

(a) Strujno-naponska karakteristika diode sa inverznim probojem

(b) Arpoksimacija linearnim segmentima sa odgovarajućim modelom

Нелинеарни модел:

$$i_D = I_s \cdot \left(e^{\frac{v_D}{nV_T}} - 1 \right)$$

$$v_D = nV_T \ln \left(\frac{i_D}{I_s} + 1 \right)$$

Линеаризовани модел (апроксимација):

- област директног провођења: **D - ON**

$$i_D = I_{AK} > 0$$

$$v_D = V_{AK} \geq V_{D0}$$
- непроводна област: **D - OFF**

$$i_D = 0$$

$$-V_{z0} < V_{AK} < V_{D0}$$
- инверзни режим:

$$i_D \approx -I_s \approx 0$$

$$\Rightarrow \text{еквивалентно са случајем 2. (D - OFF)}$$
- Режим пробоја: **D - BD**

Посматрамо напон и струју у инверзном смеру!

$$i_D = I_{KA} > 0 \quad (I_{AK} < 0)$$

$$v_D = V_{KA} \geq V_{z0} \quad (V_{AK} < -V_{z0})$$

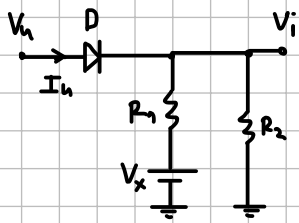
V_{D0} — "напон прага провођења"
 $V_{D0} \in [0.6V, 0.7V]$

V_{BD} — "пробојни напон" (BD- BreakDown)
 $V_{BD} \in (-50V, -400V)$
 $V_{z0} \ll |V_{BD}|$ (23V, 5.1V, ...)

I_s — "инверзна струја засићења"
 $I_s \sim 10^{-14}A \approx 0A$

за Зенерову диоду: $\begin{cases} V_{z0} = -V_{BD} \\ r_z = r_{bd} \end{cases}$

ПР. 1.



$$V_{D0} = 0.6 \text{ V}$$

$$r_d = 50 \Omega$$

$$-5 \text{ V} \leq V_u \leq 5 \text{ V}$$

$$R_1 = 1 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 2 \text{ k}\Omega$$

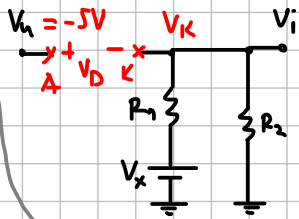
$$V_x = 3 \text{ V}$$

$$a) V_i(V_u) = ?$$

$$b) I_u(V_u) = ?$$

1. У ком режиму се диода налази на почетку?
2. При ком улазном напону диода мења свој режим?

Претпоставка: $V_u = -5 \text{ V} \Rightarrow D - \text{OFF}$



$$V_K = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_x = 2 \text{ V}$$

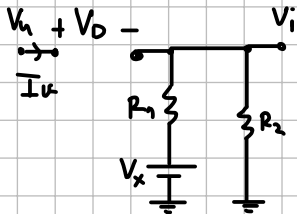
$$V_A = V_u = -5 \text{ V}$$

$$\Rightarrow V_D = V_{AK} = V_A - V_K = -7 \text{ V} \ll V_{D0}$$

$\Rightarrow D - \text{OFF}$ ✓

Пошто је $-7 \text{ V} \ll 0.6 \text{ V}$, диода на почетку заиста не води и полазна претпоставка је тачна.

1° $D - \text{OFF}$ за $-5 \text{ V} \leq V_u \leq V_p = ?$ V_p - улазни напон при ком диода прелази у проводни режим



$$V_i = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_x = 2 \text{ V}$$

$$I_u = 0$$

Са порастом улазног напона од -5 V па навише, мења се и напон на диоди, па диода евентуално прелази у проводно стање:

$$V_D < V_{D0} \Rightarrow V_D = V_u - V_i$$

$$V_u = V_p \Rightarrow V_D = V_{D0}$$

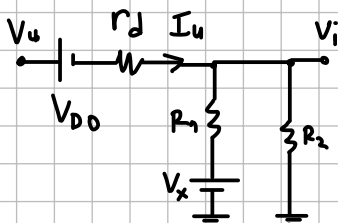
$$V_p - V_i = V_{D0}$$

$$V_p = V_i + V_{D0} = 2.6 \text{ V} \uparrow$$

Диода остаје непрводна све док улазни напон не достигне вредност од 2.6 V

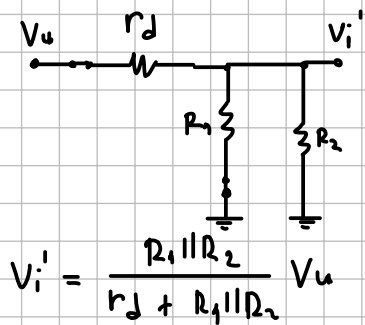
$$\Rightarrow D - \text{OFF} : -5 \text{ V} \leq V_u \leq 2.6 \text{ V}$$

$$2^\circ D - \text{ON} \text{ за } 2.6 \text{ V} \leq V_u \leq 5 \text{ V}$$

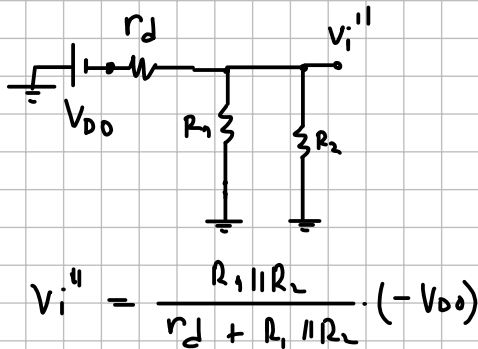


Суперпозиција:

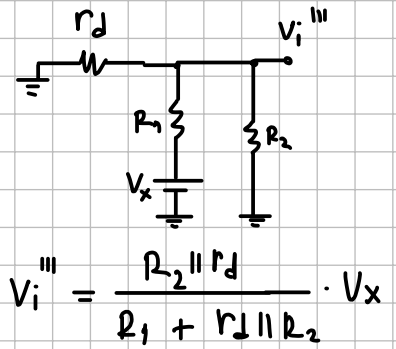
I $V_u \neq 0, V_{D0} = V_x = 0$
 $V_i = V_i^I$



II $V_{D0} \neq 0, V_u = V_x = 0$
 $V_i = V_i^{II}$



III $V_x \neq 0, V_u = V_{D0} = 0$
 $V_i = V_i^{III}$



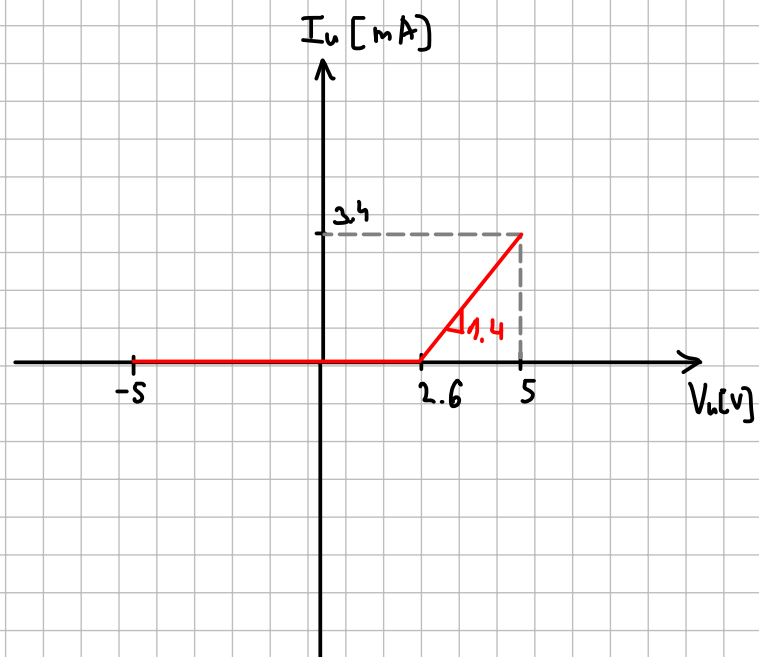
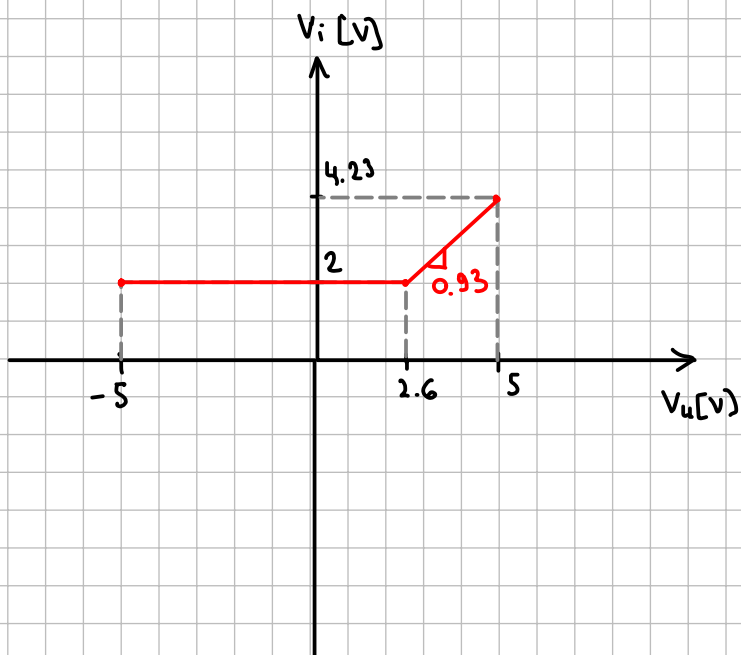
$$V_i = V_i^I + V_i^{II} + V_i^{III} = \frac{R_1 \parallel R_2}{r_d + R_1 \parallel R_2} (V_u - V_{D0}) + \frac{R_2 \parallel r_d}{R_1 + r_d \parallel R_2} \cdot V_x$$

$$V_i \approx 0.93 V_u - 0.42 V$$

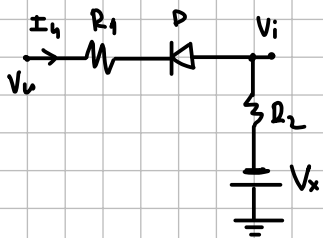
$$I_u = \frac{V_u - V_{D0} - V_i}{r_d} \approx 1.4 \text{ mA} \cdot V_u - 3.6 \text{ mA}$$

$$V_i = \begin{cases} 2 \text{ V}, & -5 \text{ V} \leq V_u < 2.6 \text{ V} \\ 0.93 \cdot V_u - 0.42 \text{ V}, & 2.6 \text{ V} \leq V_u \leq 5 \text{ V} \end{cases}$$

$$I_u = \begin{cases} 0 \text{ A}, & -5 \text{ V} \leq V_u \leq 2.6 \text{ V} \\ 1.4 \text{ mA} \cdot V_u - 3.6 \text{ mA}, & 2.6 \text{ V} \leq V_u \leq 5 \text{ V} \end{cases}$$



Пр. 2. (за домаћи)



$$V_{D0} = 0.6V$$

$$r_D = 0\Omega$$

$$R_1 = 1k\Omega$$

$$R_2 = 2k\Omega$$

$$V_x = 3V$$

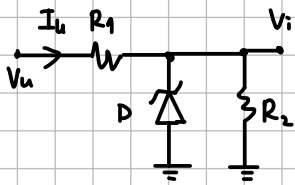
$$-5V \leq V_u \leq 5V$$

$$a) V_i(V_u) = ?$$

$$b) I_u(V_u) = ?$$

пр. 3.

$$-20V \leq V_u \leq 20V$$



$$V_{D0} = 0.7V \quad R_1 = 5k\Omega$$

$$r_d = 50\Omega \quad R_2 = 1k\Omega$$

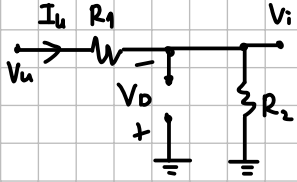
$$V_{Z0} = 2.7V$$

$$r_z = 20\Omega$$

a) $V_i(V_u) = ?$

б) $I_u(V_u) = ?$

пр. $V_u = -20V$, D - OFF

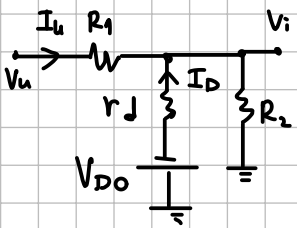


$$V_D = - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_u \Big|_{V_u = -20V} = - \frac{1}{6} (-20)V = \frac{20}{6} V \gg 0.7V$$

\Rightarrow D - ON

Зенер диода директно проводи на почетку, пошто је добијени напон већи од 0.7V

1° D - ON $-20V \leq V_u \leq V_{P1} = ?$



суперпозицијом се добија:

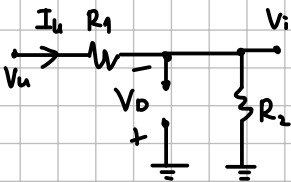
$$V_i = \frac{R_2 \parallel r_d}{R_1 + R_2 \parallel r_d} \cdot V_u + \frac{R_1 \parallel R_2}{r_d + R_1 \parallel R_2} \cdot (-V_{D0})$$

$$V_i = 0.009 V_u - 0.66V$$

$$V_{P1} = -3.6V$$

$$I_D > 0 \Rightarrow I_D = \frac{-V_{D0} - V_i}{r_d} = \frac{-V_{D0} - 0.009 V_u + 0.66V}{r_d} > 0 \Rightarrow \underline{\underline{V_u < -3.6V}}$$

2° D - OFF $-3.6V \leq V_u \leq V_{P2} = ?$



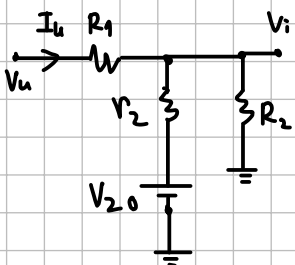
$$V_i = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_u = \frac{1}{6} V_u$$

$$V_D = -V_i = -\frac{1}{6} V_u$$

$\Rightarrow V_u \uparrow \Rightarrow V_D \downarrow \Rightarrow V_D = -V_{Z0} \Rightarrow$ прелазак у режим пробоја
($V_u = V_{P2}$)

$$V_D = -\frac{1}{6} V_{P2} = -V_{Z0} \Rightarrow \underline{\underline{V_{P2} = 6 \cdot V_{Z0} = 16.2V}}$$

3. D - BD : $16.2V \leq V_u \leq 20V$

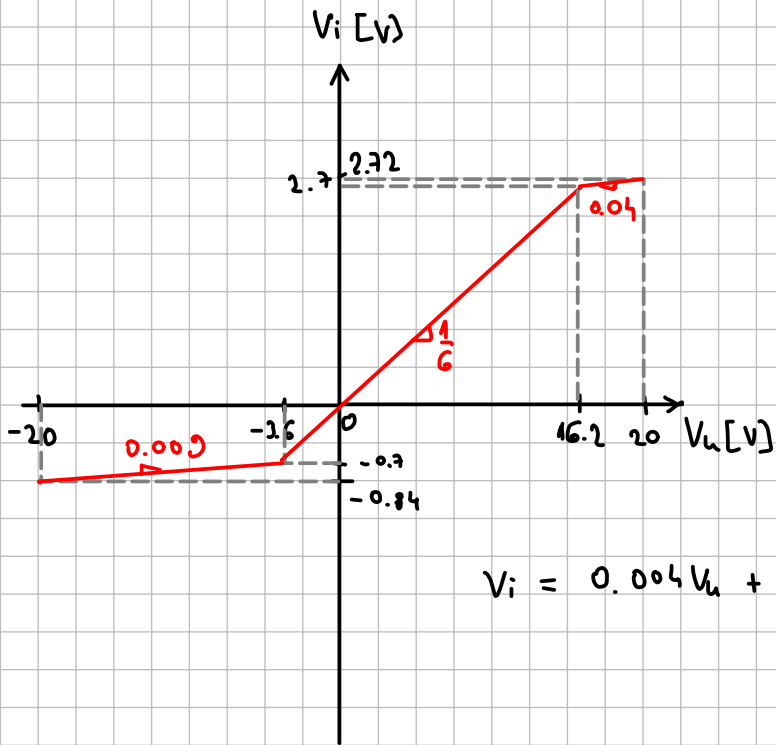


$$V_i = \frac{R_2 \parallel r_z}{R_1 + R_2 \parallel r_z} \cdot V_u + \frac{R_1 \parallel R_2}{r_z + R_1 \parallel R_2} \cdot V_{Z0}$$

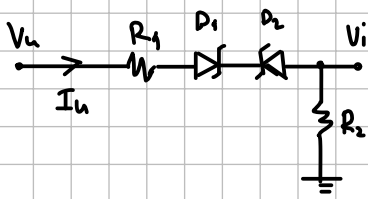
$$V_i = 0.004 V_u + 2.64V$$

$$V_i = \begin{cases} V_i = 0.009 V_u - 0.66V & , \quad -20V \leq V_u < -3.6V \\ \frac{1}{6} V_u & , \quad -3.6V \leq V_u < 16.2V \\ V_i = 0.004 V_u + 2.64V & , \quad 16.2V \leq V_u < 20V \end{cases}$$

δ) $I_u = \frac{V_u - V_i}{R_1} = \dots$ (довршити за домаћи)



ПР. 4. (за домаћи, погледати пример 2.4 у приручнику)



$$V_{D_{o1}} = V_{D_{o2}} = 0.6V$$

$$V_{z_{o1}} = 3.3V$$

$$V_{z_{o2}} = 5.1V$$

$$r_{z1} = r_{z2} = r_{d1} = r_{d2} = 0\Omega$$

$$-10V \leq V_u \leq 10V$$

$$a) v_i(V_u) = ?$$

$$b) \underline{I_u(V_u) = ?}$$