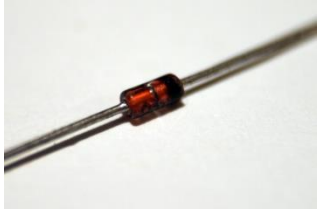


Osnovi analogne elektronike

prof. Dr Nenad Jovičić

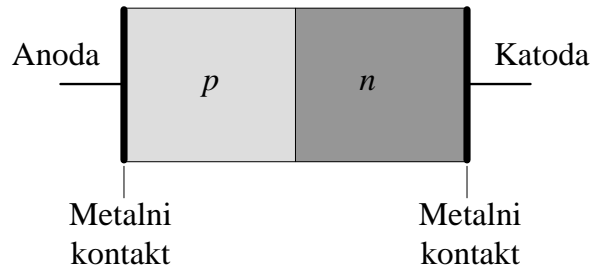
nenad@etf.rs



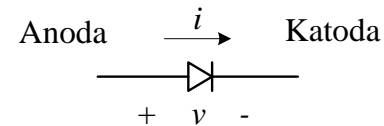
Diode



- Najjednostavnija i verovatno najčešće korišćena pp el. komponenta.
 - Posедуje usmeračko svojstvo (provodi struju samo u jednom smeru)
- Dioda ima dve elektrode, anodu i katodu. U osnovi, dioda sadrži PN spoj.



(a)



(b)

Diode

- **Strujno-naponska statička karakteristika diode**

$$I = I_S \left(e^{V/\eta V_T} - 1 \right)$$

(pomnožimo obe strane izraza za gustinu struje PN spoja sa površinom poprečnog preseka)

- I_S inverzna struja zasićenja, V_T temperaturni napon, η (0.5-1.5) zavisi od materijala i konstrukcije
- Zavisnost nelinearna!

Diode

– Strujno-naponska statička karakteristika diode

$$i = I_S \left(e^{v/\eta V_T} - 1 \right)$$

– Jednačina važi kada su brzine promene napona i struje mnogo manje od brzina odvijanja fizičkih procesa u diodi.

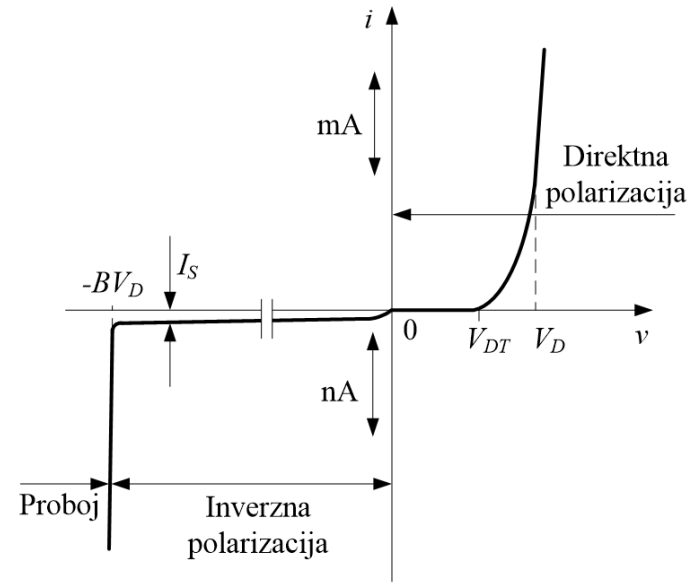
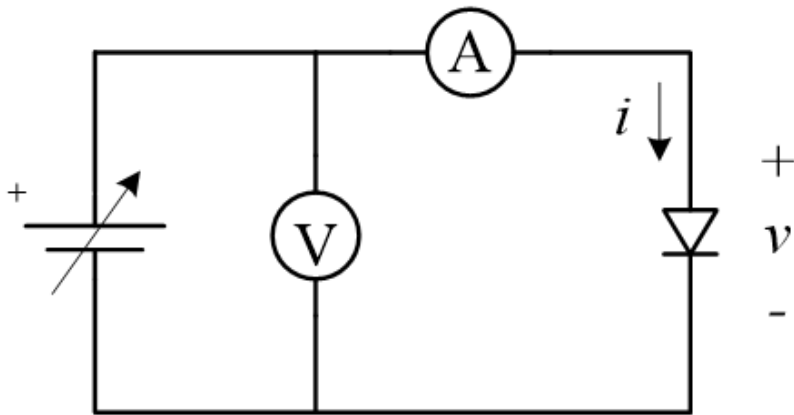
- Statički režim rada, zato **statička** karakteristika diode

– $V \gg V_T \rightarrow i \cong I_S e^{v/\eta V_T}$

– $V \ll -V_T \rightarrow i \cong -I_S$

Diode

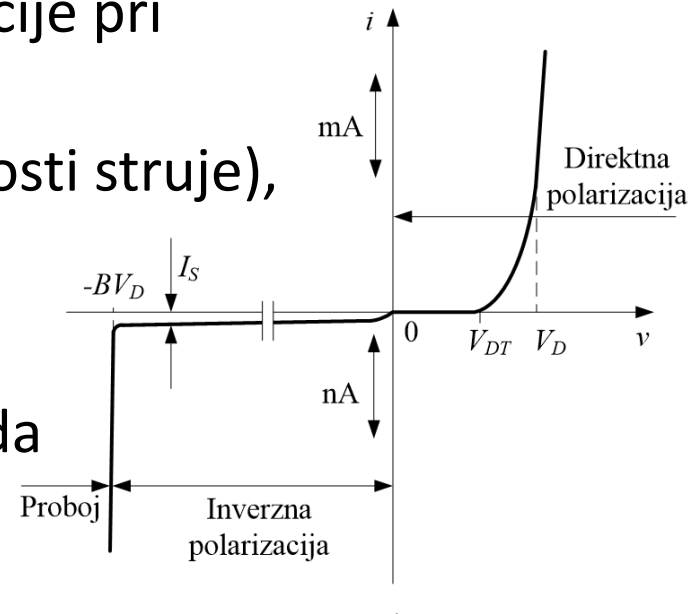
- Snimanje strujno-naponske karakteristike diode
- Merno kolo i rezultat



Diode

– Snimanje strujno-naponske karakteristike diode

- V_{DT} (V_T , V_γ) napon direktne polarizacije pri kome dioda počinje da primetno provodi struju (1% nominalne vrednosti struje), za Si oko 0.5V
- BV_D napon proboja
- V_D napon provodne diode, kada dioda provodi vodi nominalnu struju (Ge 0.3V, Si 0.7V, GaAs 1.5V)
- Osnovne karakteristike diode
 - V_D , I_{Dnom} , I_{Dmax} , BV_D , I_S



Diode

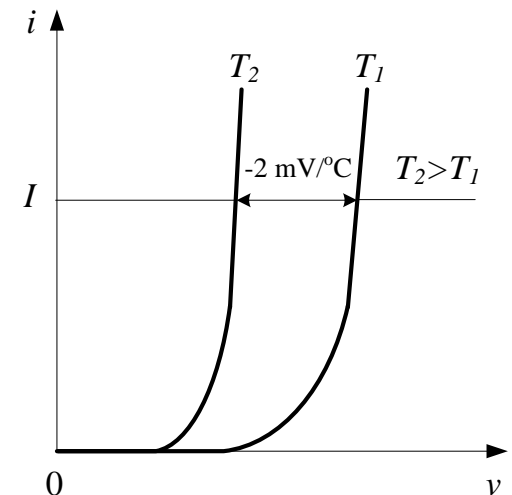
– Temperaturne karakteristike diode

$$i = I_S \left(e^{v/\eta V_T} - 1 \right)$$

– I_S i V_T zavise od temperature, za $\Delta T = 10^\circ\text{C}$, I_S se udvostručuje

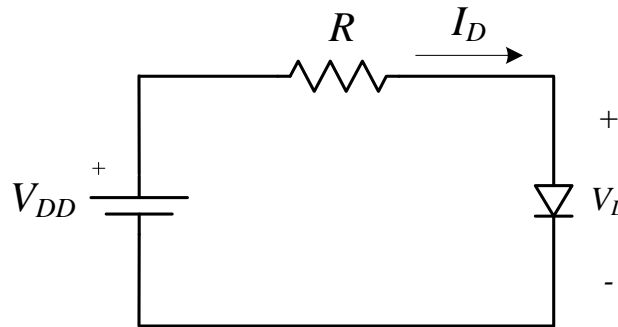
– zato napon provodne diode V_D takođe zavisi od temperature

- kako temperatura raste, V_D opada



Diode

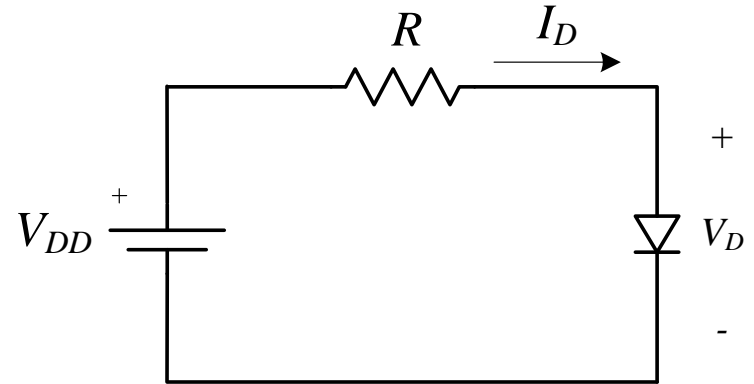
– Analiza diodnog kola



– Direktna polarizacija, $V_{DD} \gg V_{DT}$

$$- i_D = I_S e^{v_D/V_T}, (\eta = 1)$$

Diode



– Analitičko rešavanje kola

$$- i_D = \frac{V_{DD} - v_D}{R} = -\frac{1}{R} v_D + \frac{V_{DD}}{R}$$

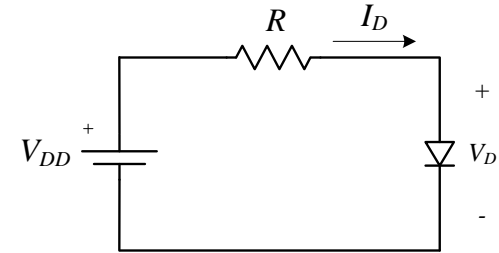
$$-\frac{1}{R} v_D + \frac{V_{DD}}{R} = I_S e^{v_D/V_T}$$

– Transcedentna jednačina!

- Moguće rešiti je iterativno, In obe strane jednačine, dobija se

$$v_{D(n+1)} = V_T \ln(av_{D(n)} + b), v_{D0} = 0.6V \rightarrow v_{D1} \text{ itd}$$

Diode

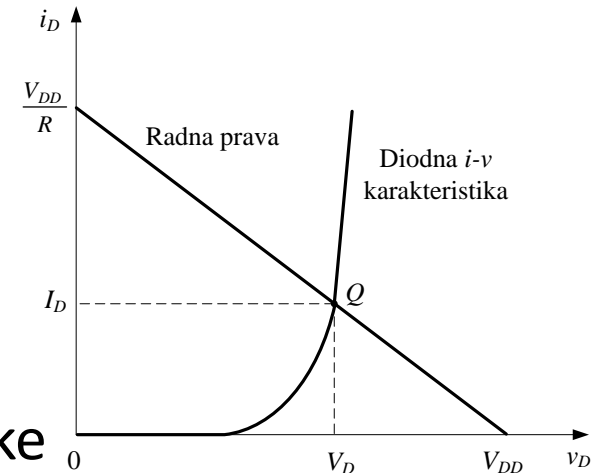


– Grafičko rešavanje kola

- Prava: $i_D = \frac{V_{DD} - v_D}{R} = -\frac{1}{R}v_D + \frac{V_{DD}}{R}$
- Eksponencijalna funkcija: $i_D = I_S e^{v_D/V_T}$

- Ovaj metod lep za ilustraciju, ali nepraktičan, posebno za složena kola.

- Zaključak je da je potrebno koristiti **uprošćene modele** str-nap karakteristike kako bi mogli da rešavamo elektronska kola



Modeli statičke strujno-naponske karakteristike diode

– Model idealne diode

- Smatra se da je $V_D = 0$
- Kada je inverzna polarizacija

$$\begin{array}{c} \xrightarrow{i} \text{A} \quad \text{K} \\ \text{+} \quad v \quad \text{-} \\ v < 0, i = 0 \end{array}$$

- Kada je direktna polarizacija

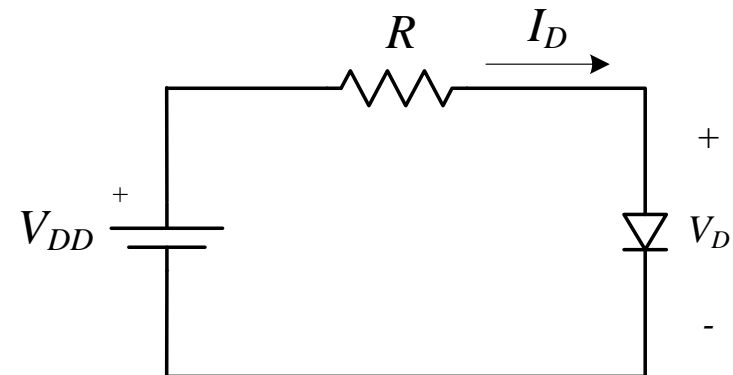
$$\begin{array}{c} \xrightarrow{i} \text{A} \quad \text{K} \\ \text{+} \quad v \quad \text{-} \\ v = 0, i > 0 \end{array}$$



Modeli statičke strujno-naponske karakteristike diode

– Model idealne diode

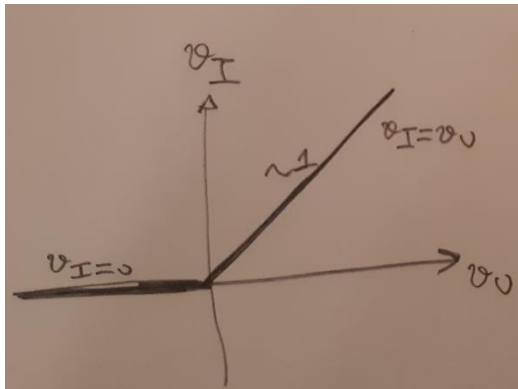
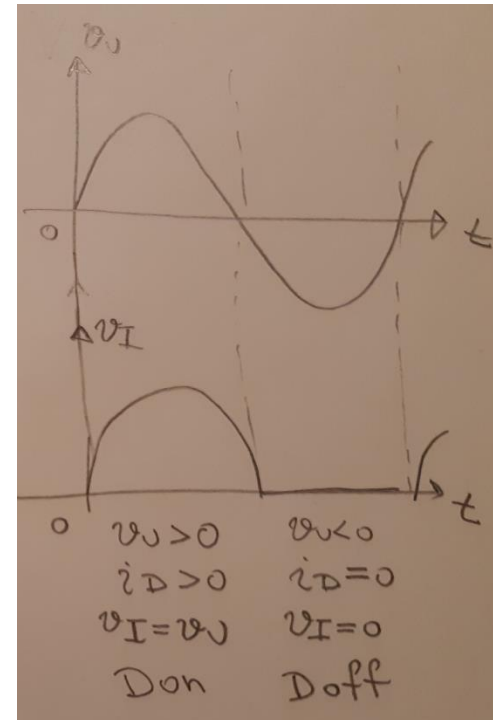
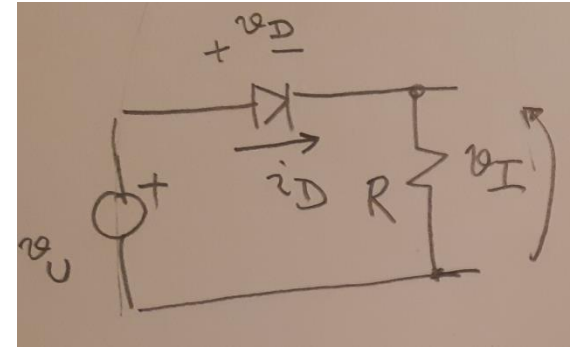
- Primer 1, kolo od pre
 - Dioda direktno polarisana, $V_{DD} \gg V_{DT}(=0)$
 - $i_D = \frac{V_{DD} - v_D}{R} = \frac{V_{DD}}{R}$
- Šta ako se dioda obrne?
 - Biće inverzno polarisana, struja je nula, $v_D = -V_{DD}$



Modeli statičke strujno-naponske karakteristike diode

– Model idealne diode

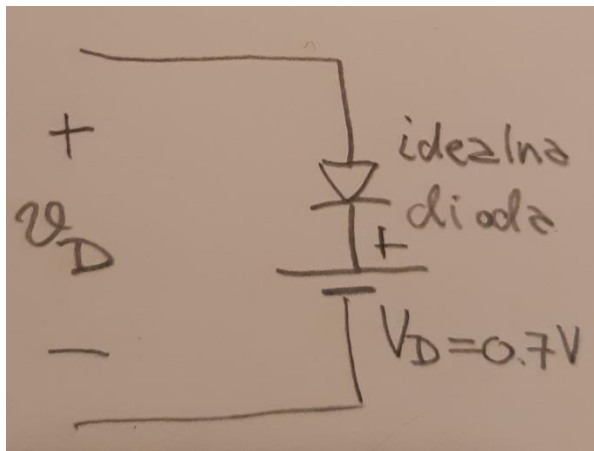
- Primer 2, usmeravanje napona
 - Kada $v_U < 0$ inverzna polarizacija, $i_D = 0, v_I = 0$
 - Kada $v_U > 0$ direktna polarizacija, $v_D = 0, v_I = v_U$
- Prenosna karakteristika kola $v_I = f(v_U)$



Modeli statičke strujno-naponske karakteristike diode

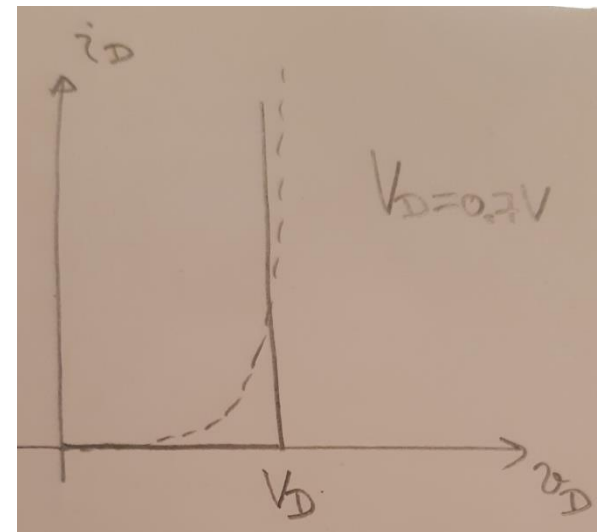
– Model idealne diode sa konstantnim naponom

- Greška svega $\pm 0.1V$ pri promeni struje 10 puta
- Ekvivalentno kolo



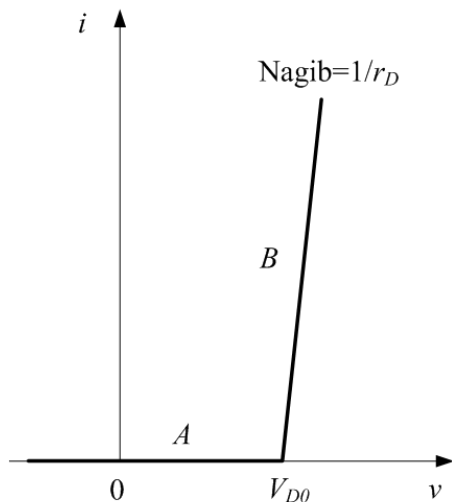
$$v_D < V_D, i_D = 0$$

$$i_D > 0, v_D = V_D$$

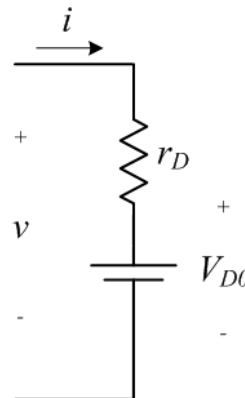


Modeli statičke strujno-naponske karakteristike diode

– Izlomljeno linearni model diode



- Ekvivalentno kolo
 - Za $r_D = 0$ svodi se na model sa konstantnim naponom.



$$v_D > V_{D0}:$$

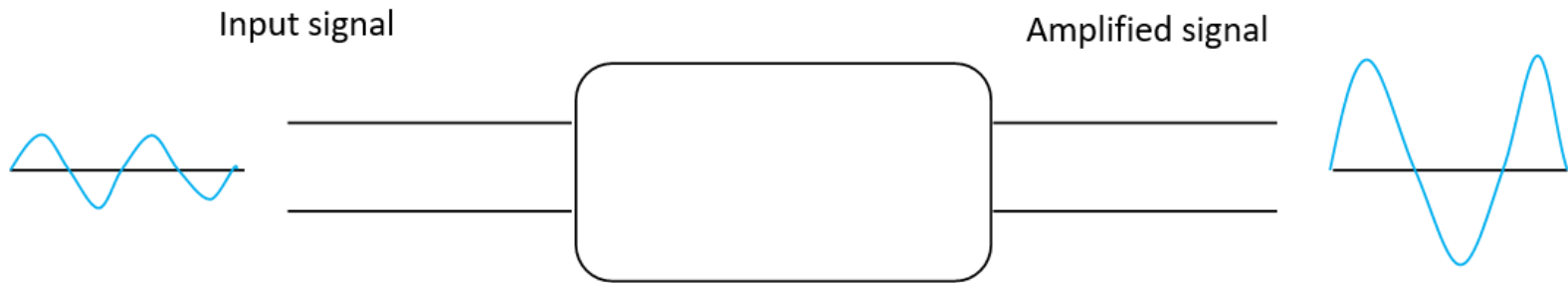
$$\frac{\Delta i_D}{\Delta v_D} = \frac{1}{r_D}$$

$$\frac{i_D - 0}{v_D - V_{D0}} = \frac{1}{r_D}$$

$$v_D = r_D i_D + V_{D0}$$

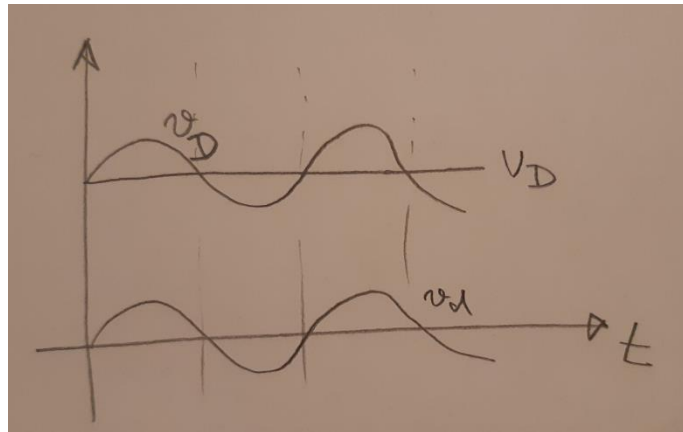
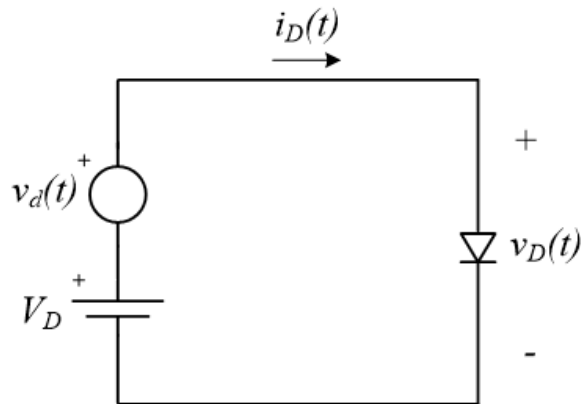
$$i_D = \frac{1}{r_D} v_D - \frac{V_{D0}}{r_D}$$

Mali (naizmenični signali)



Mali (naizmenični signali)

- Statička karakteristika važi uvek ali često nas ne interesuju srednje vrednosti napona i struja, već samo njihove naizmenične komponente.



- Dioda direktno polarisana sa V_D
 - Na napon polarizacije se dodaje (superponira) mali promenljivi signal v_d

Model diode za male signale

- Trenutna vrednost ukupnog napona na diodi

$$v_D(t) = V_D + v_d(t)$$

- Trenutna vrednost struje koja teče kroz diodu

$$i_D(t) = I_S e^{\frac{v_D(t)}{\eta V_T}} = I_S e^{\frac{V_D + v_d(t)}{\eta V_T}} = I_S e^{\frac{V_D}{\eta V_T}} e^{\frac{v_d(t)}{\eta V_T}}$$

Ovde ne može superpozicija, jer je kolo nelinearno

$$i_D(t) = I_D e^{\frac{v_d(t)}{\eta V_T}} \approx I_D \left(1 + \frac{v_d(t)}{\eta V_T} \right) = I_D + \frac{v_d(t)}{\frac{\eta V_T}{I_D}} = I_D + \frac{v_d(t)}{r_d}$$

$$= I_D + i_d(t)$$

- Izvršili smo linearizaciju Taylorovim redom, $e^{\frac{v_d(t)}{\eta V_T}} \approx 1 + \frac{v_d(t)}{\eta V_T}$, ako je $v_d(t)$ malo greška je mala – zato naglašavamo da ovo važi za **MALE** signale

Model diode za male signale

$$i_D(t) = I_D e^{\frac{v_d(t)}{\eta V_T}} \approx I_D \left(1 + \frac{v_d(t)}{\eta V_T} \right) = I_D + \frac{v_d(t)}{\frac{\eta V_T}{I_D}} = I_D + \frac{v_d(t)}{r_d}$$

$$= I_D + i_d(t)$$

– Kada je kolo linearizovano, važi superpozicija

- I_D je jednosmerna struja koja zavisi samo od jednosmernog napona polarizacije V_D
- Promenljivi deo struje zavisi linearno od promenljivog malog napona, ali **koeficijent linearnosti zavisi od jednosmerne struje kroz diodu I_D**
- $r_d = \frac{\eta V_T}{I_D}$, otpornost diode za male signale (dinamička otpornost), za datu radnu tačku (vrednost struje I_D)

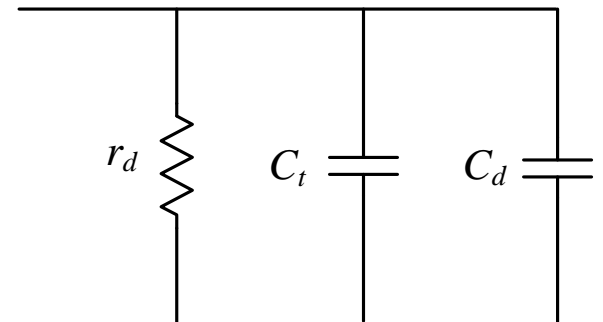
Model diode za male signale

- do r_d može da se dođe i preko prvog izvoda statičke i-u karakteristike diode (nagiba tangente)

$$r_d = \frac{1}{\left. \frac{di_D}{dv_D} \right|_Q} = \frac{1}{I_S e^{\frac{v_D(t)}{\eta V_T}} \left. \frac{1}{\eta V_T} \right|_Q} = \frac{\eta V_T}{I_D}$$

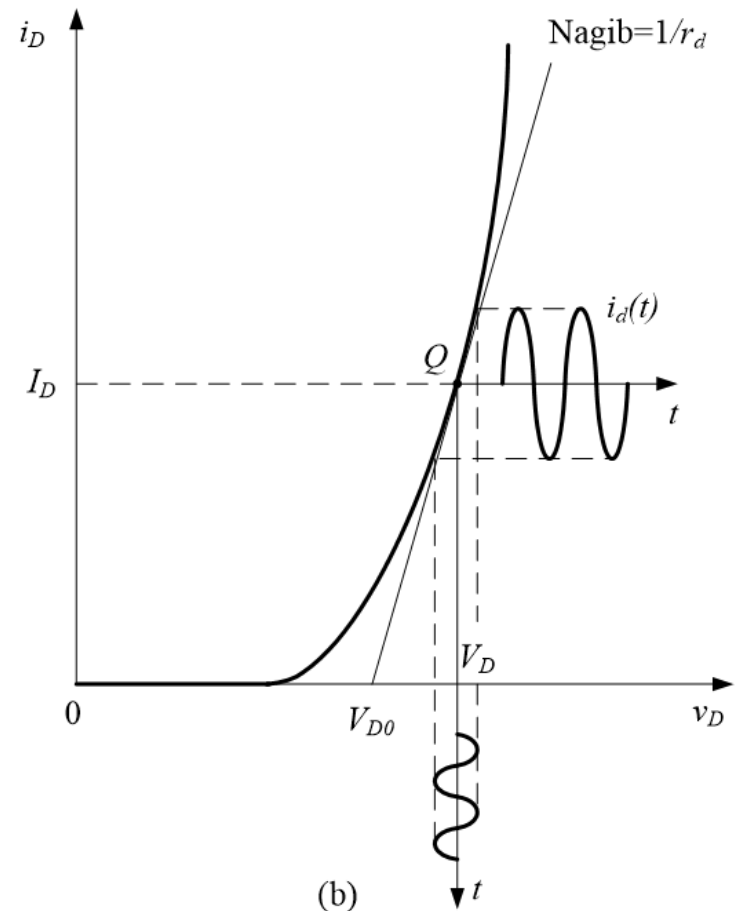
- Konačno, model diode za male signale

- Nećemo u obzir uzimati kondenzatore



Model diode za male signale

- Q (mirna radna tačka) označava vrednosti napona i struje kada nema malog signala, V_D i I_D .
- U okolini Q, ako je promenljiv signal dovoljno mali, možemo k-ku posmatrati kao linearnu, to jest koristiti njenu tangentu, koja ima nagib $\frac{1}{r_d}$ (to olakšava analizu)
 - Tada može superpozicija, $i_D = I_D + i_d$



Model diode za male signale

- Ako se promeni Q , odnosno konstantna struja kroz diodu, onda se koristi tangenta u novom Q (r_d zavisi od I_D)
- Nije prava superpozicija, jer dinamička otpornost kada se računa sa malim signalom zavisi od konstantnog signala

