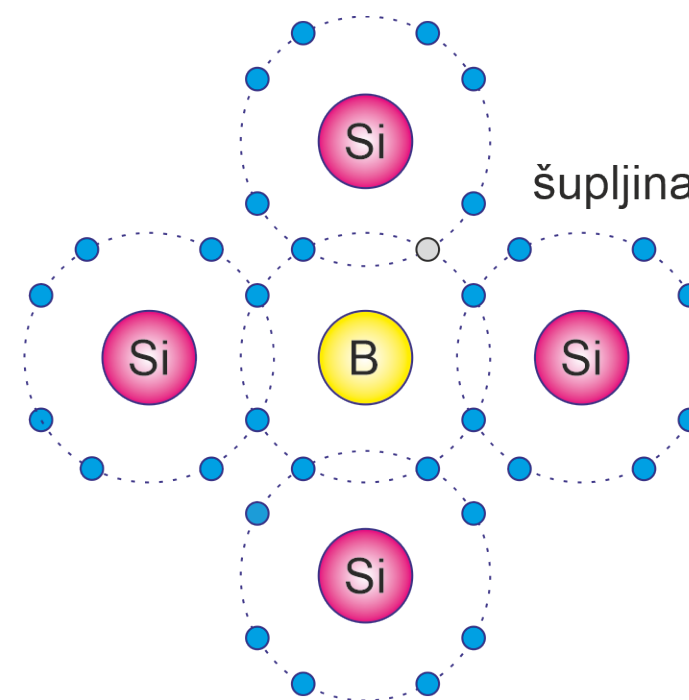
- Si atom silicijuma
- valentni elektron
- provodni elektron
- šupljina

Dopirani poluprovodnik

- Dodavanjem elemenata III ili V grupe poluprovodniku (**dopanti**), menjaju se njegova provodna svojstva – **dopiranje**.



N-tip



P-tip

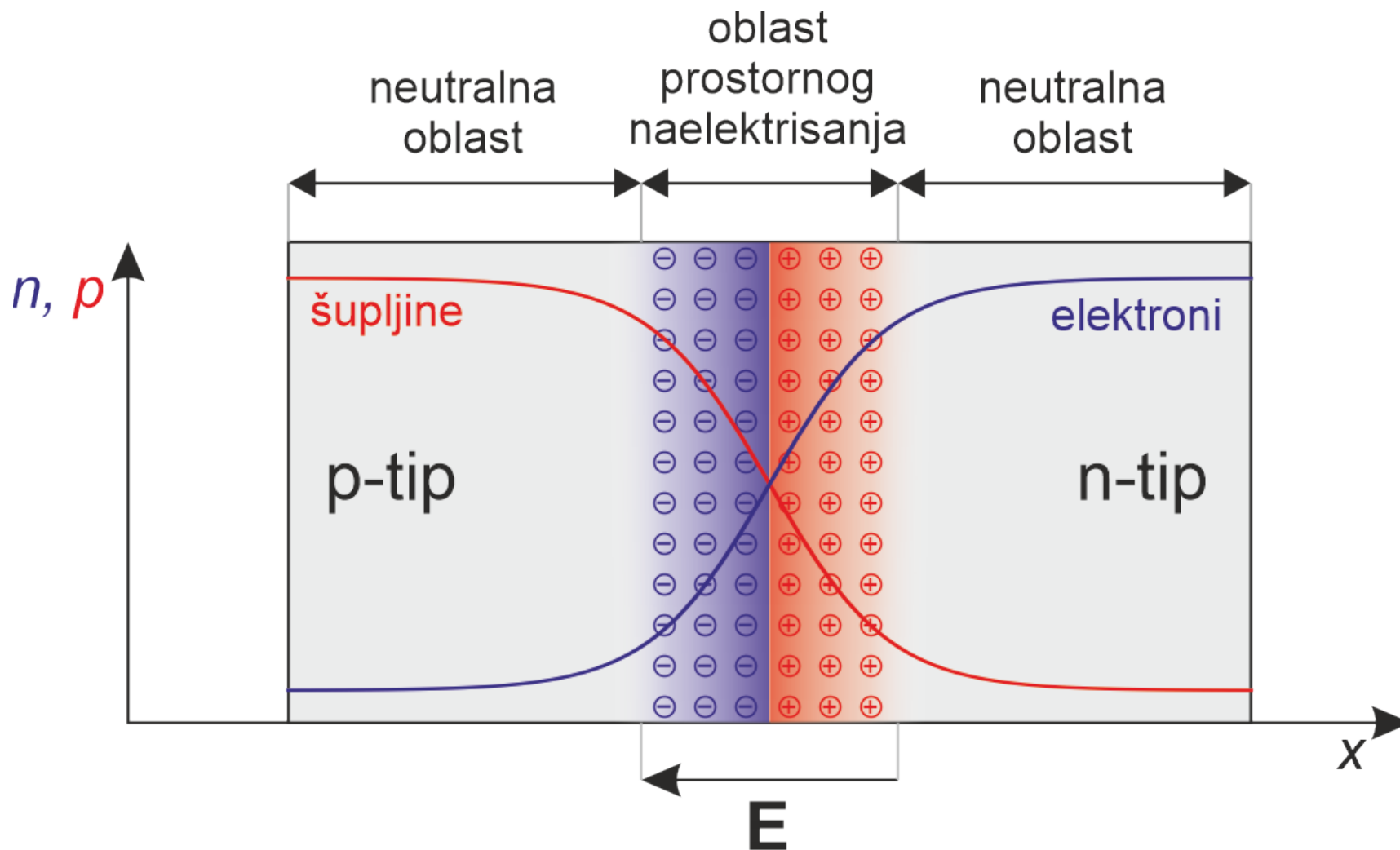
Kretanje nosilaca naelektrisanja

- U poluprovodnicima postoje dva fizička mehanizma kretanja naelektrisanih čestica – **drift** i **difuzija**.
- **Drift** je kretanje nosilaca naelektrisanja pod dejstvom sila električnog polja. Pod dejstvom električnog polja, elektroni u poluprovodniku se kreću kao i u metalima. Provodnost poluprovodnika zavisi od temperature i koncentracije dopanata.
- **Difuzija** je kretanje nosilaca naelektrisanja usled difuzije (prelaska čestica iz oblasti veće koncentracije u oblast manje koncentracije).

Poluprovodničke diode

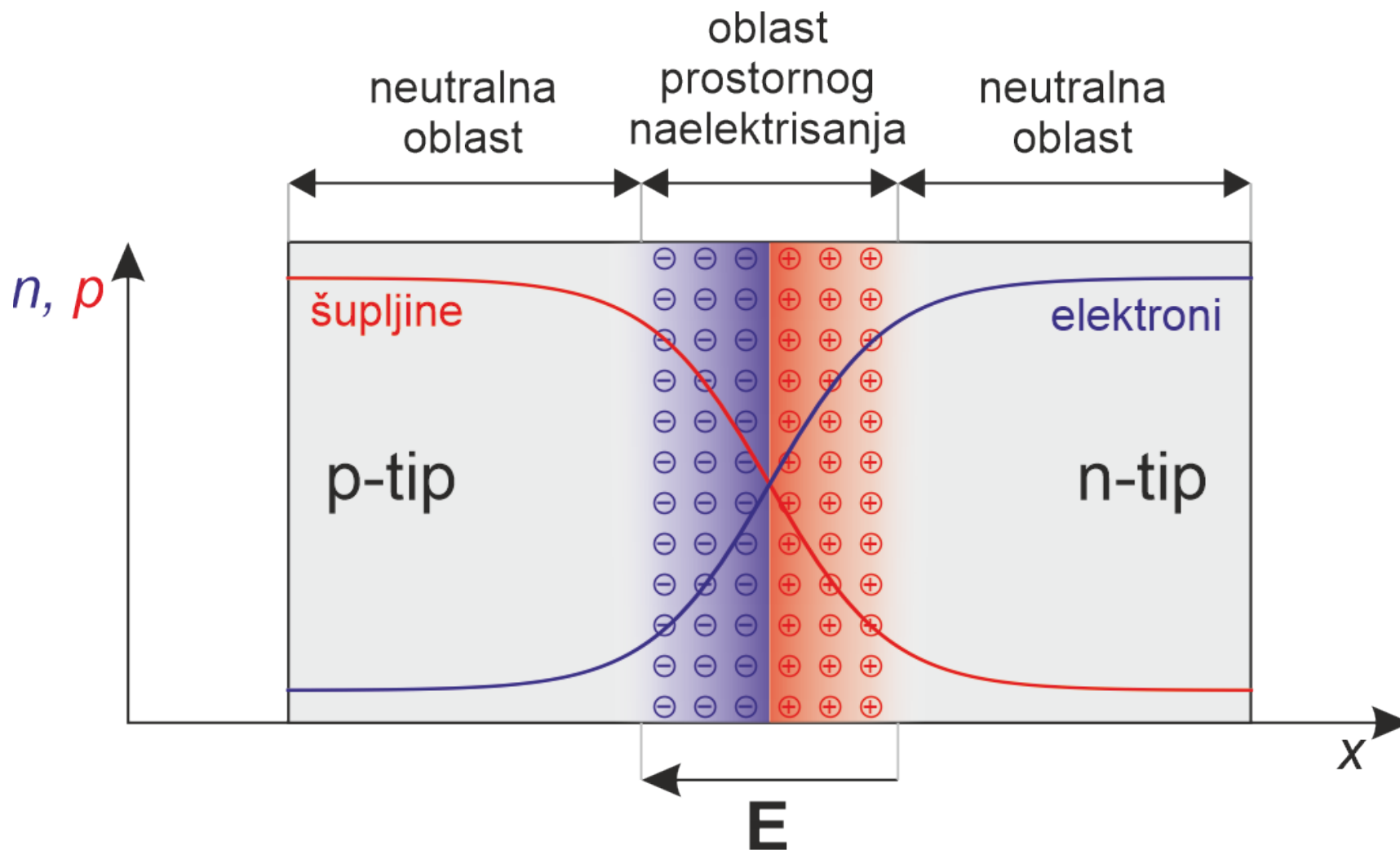
- Najjednostavniji poluprovodnički elementi su **poluprovodničke diode**, koje su sačinjene od dve različito dopirane oblasti, **P-tipa** i **N-tipa**. Ova struktura se naziva **PN spoj**.
- Postoji više tipova poluprovodničkih dioda, koje imaju različitu strukturu, svojstva, karakteristike i primene: 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, dakle **dvopol**.

PN spoj i poluprovodničke diode



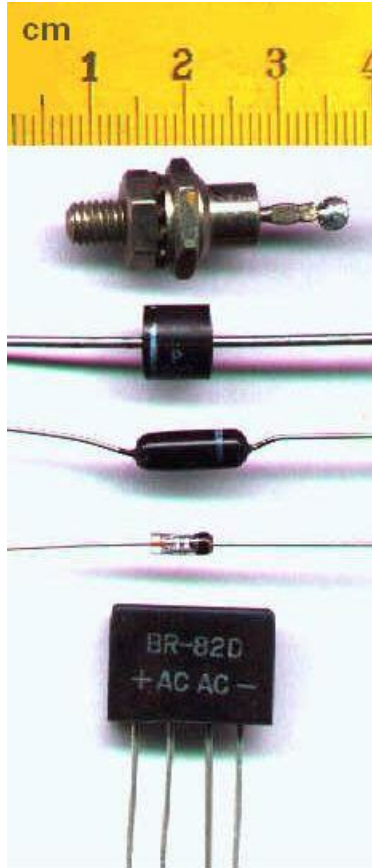
- Usled difuzije, elektroni prodiru iz oblasti n-tipa u oblast p-tipa, a šupljine iz oblasti p-tipa u oblast n-tipa. Formira se prostorno naelektrisanje.

PN spoj i poluprovodničke diode



- Oblast prostornog naelektrisanja nije električno neutralna, uspostavlja se polje **E** koje sprečava dalju difuziju elektrona i šupljina.

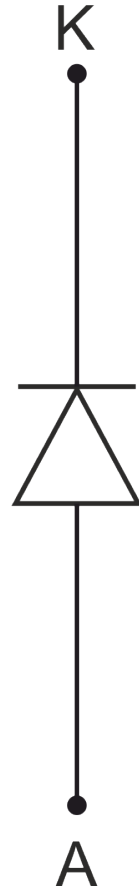
PN dioda



Različiti tipovi dioda
(Izvor: Wikipedia.com)



Struktura PN diode



Simbol PN diode

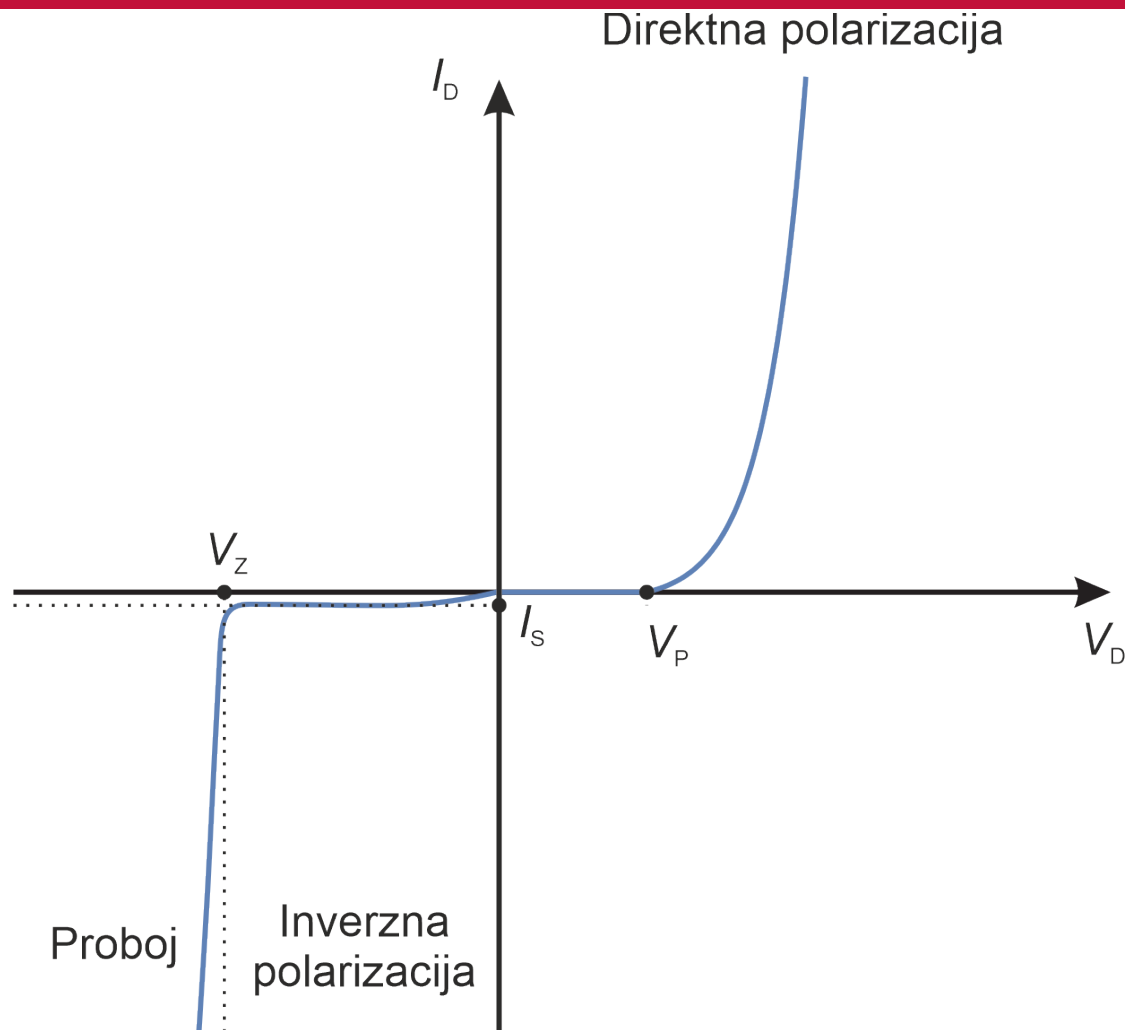
PN dioda

- Napon na diodi je jednak razlici napona na anodi i katodi:

$$V_D = V_A - V_K.$$

- Dioda može biti **nepolarisana** ($V_D=0$), **direktno polarisana** ($V_D>0$) i **inverzno polarisana** ($V_D<0$).
- Oblast direktne polarizacije odgovara prvom kvadrantu strujno naponske karakteristike, oblast inverzne polarizacije delu trećeg kvadranta. Kada je dioda nepolarisana, to stanje na karakteristici odgovara koordinatnom početku.

Strujno-naponska karakteristika PN dioda

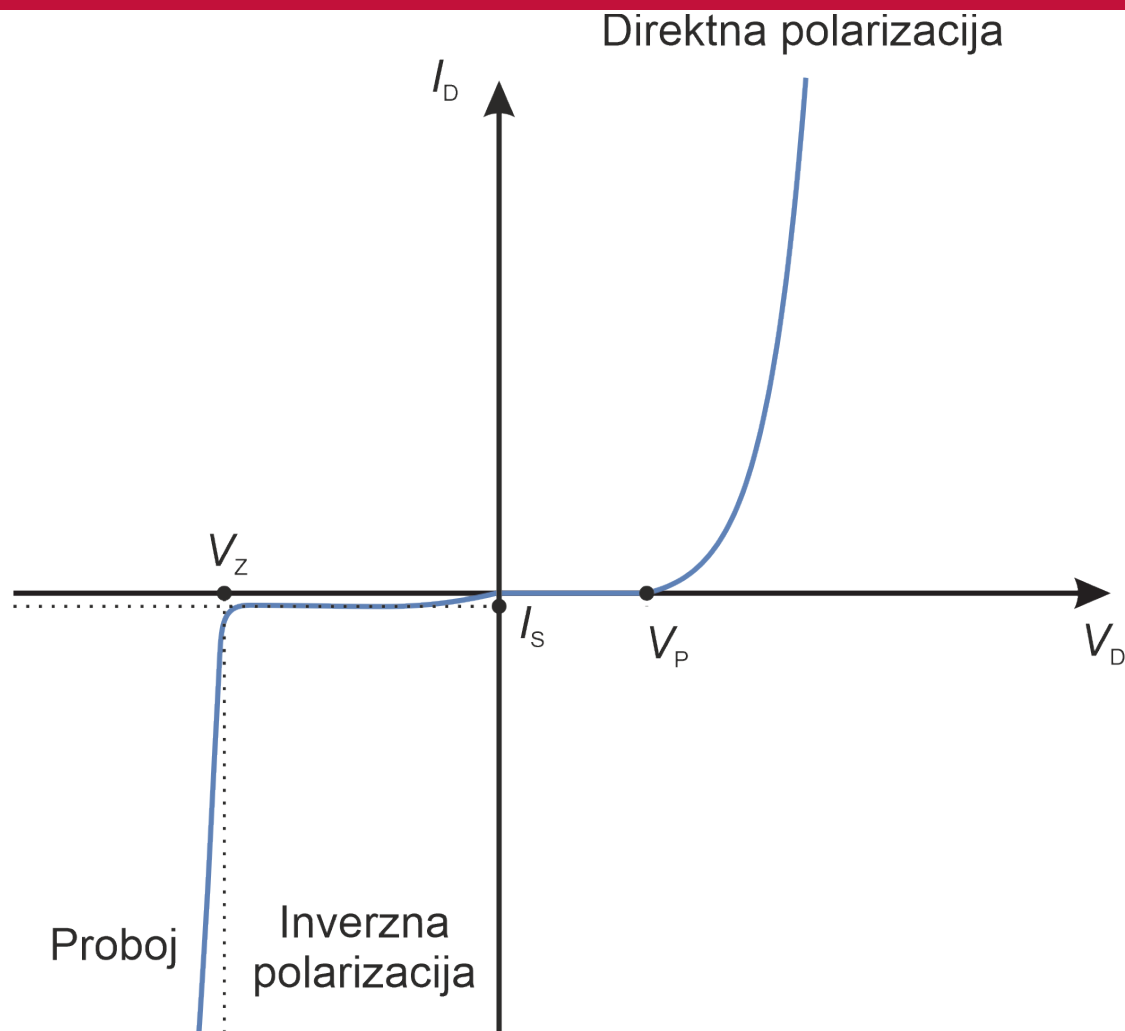


- U oblasti direktne polarizacije, struja diode eksponencijalno raste sa porastom napona:

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

- 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 karakteristika PN dioda

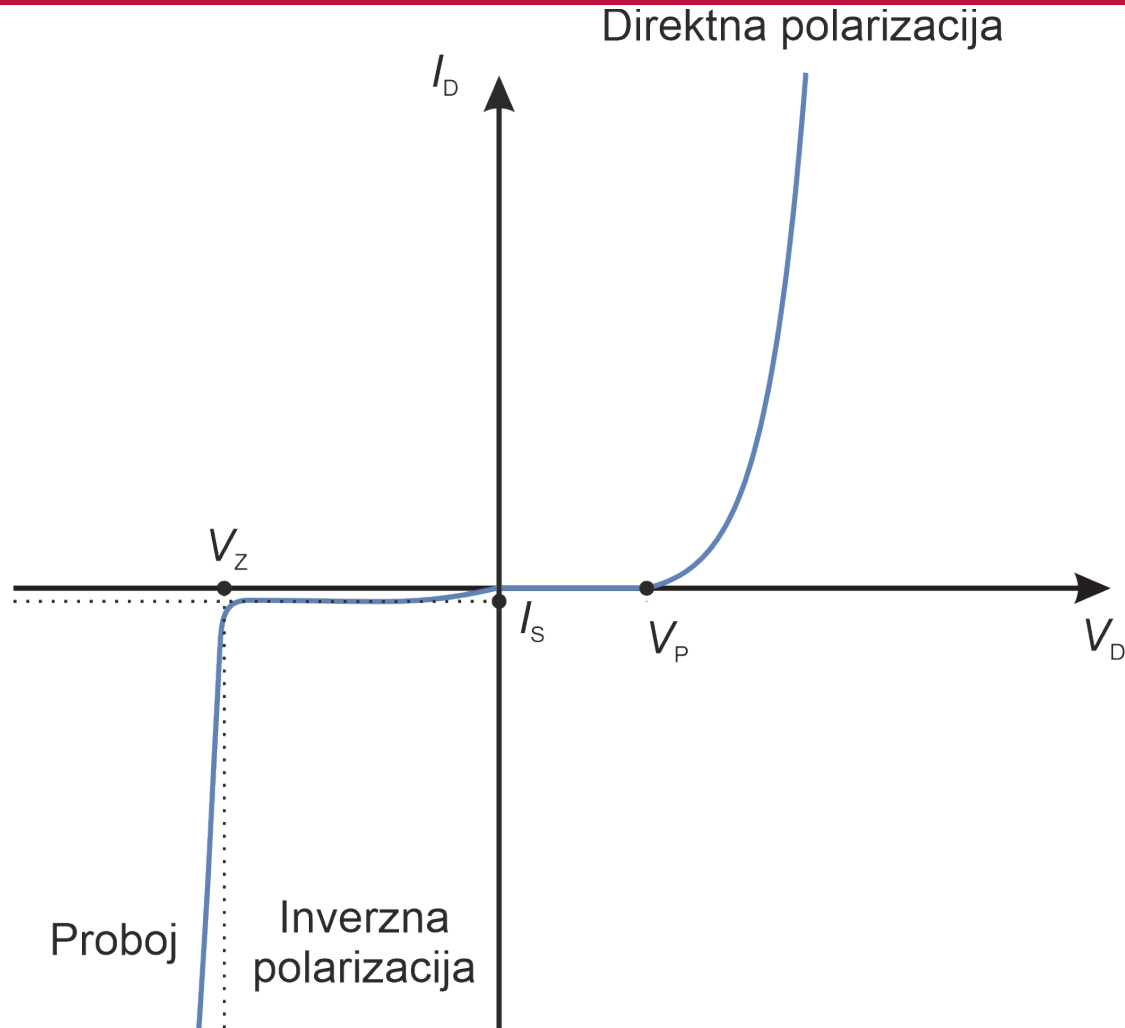


- Napon V_T je termički napon:

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

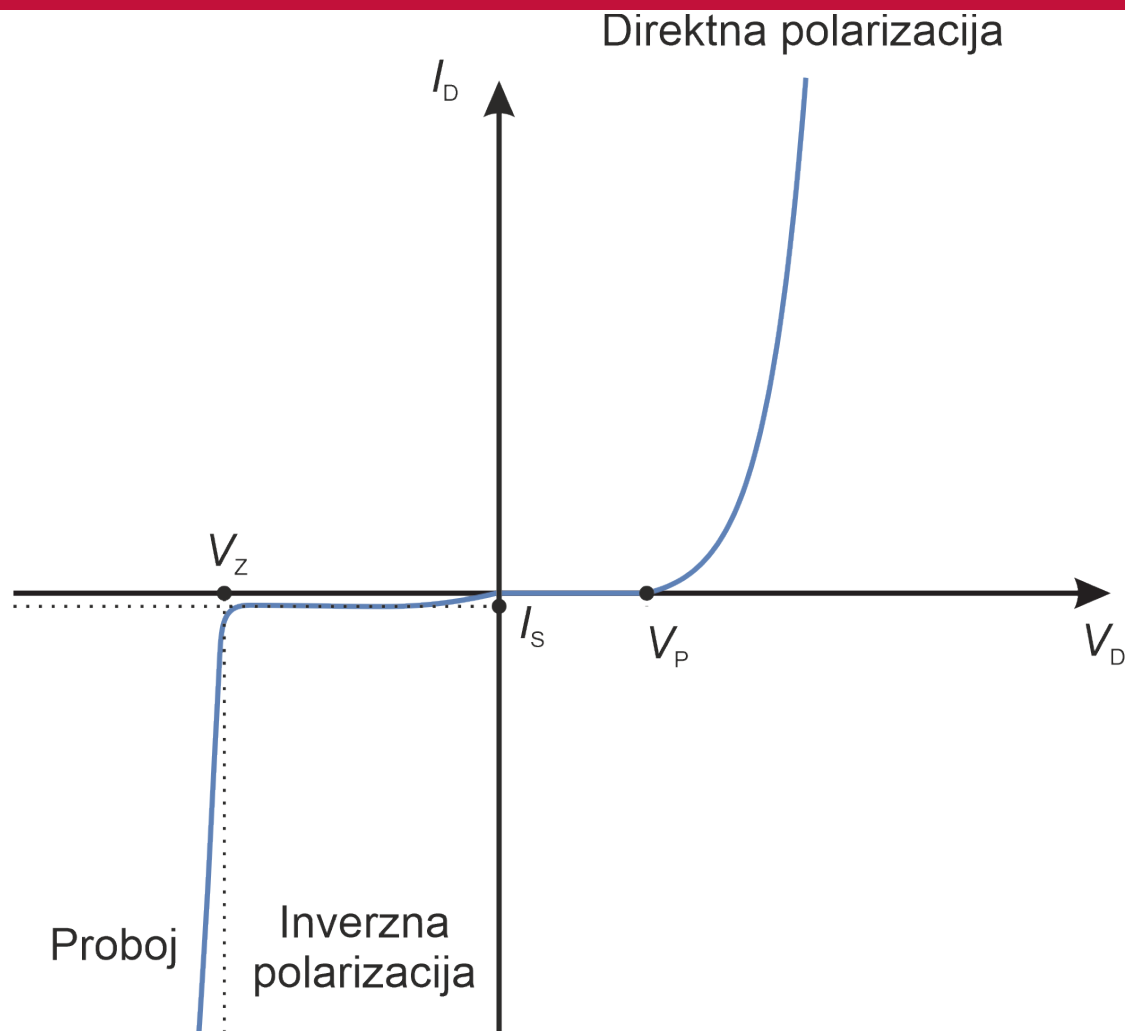
- k je Bolcmanova konstanta ($1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K), q_e predstavlja elementarno naelektrisanje ($1,6 \cdot 10^{-19}$ C), T je apsolutna temperatura ($V_T = 26$ mV za $T=300$ K).

Strujno-naponska karakteristika PN dioda



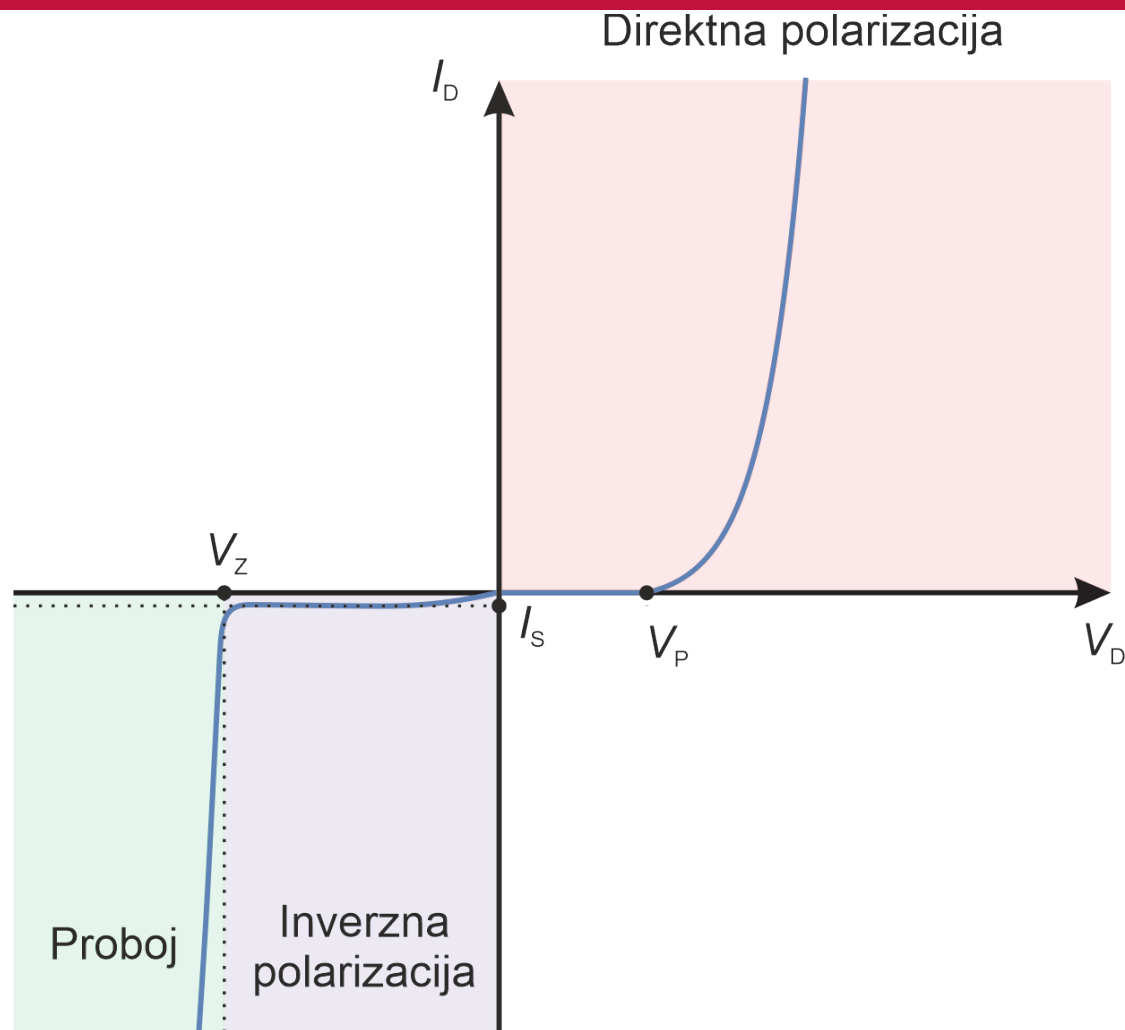
- Eksponencijalna funkcija brzo raste, za male promene napona V_D , promene struje su velike.
- U ovoj oblasti dioda se u kolu ponaša praktično kao **kratak spoj**.

Strujno-naponska karakteristika PN dioda



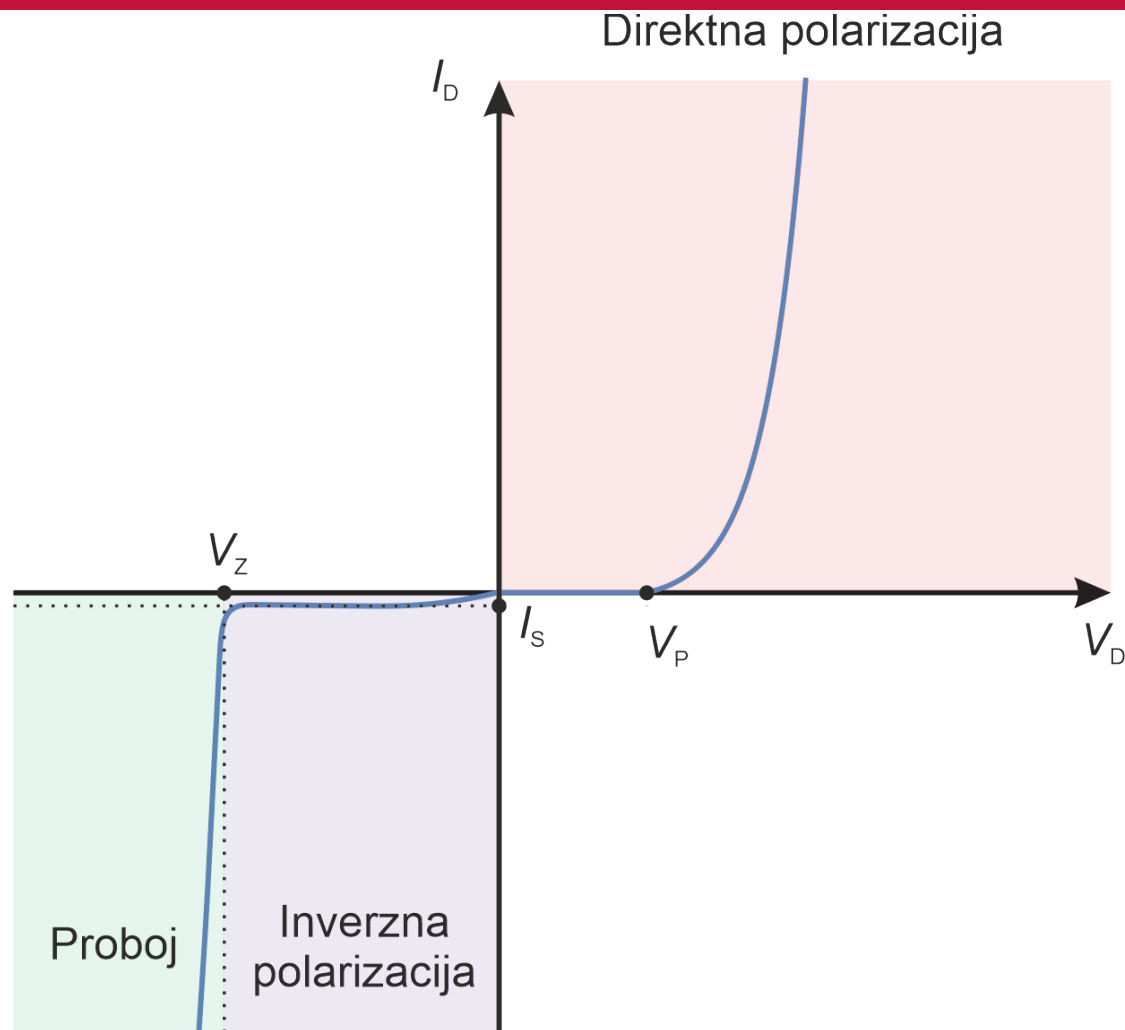
- I_S je inverzna struja zasićenja diode. Ova struja je konstantna, zavisi od dimenzija PN spoja, poluprovodničkog materijala i koncentracija dopanata u P i N oblasti.
- U oblasti inverzne polarizacije, struja diode I_S je izuzetno mala (reda veličine $10^{-10}A$). U ovoj oblasti, dioda se u kolu ponaša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

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 proboja**.

Strujno-naponska karakteristika PN dioda

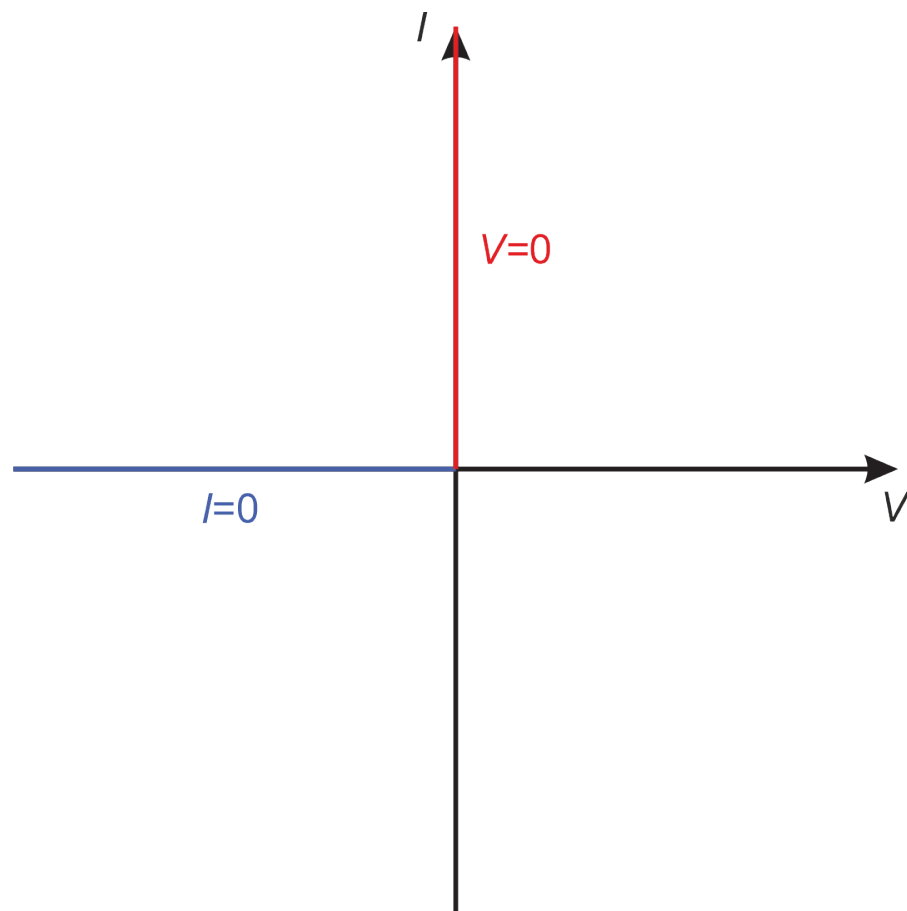


- Napon V_Z je napon proboja. U oblasti proboja, dioda se ponaša kao **naponski generator** sa malom unutrašnjom otpornošću, napona V_Z .
- Oblast proboja se kod nekih tipova dioda koristi za stabilizaciju napona (diode koje se koriste za ovu namenu su **Zener diode**).

Model diode

- Strujno-naponska karakteristika diode jasno ukazuje da je dioda **nelinearni element**.
- Zavisnost struje od napona diode pri direktnoj polarizaciji je eksponencijalna, te je analitički nemoguće rešiti kolo sa diodama (odrediti nepoznate struje grana i napone čvorova), jer se problem svodi na rešavanje sistema nelinearnih jednačina. Ovakvi sistemi se mogu rešiti samo **numeričkim metodama**.
- Kako bi se kola sa nelinearnim elementima rešila, nelinearni elementi se prilikom izračunavanja zamenjuju **modelima**, koji predstavljaju matematičku aproksimaciju elemenata i omogućavaju lakša izračunavanja.

Model diode



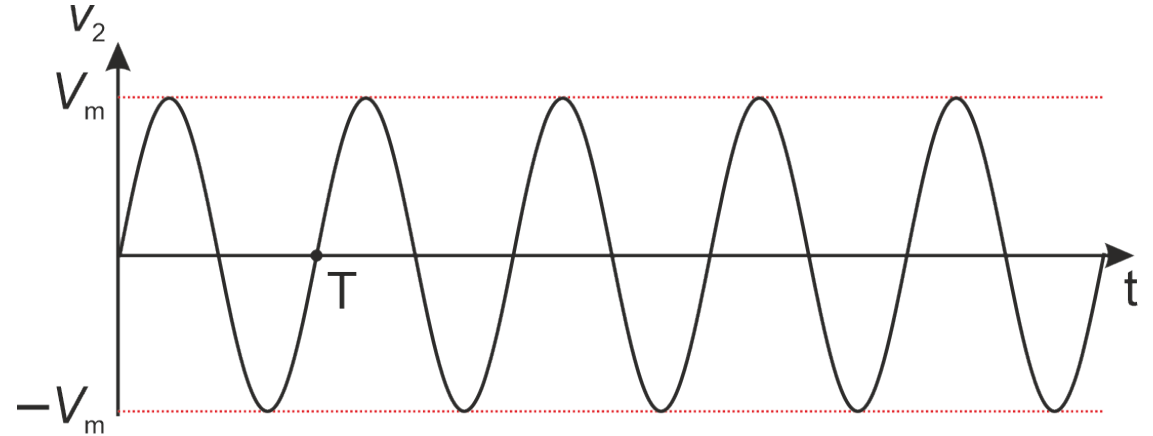
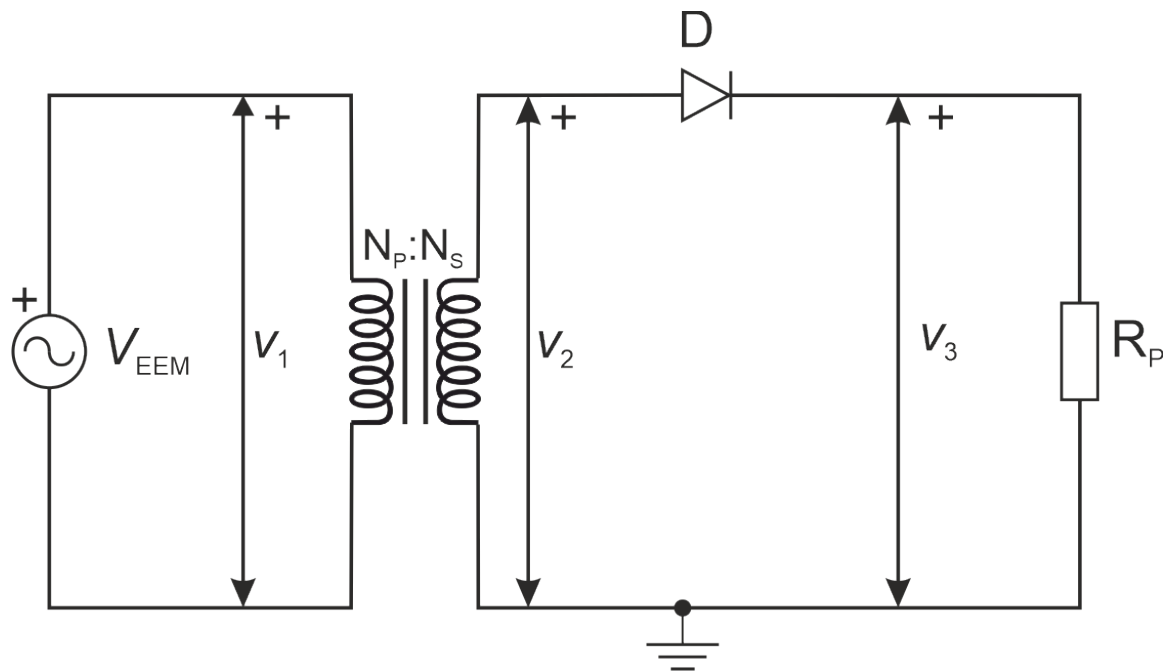
Model idealne diode

- Najjednostavniji modeli su linearni, dobijaju se linearizacijom karakteristike u nekom opsegu napona/struje.
- Postoji nekoliko modela PN diode, a najprostiji je **model idealne diode**.
- Idealna dioda za negativne napone predstavlja prekid, a za pozitivne kratak spoj.

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 **usmerači napona**.
- Postoje dve vrste usmerača – **polutalasni** i **punotalasni**.
- Polutalasni usmerač je najjednostavnije elektronsko kolo.

Primena dioda – polutalasno usmeravanje

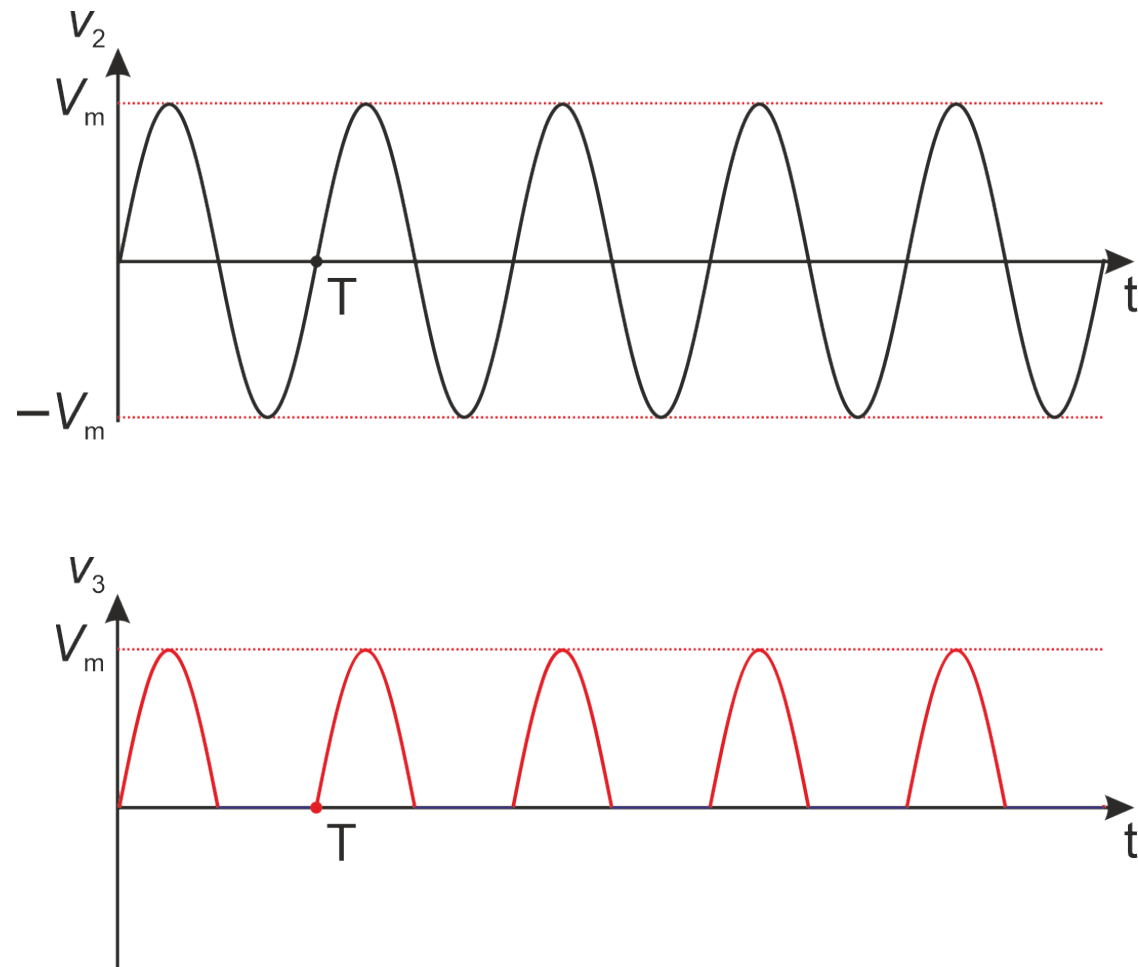
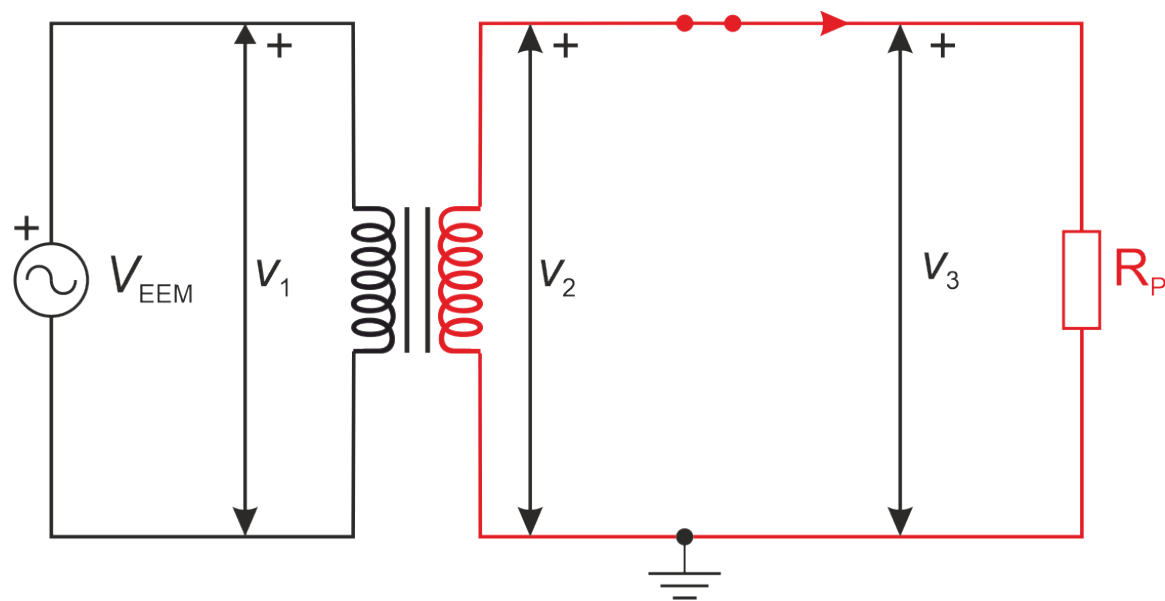


$$v_2 = V_m \sin \omega t$$

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

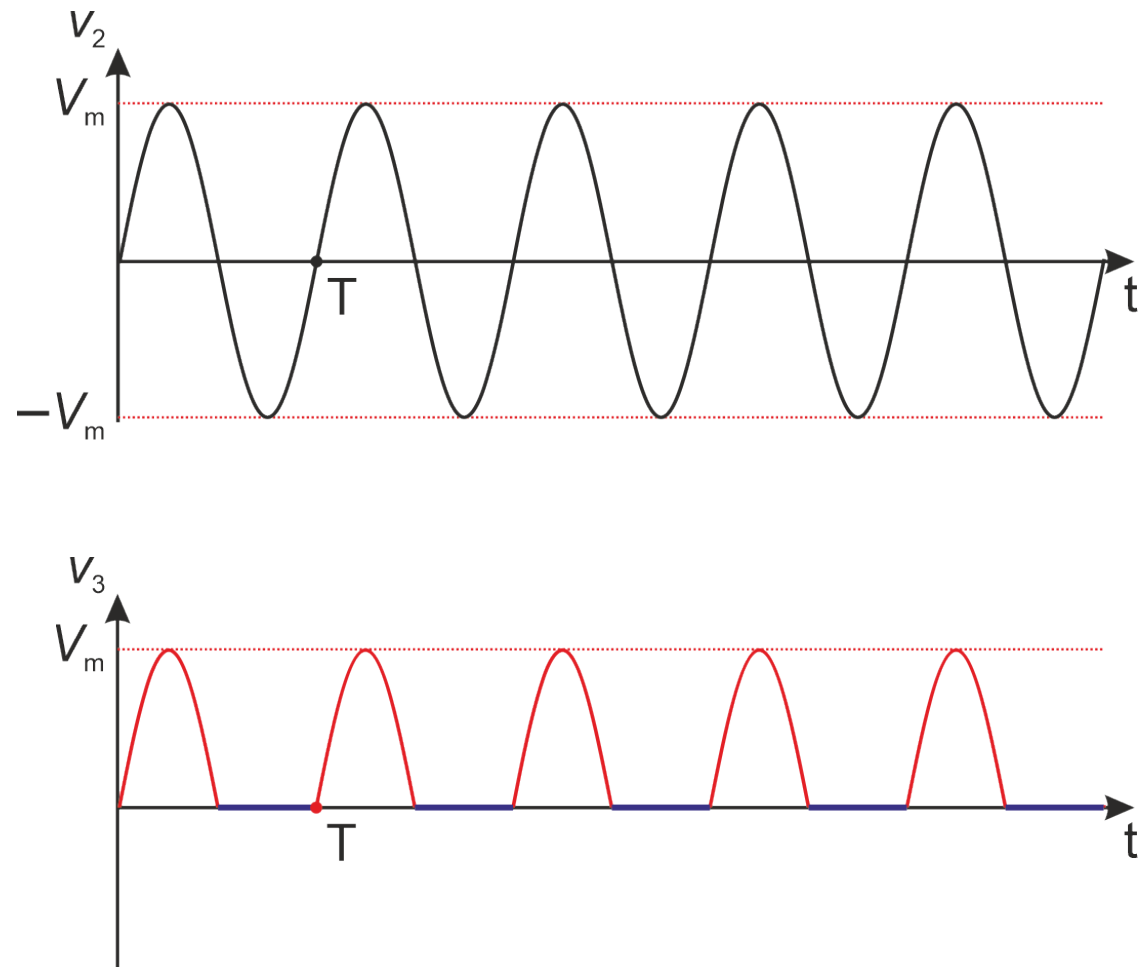
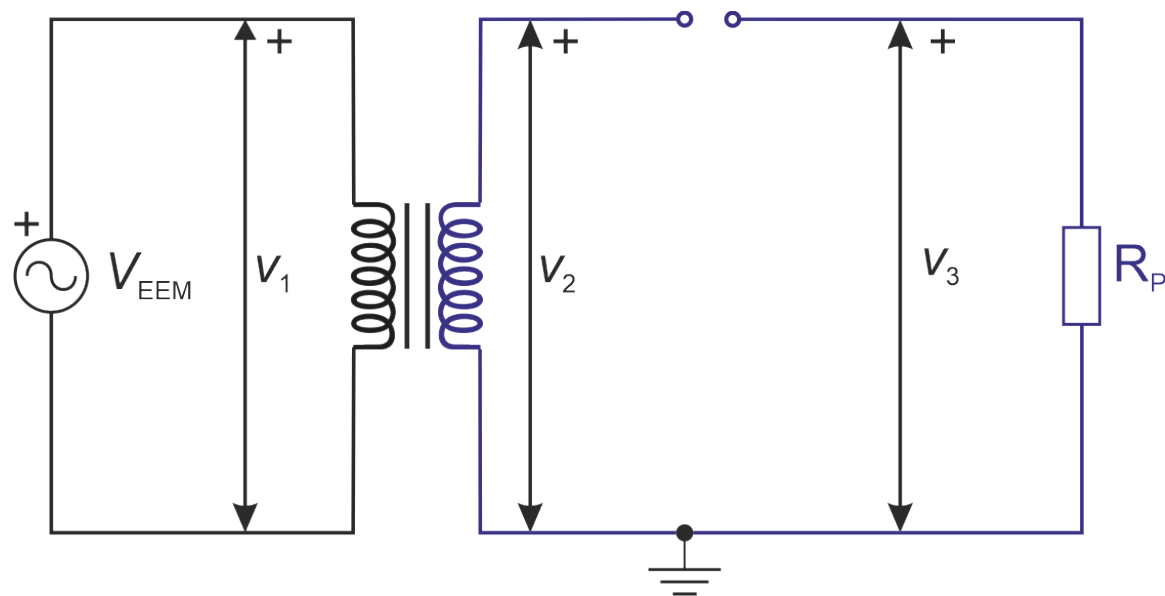
Primena dioda – polutalasno usmeravanje

Pozitivna poluperioda ulaznog napona, D provodi

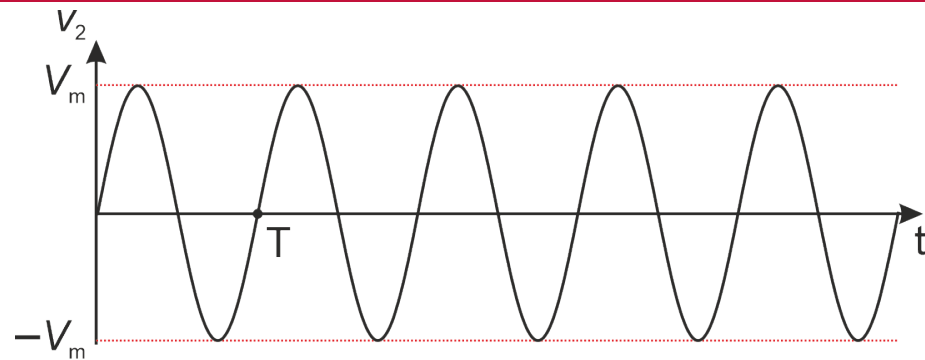
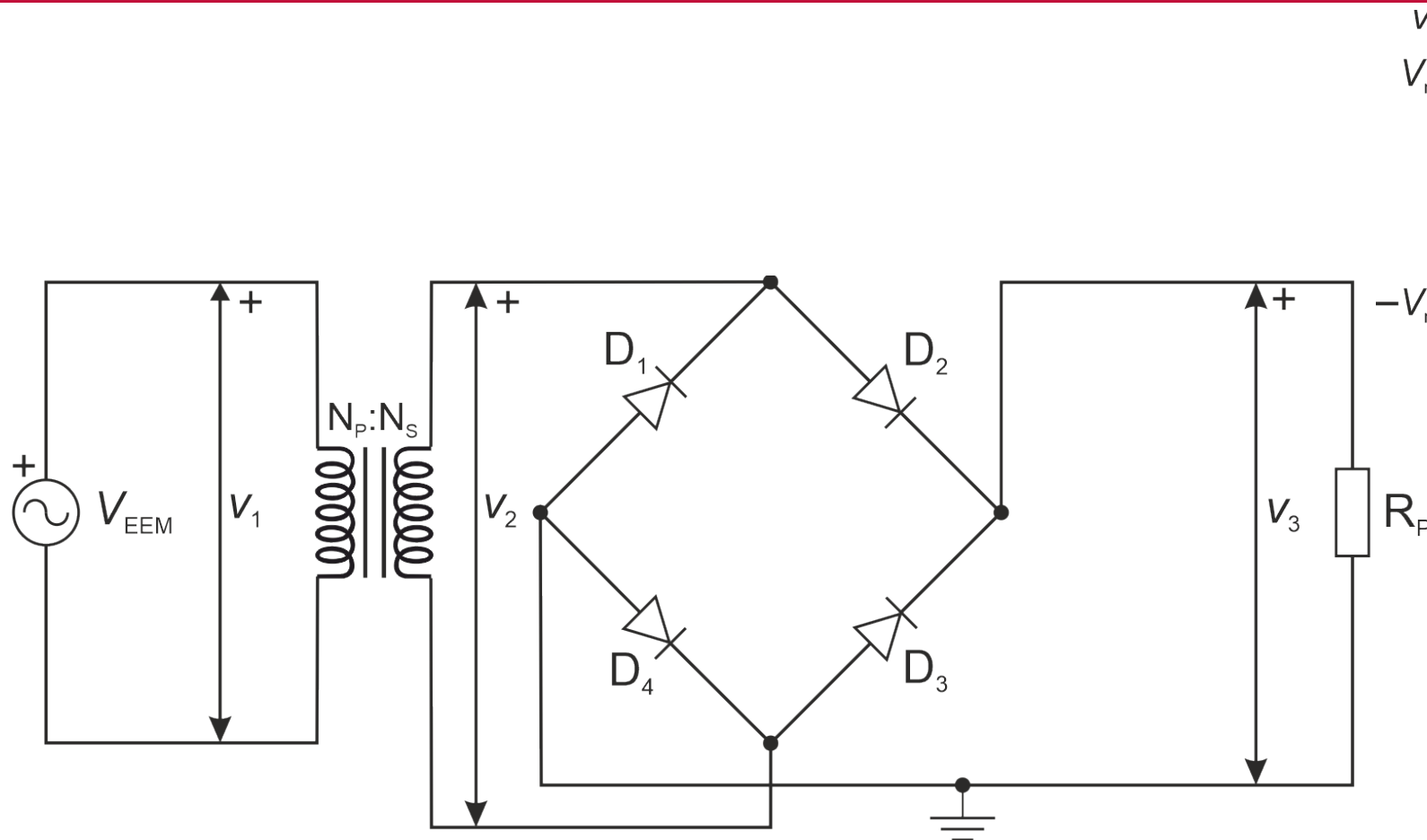


Primena dioda – polutalasno usmeravanje

Negativna poluperioda
ulaznog napona, D ne provodi



Primena dioda – punotalasno usmeravanje

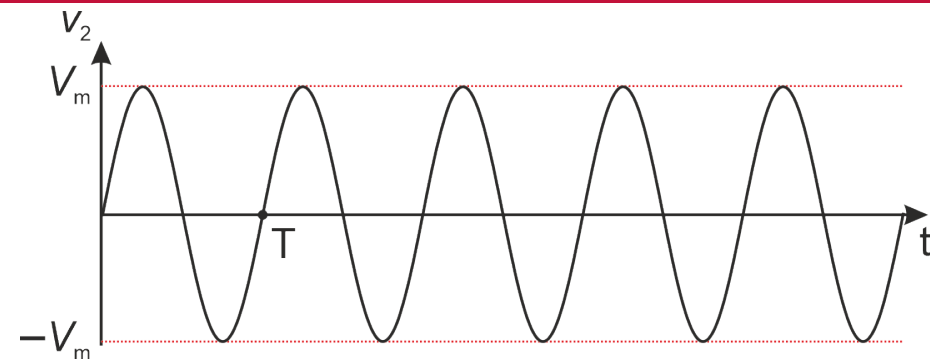
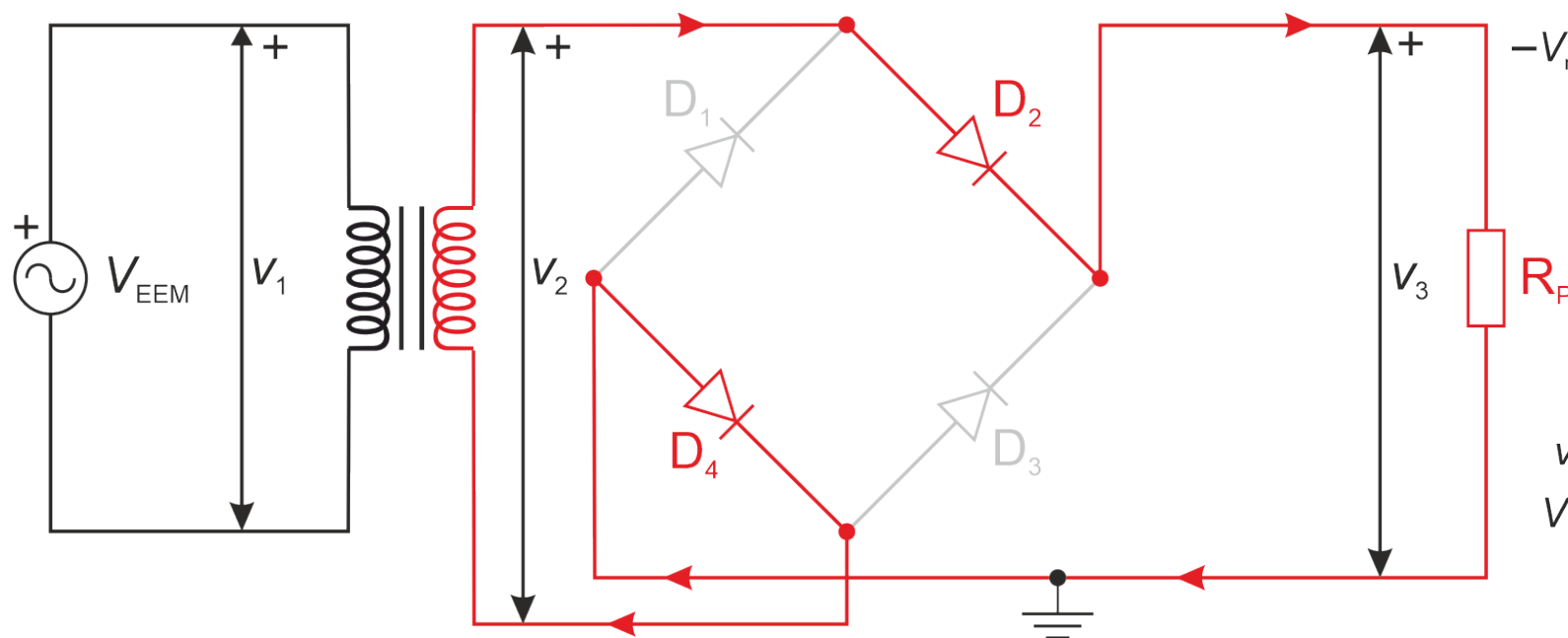


$$v_2 = V_m \sin \omega t$$

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

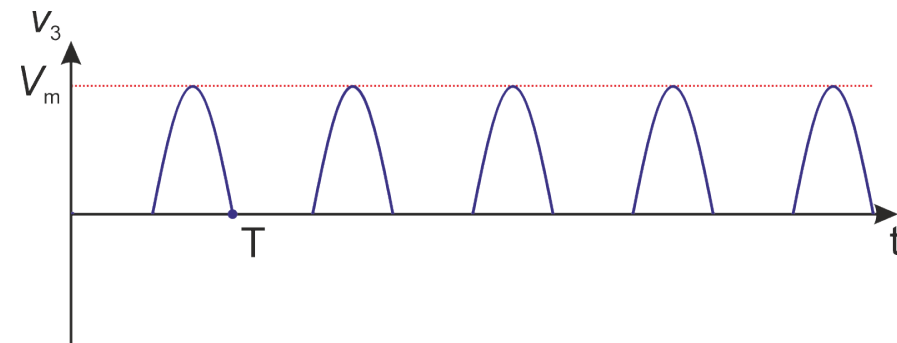
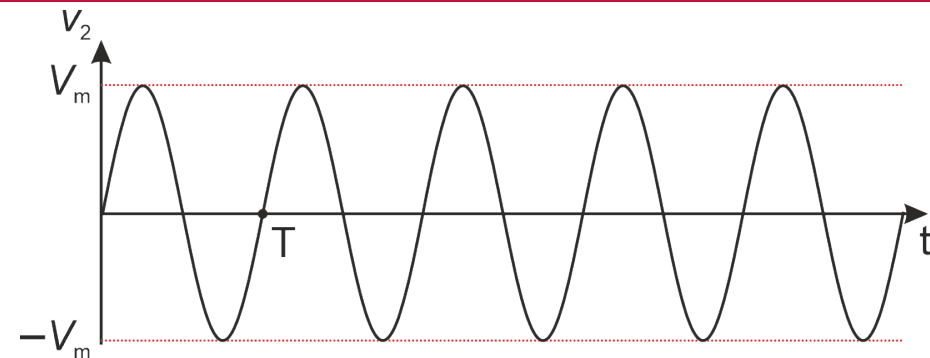
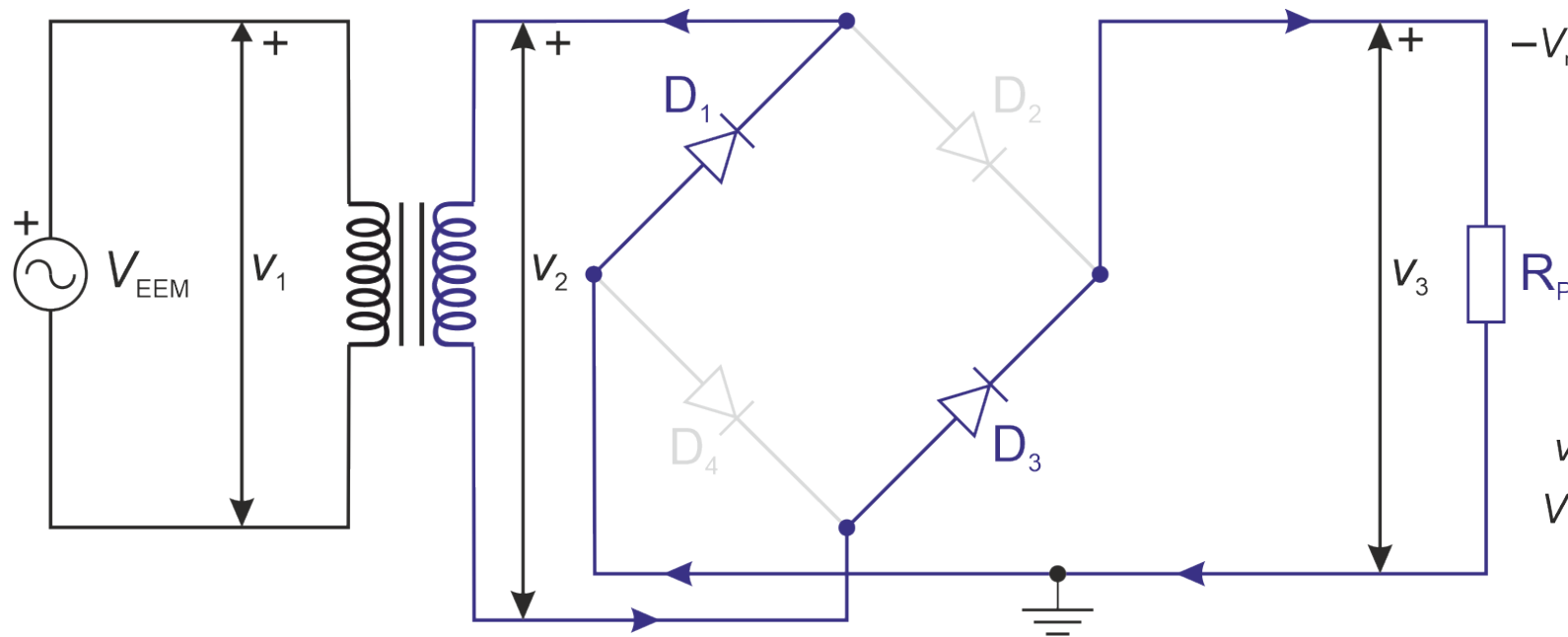
Primena dioda – punotalasno usmeravanje

Pozitivna poluperioda ulaznog napona,
 D_2 i D_4 provode

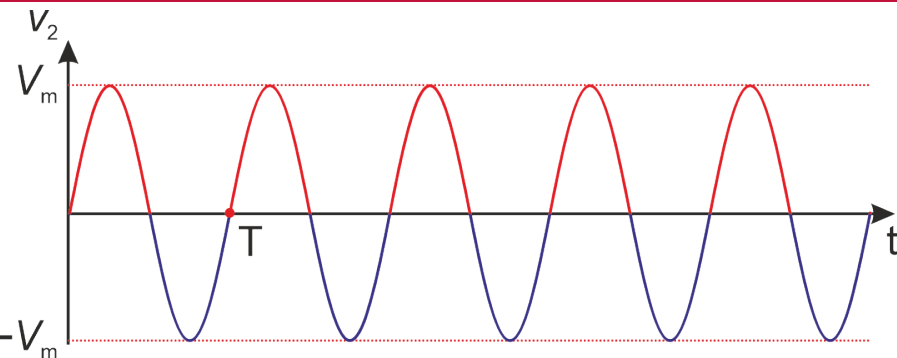
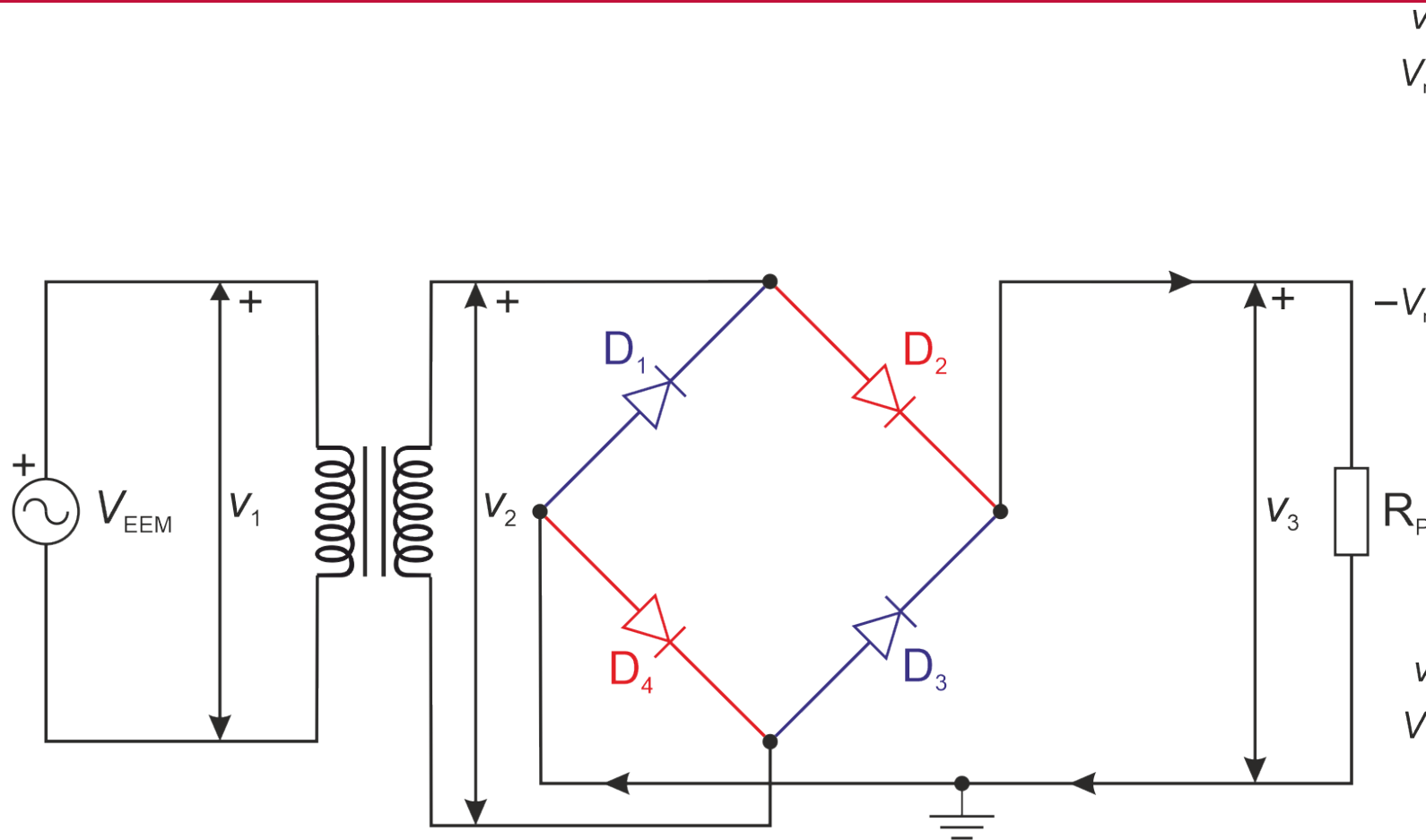


Primena dioda – punotalasno usmeravanje

Negativna poluperioda ulaznog napona,
 D_1 i D_3 provode

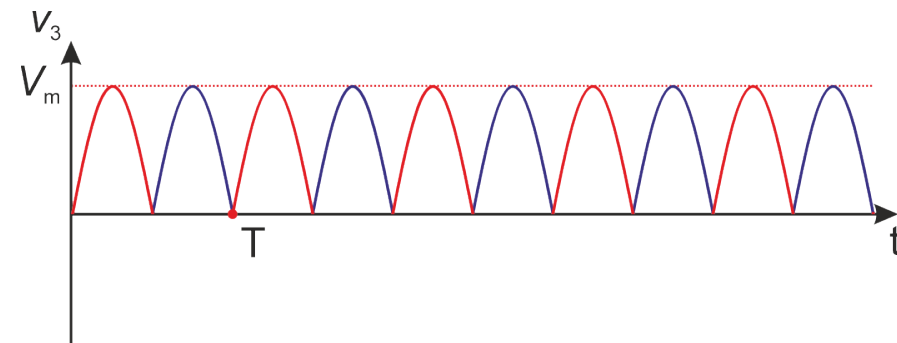


Primena dioda – punotalasno usmeravanje



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

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



Primena dioda – punotalasno usmeravanje

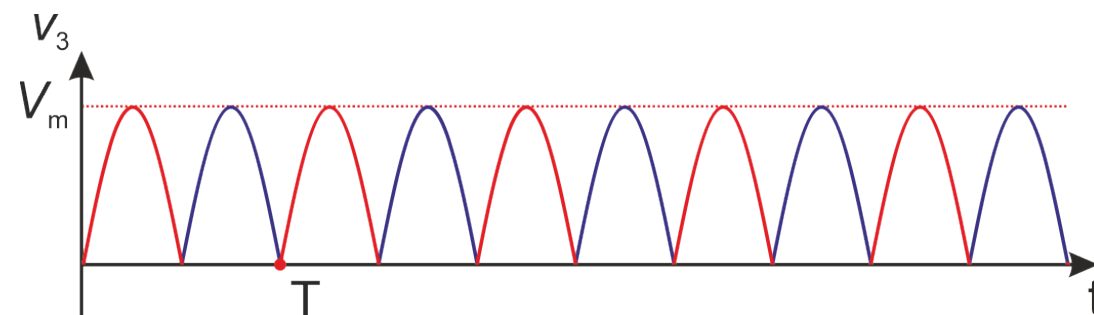
- Usmereni napon v_3 **ne menja polaritet** i uvek je **pozitivan**. Međutim, v_3 **nije konstantan** napon, jer se menja u vremenu.
- v_3 je složenoperiodičan napon čija je frekvencija dvostruko veća od frekvencije napona elektroenergetske mreže v_1 .
- Primenom Furijeove transformacije možemo odrediti 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.

Primena dioda – punotalasno usmeravanje

- Jednosmerna komponenta je jednaka srednjoj vrednosti signala:

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

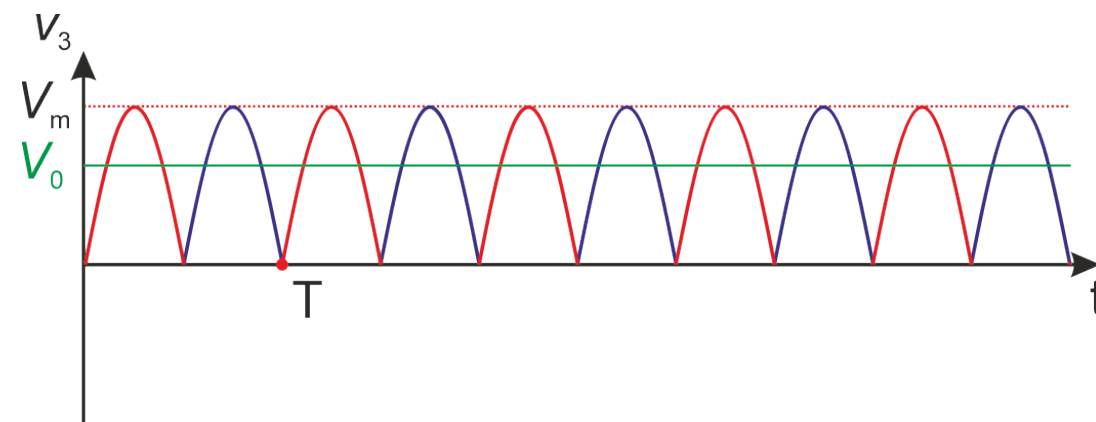
$$V_0 = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} V_m \sin \omega t \cdot dt = \frac{2V_m}{T} \int_0^{T/2} \sin \frac{2\pi t}{T} \cdot dt$$



Primena dioda – punotalasno usmeravanje

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

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



$$V_0 = \frac{2 N_S}{\pi N_P} \cdot V_{EEM}$$

$$\frac{N_P}{N_S} = \frac{2 V_{EEM}}{\pi V_0}$$