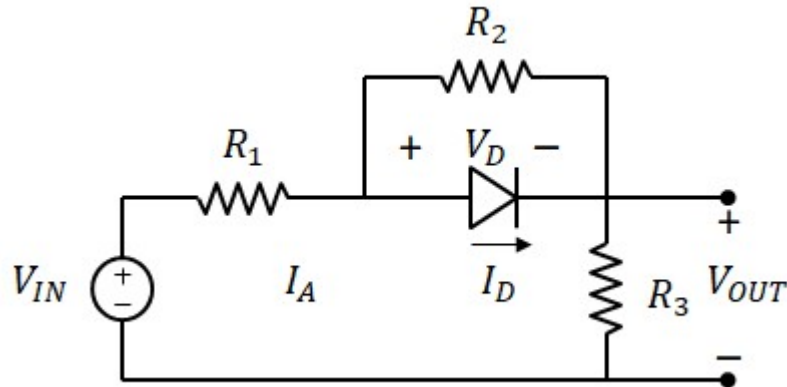


Diodo

Esercizio 1

DATI: $R_1 = 1\text{k}\Omega$, $R_2 = 2\text{k}\Omega$, $R_3 = 1\text{k}\Omega$, $V_{ON} = 0\text{V}$



1) Calcolare la tensione di uscita e la polarizzazione del diodo con $V_{IN} = 4\text{V}$

Supponiamo il diodo OFF $I_D = 0$ $V_{OUT} = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot V_{IN} = 1\text{V}$

Verifica della polarizzazione del diodo $V_D = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot V_{IN} = 2\text{V}$ Positiva. Quindi il diodo non è OFF

Supponiamo il diodo ON $V_D = V_{ON} = 0$ $V_{OUT} = \frac{R_3}{R_1 + R_3} \cdot V_{IN} = 2\text{V}$

Verifica della polarizzazione del diodo $I_D = \frac{V_{IN}}{R_1 + R_3} = 2\text{mA}$ Positiva. Quindi il diodo è ON

Diodo ON con $I_D = 2\text{mA}$; $V_{OUT} = 2\text{V}$

2) Calcolare la tensione di uscita e la polarizzazione del diodo con $V_{IN} = -4\text{V}$

Supponiamo il diodo OFF $I_D = 0$ $V_{OUT} = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot V_{IN} = -1\text{V}$

Verifica della polarizzazione del diodo $V_D = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot V_{IN} = -2\text{V}$ Negativa. Quindi il diodo è OFF

Diodo OFF con $V_D = -2\text{V}$; $V_{OUT} = -1\text{V}$

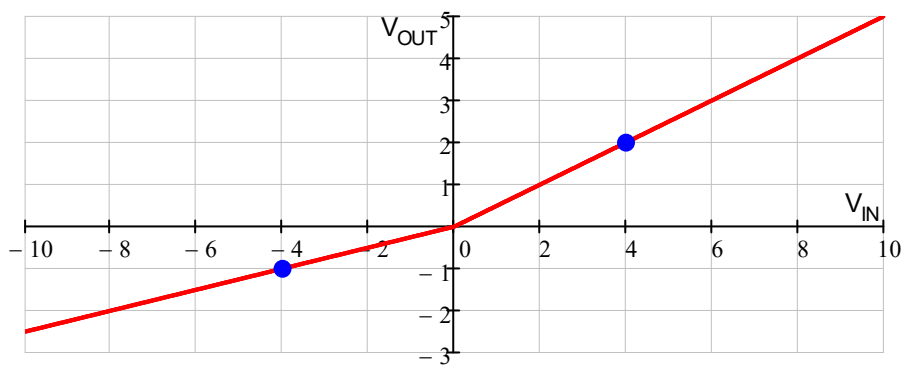
3) Tracciare la transcaratteristica $V_{OUT} = f(V_{IN})$.

Supponiamo il diodo OFF $I_D = 0$ $V_{OUT} = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot V_{IN}$

Verifica della polarizzazione del diodo $V_D = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot V_{IN}$ Negativa se $V_{IN} < 0$

Supponiamo il diodo ON $V_D = V_{ON} = 0$ $V_{OUT} = \frac{R_3}{R_1 + R_3} \cdot V_{IN}$

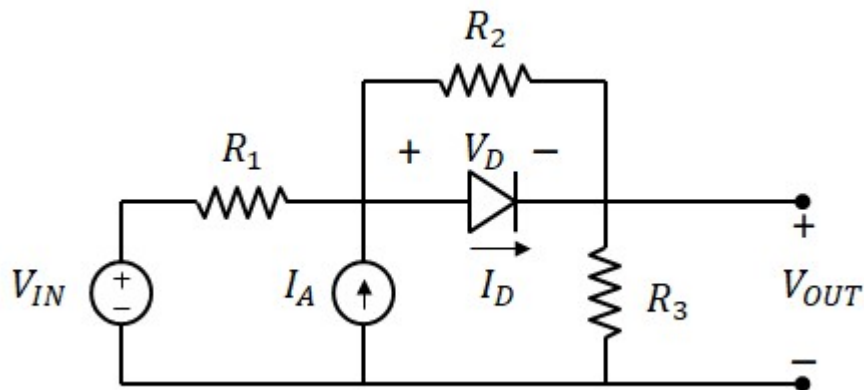
Verifica della polarizzazione del diodo $I_D = \frac{V_{IN}}{R_1 + R_3}$ Positiva se $V_{IN} > 0$



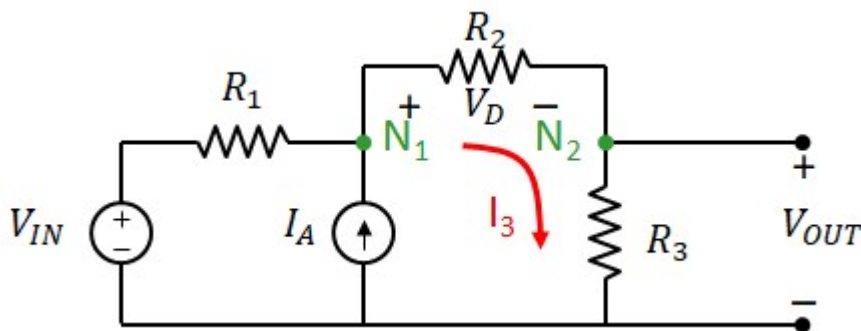
Nella transcaratteristica sono evidenziati anche i due punti di polarizzazione del diodo calcolati precedentemente

Esercizio 2

DATI: $R_1 = 1\text{k}\Omega$, $R_2 = 2\text{k}\Omega$, $R_3 = 3\text{k}\Omega$, $I_A = 10\text{mA}$, $V_{ON} = 0\text{V}$



1) Calcolare la tensione di uscita e la polarizzazione del diodo con $V_{IN} = 4\text{V}$



Usiamo la sovrapposizione degli effetti:

Solo V_{IN} ($I_A = 0$): partitore di tensione

$$V_{OUT1} = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot V_{IN} = 2\text{V} \quad V_{D1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot V_{IN} = 1.3\text{V}$$

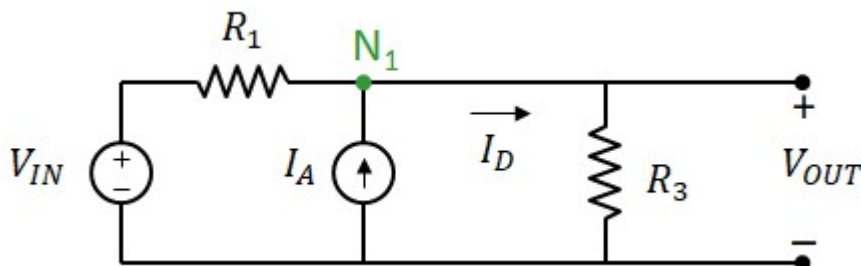
Solo I_A ($V_{IN} = 0$): R_1 e R_3 sono in parallelo

$$V_{OUT2} = \frac{(R_3 + R_2) \cdot R_1}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot I_A = 8.3\text{V} \quad V_{D2} = \frac{R_2}{R_2 + R_3} \cdot V_{OUT2} = 3.3\text{V}$$

$$V_{OUT} = V_{OUT1} + V_{OUT2} = 10.3\text{V}$$

$$V_D = V_{D1} + V_{D2} = 4.667\text{V} \quad \text{positiva, ipotesi non verificata}$$

Supponiamo il diodo ON $V_D = V_{ON} = 0$



Usiamo la sovrapposizione degli effetti:

Solo V_{IN} ($I_A = 0$): partitore di tensione
$$V_{OUT1} = \frac{R_3}{R_1 + R_3} \cdot V_{IN} = 3 \text{ V}$$

Solo I_A ($V_{IN} = 0$): R_1 e R_3 sono in parallelo
$$V_{OUT2} = \frac{R_3 \cdot R_1}{R_1 + R_3} \cdot I_A = 7.5 \text{ V}$$

$$V_{OUT} = V_{OUT1} + V_{OUT2} = 10.5 \text{ V}$$

$$I_D = \frac{V_{OUT}}{R_3} = 3.5 \cdot \text{mA} \quad \text{positiva, ipotesi verificata}$$

2) Calcolare la tensione di uscita e la polarizzazione del diodo con $V_{IN} = -25 \text{ V}$

Supponiamo il diodo OFF: $I_D = 0$

Solo V_{IN} ($I_A = 0$): partitore di tensione
$$V_{OUT1} = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot V_{IN} = -12.5 \text{ V}$$

$$V_{D1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot V_{IN} = -8.3 \text{ V}$$

Solo I_A ($V_{IN} = 0$): R_1 e R_3 sono in parallelo
$$V_{OUT2} = \frac{R_3 \cdot R_1}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot I_A = 5 \text{ V}$$

$$V_{D2} = \frac{R_2 \cdot R_1}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot I_A = 3.3 \text{ V}$$

$$V_{OUT} = V_{OUT1} + V_{OUT2} = -7.5 \text{ V}$$

$$V_D = V_{D1} + V_{D2} = -5 \text{ V} \quad \text{negativa ipotesi verificata}$$

3) Tracciare la transcaratteristica $V_{OUT} = f(V_{IN})$.

Supponiamo il diodo ON $V_D = 0$

Sovrapposizione degli effetti:

Solo V_{IN} ($I_A = 0$): partitore di tensione
$$V_{OUT} = V_{IN} \cdot \frac{R_3}{R_1 + R_3}$$

Solo I_A ($V_{IN} = 0$): R_1 e R_3 sono in parallelo
$$R_P = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3} = 750 \Omega$$

legge di ohm su R_3 :
$$V_{OUT} = I_A \cdot R_P = 7.5 \text{ V}$$

Somma degli effetti:
$$V_{OUT}(V_{IN}) = V_{IN} \cdot \frac{R_3}{R_1 + R_3} + I_A \cdot R_P \quad \text{retta con pendenza: } \frac{R_3}{R_1 + R_3} = \frac{3}{4}$$

Verifica della validità:

Diodo acceso: è necessario verificare $I_D > 0$

$$I_D = \frac{V_{OUT}}{R_3} > 0 \quad \text{vera solo se} \quad V_{OUT} > 0 \quad V_{IN} > -I_A \cdot R_1 = -10 \text{ V}$$

Supponiamo il diodo OFF $I_D = 0$

Sovrapposizione degli effetti:

Solo V_{IN} ($I_A = 0$): partitore di tensione

$$V_{OUT} = V_{IN} \cdot \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$

$$V_D = V_{IN} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3}$$

Solo I_A ($V_{IN} = 0$): R_2 e R_3 sono in serie

$$R_S = R_2 + R_3 = 5 \cdot k\Omega$$

Partitore di corrente:

$$I_3 = I_A \cdot \frac{R_1}{R_S + R_1} = 1.67 \cdot mA$$

Legge di ohm su R_3 :

$$V_{OUT} = I_3 \cdot R_3$$

$$V_{OUT} = I_A \cdot \frac{R_1 \cdot R_3}{R_S + R_1} = 5 \text{ V}$$

$$V_D = I_A \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_S + R_1} = 3.33 \text{ V}$$

Somma degli effetti:

$$V_{OUT}(V_{IN}) = V_{IN} \cdot \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} + I_A \cdot \frac{R_1 \cdot R_3}{R_S + R_1}$$

retta con
pendenza: $\frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{1}{2}$

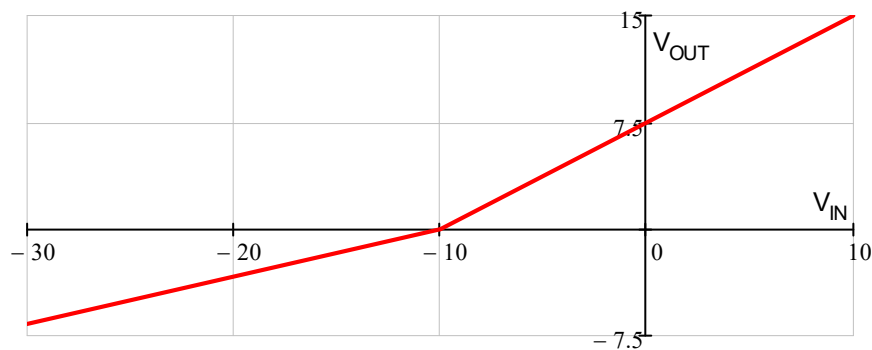
$$V_D = V_{IN} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3} + I_A \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_S + R_1}$$

Verifica della validità:

Diodo spento è necessario verificare $V_D < 0$

$$V_{IN} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3} + I_A \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_S + R_1} < 0$$

$$V_{IN} < -I_A \cdot R_1 = -10 \text{ V}$$



Esercizio 3

DATI: $R_1 = 8k\Omega$, $R_2 = 8k\Omega$, $R_3 = 1k\Omega$, $V_{ON} = 0.5V$

1. Tracciare la transcaratteristica della tensione V_{OUT} in funzione della tensione V_{IN}

Supponiamo il diodo OFF

$$V_{OUT} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{IN}$$

$$V_{D2} = V_{OUT}$$

Affinché l'ipotesi sia valida deve essere:

$$V_{OUT} < V_{ON}$$

$$V_{IN} < V_{ON} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)$$

$$V_{ON} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) = 1V$$

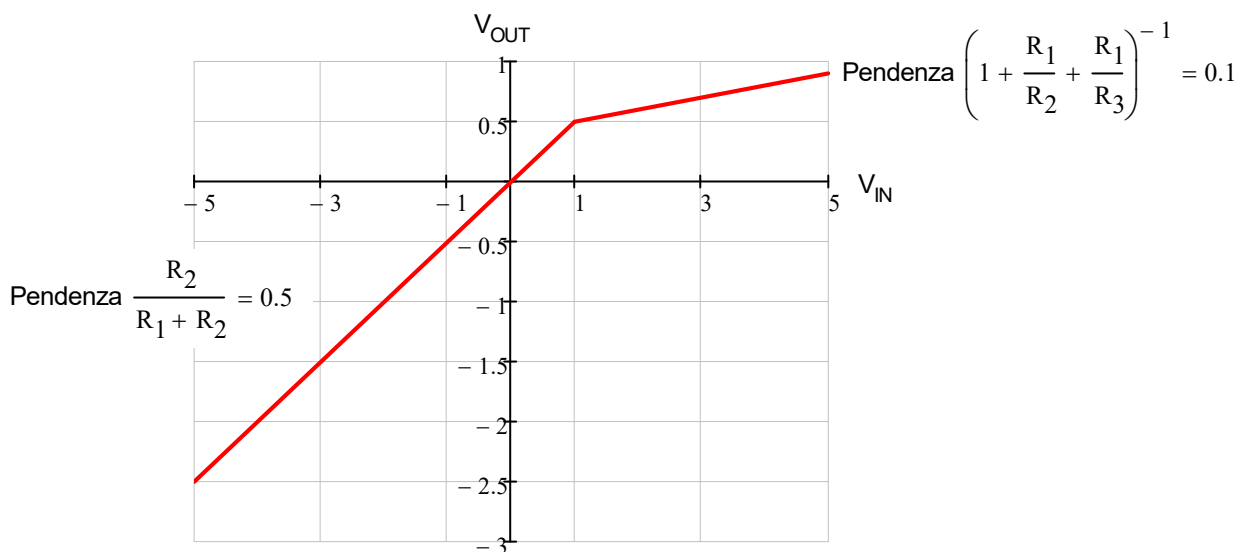
Supponiamo il diodo ON

Legge di Kirchhoff al nodo di uscita:

$$\frac{V_{OUT}}{R_2} = \frac{V_{IN} - V_{OUT}}{R_1} + \frac{V_{ON} - V_{OUT}}{R_3}$$

$$V_{OUT} = \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3}\right)^{-1} \cdot \left(\frac{V_{IN}}{R_1} + \frac{V_{ON}}{R_3}\right)$$

$$V_{IN} > V_{ON} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)$$



2. Calcolare la tensione V_{OUT} corrispondente al punto in cui il diodo cambia regione operativa

$$V_{IN} = V_{ON} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) = 1V$$

$$V_{OUT} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{IN} = 0.5V$$

oppure

$$V_{OUT} = \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3}\right)^{-1} \cdot \left(\frac{V_{IN}}{R_1} + \frac{V_{ON}}{R_3}\right) = 0.5V$$

nel punto di spezzamento sono valide entrambe le relazioni

Esercizio 4DATI: $R_1 = 5k\Omega$, $R_2 = 1k\Omega$, $V_{ON} = 1V$, $V_Z = 5V$ **caso 1: diodo OFF**

$$V_{OUT} = V_{IN} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1}{6} \cdot V_{IN}$$

$$V_D = -V_{IN} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = -\frac{5}{6} \cdot V_{IN}$$

Diodo OFF se $-V_Z < V_D < V_{ON}$

$$-V_{ON} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) < V_{IN} < V_Z \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

$$-V_{ON} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = -1.2V \quad V_Z \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = 6V$$

caso 2: diodo ON

$$V_D = V_{ON} \quad I_1 = \frac{-V_{ON}}{R_1} = -0.2mA$$

$$V_{OUT} = V_{IN} + V_{ON}$$

Diodo ON se $I_D = I_1 - I_2 = \frac{-V_{ON}}{R_1} - \frac{V_{OUT}}{R_2} > 0$

$$\frac{-V_{ON}}{R_1} - \frac{V_{IN} + V_{ON}}{R_2} > 0$$

$$V_{IN} < -V_{ON} \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

caso 3: diodo Zener

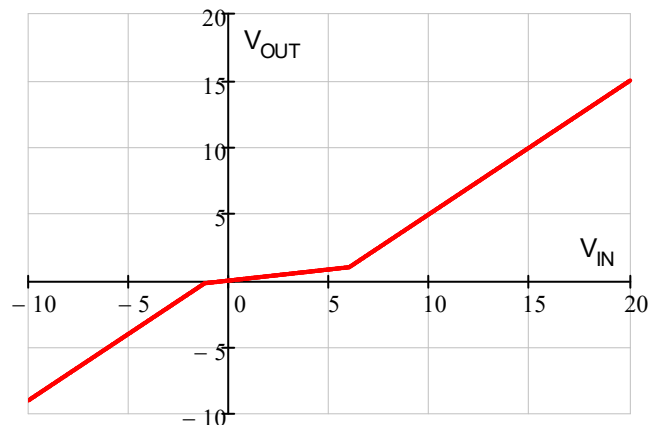
$$V_D = -V_Z = -5V$$

$$V_{OUT} = V_{IN} + V_D = V_{IN} - V_Z$$

Diodo in Zener se $I_D = I_1 - I_2 = \frac{V_Z}{R_1} - \frac{V_{OUT}}{R_2} < 0$

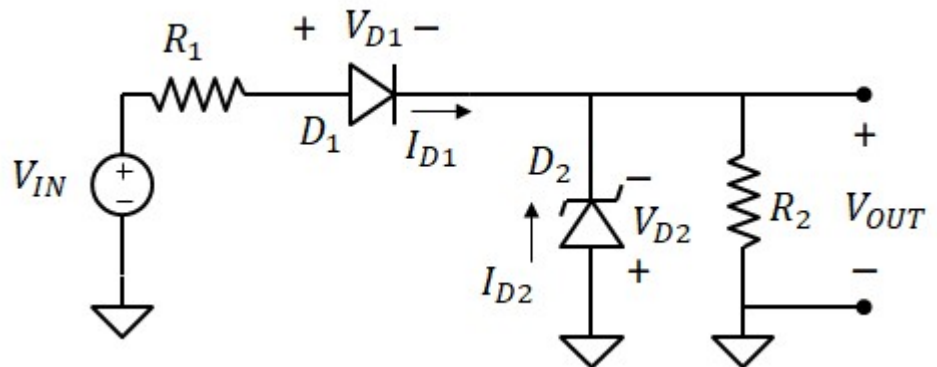
$$\frac{V_Z}{R_1} - \frac{V_{IN} - V_Z}{R_2} < 0$$

$$V_{IN} > \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot V_Z$$



Esercizio 5

DATI: $R_1 = 1\text{k}\Omega$, $R_2 = 3.6\text{k}\Omega$, $V_{ON} = 0.7\text{V}$, $V_Z = 5.4\text{V}$

**1) Tensione V_{OUT} con $V_{IN} = 10\text{V}$**

Ipotesi: D_1 ON, D_2 ZENER

$$V_{IN} - R_1 \cdot I_{D1} - V_{ON} - V_Z = 0$$

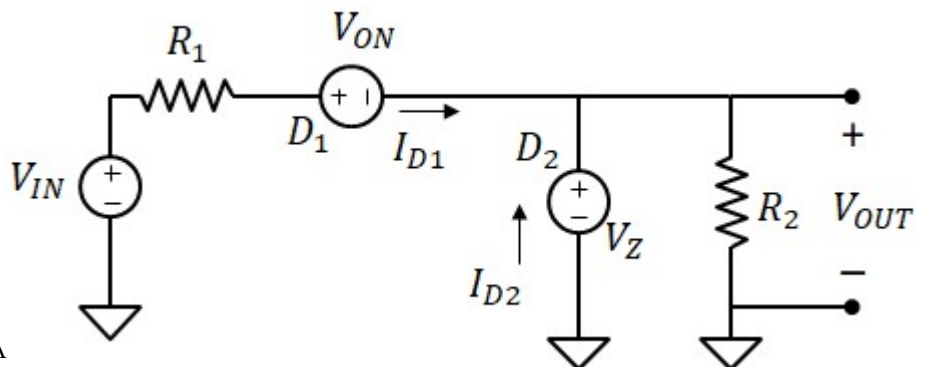
$$I_{D1} = \frac{V_{IN} - V_{ON} - V_Z}{R_1} = 3.9\text{mA}$$

(positiva, quindi D_1 è acceso)

$$V_{OUT} = V_Z = 5.4\text{V}$$

Corrente su R_2 : $I_2 = \frac{V_Z}{R_2} = 1.5\text{mA}$

Corrente su D_2 : $I_{D2} = I_2 - I_{D1} = -2.4\text{mA}$ (negativa, quindi D_2 è in zona zener)

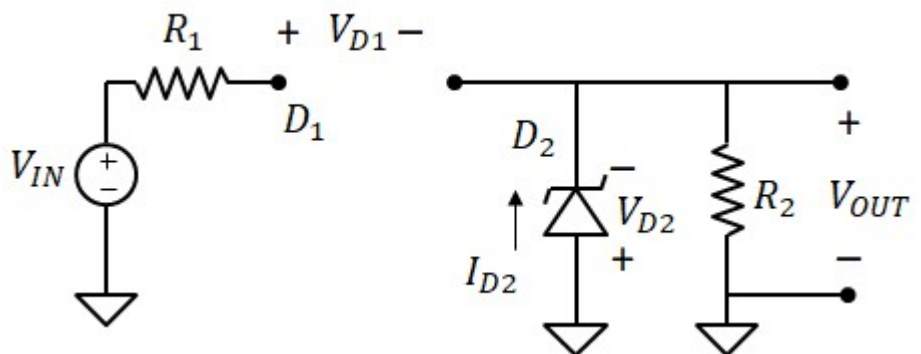
**2) Tensione V_{OUT} con $V_{IN} = -10\text{V}$**

Ipotesi: D_1 OFF, D_2 nessuna ipotesi

$$V_{OUT} = 0$$

$$V_{D1} = V_{IN} - V_{OUT} = -10\text{V}$$

(< V_{ON} , quindi D_1 è spento)

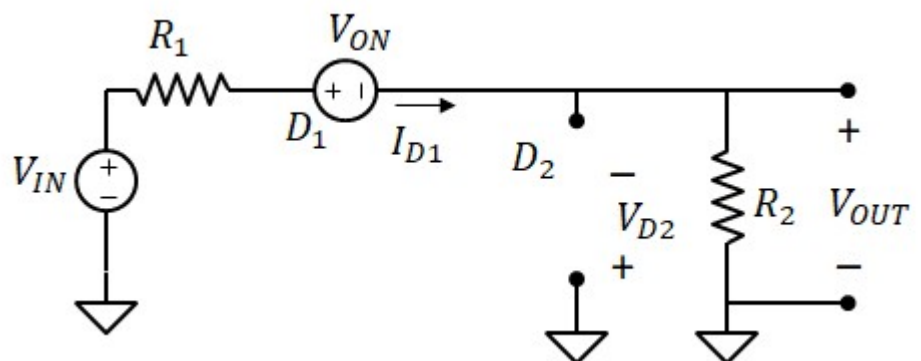
**3) Tensione V_{OUT} con $V_{IN} = 3\text{V}$**

Ipotesi: D_1 ON, D_2 OFF

$$V_{IN} - R_1 \cdot I_{D1} - R_2 \cdot I_{D1} - V_{ON} = 0$$

$$I_{D1} = \frac{V_{IN} - V_{ON}}{R_1 + R_2} = 0.5\text{mA}$$

$$V_{OUT} = I_{D1} \cdot R_2 = 1.8\text{V}$$



$V_{D2} = -V_{OUT} = -1.8\text{V}$ compreso tra: $-V_Z = -5.4\text{V}$ e $V_{ON} = 0.7\text{V}$ D_2 è OFF

4) Tracciare la transcaratteristica

Ci sono $2 \times 3 = 6$ possibili configurazioni per i tre diodi. Cominciamo da quelle già studiate nei punti precedenti.

Ipotesi: D_1 ON, D_2 ZENER

$$I_{D1} = \frac{V_{IN} - V_{ON} - V_Z}{R_1} > 0 \quad V_{IN} > V_{ON} + V_Z \quad V_{ON} + V_Z = 6.1 \text{ V}$$

$$V_{OUT} = V_Z = 5.4 \text{ V}$$

$$I_{D2} = \frac{V_{OUT}}{R_2} - I_{D1} < 0 \quad V_{IN} > \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \cdot V_Z + V_{ON} \quad \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \cdot V_Z + V_{ON} = 7.6 \text{ V}$$

Questa condizione è la più forte

Ipotesi: D_1 OFF

$$V_{OUT} = 0$$

$$V_{D1} = V_{IN} - V_{OUT} < V_{ON} \quad V_{IN} < V_{ON} \quad \text{Questa condizione impone: } V_{D2} = 0 < V_{ON}$$

Ipotesi: D_1 ON, D_2 OFF

$$I_{D1} = \frac{V_{IN} - V_{ON}}{R_1 + R_2} > 0 \quad V_{IN} > V_{ON}$$

$$V_{OUT} = \frac{V_{IN} - V_{ON}}{R_1 + R_2} \cdot R_2 \quad \text{sempre positiva se } V_{IN} > V_{ON}$$

$$V_{D2} = -V_{OUT} < V_{ON} \quad \text{sempre se } V_{IN} > V_{ON}$$

$$V_{D2} = -V_{OUT} > -V_Z \quad V_{IN} < V_{ON} + V_Z \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)$$

$$V_{ON} < V_{IN} < V_{ON} + V_Z \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)$$

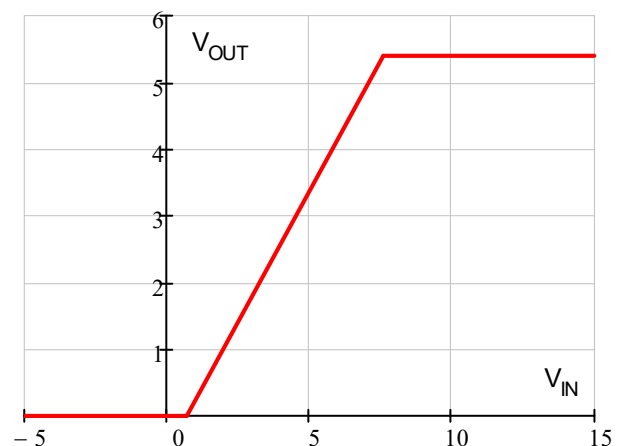
$$V_{IN} < V_{ON}$$

$$V_{OUT} = 0$$

$$V_{ON} < V_{IN} < V_{ON} + V_Z \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \quad V_{OUT} = \frac{V_{IN} - V_{ON}}{R_1 + R_2} \cdot R_2$$

$$V_{IN} > \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \cdot V_Z + V_{ON}$$

$$V_{OUT} = V_Z$$



Esercizio 6DATI: $R = 1k\Omega$, $V_{ON} = 0.5V$ **1) Tracciare la transcaratteristica**caso 1: $D1$ OFF e $D2$ OFF

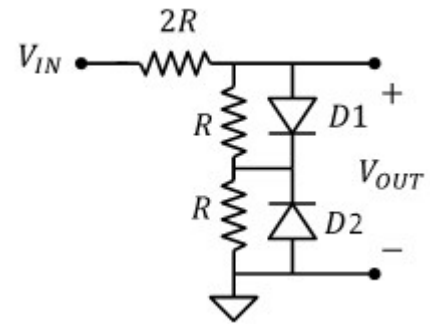
$$V_{OUT} = V_{IN} \cdot \frac{R + R}{2R + R + R} = \frac{V_{IN}}{2}$$

valida se: $v_{d1} = V_{IN} \cdot \frac{R}{4R} < V_{ON} \quad V_{IN} < 4V_{ON}$

$v_{d2} = -V_{IN} \cdot \frac{R}{4R} < V_{ON} \quad V_{IN} > -4V_{ON}$

$$V_{OUT} = \frac{V_{IN}}{2}$$

$$-4V_{ON} < V_{IN} < 4V_{ON}$$

caso 2: $D1$ OFF e $D2$ ON

Legge di kirrkoff alla maglia:

$$V_{IN} = I \cdot 3R - V_{ON} \quad I = \frac{V_{IN} + V_{ON}}{3R}$$

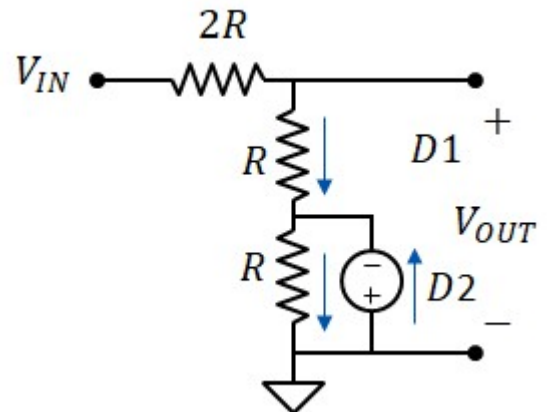
$$V_{OUT} = V_{IN} - 2R \cdot I = V_{IN} - \frac{2}{3}(V_{IN} + V_{ON}) = \frac{V_{IN}}{3} - \frac{2}{3}V_{ON}$$

valida se: $v_{d1} = R \cdot I = \frac{V_{IN} + V_{ON}}{3} < V_{ON} \quad V_{IN} < 2V_{ON}$

$i_{d2} = \frac{-V_{ON}}{R} - I > 0 \quad V_{IN} < -4V_{ON}$

$$V_{OUT} = \frac{V_{IN}}{3} - \frac{2}{3}V_{ON}$$

$$V_{IN} < -4V_{ON}$$

caso 3: $D1$ ON e $D2$ OFF

Legge di kirrkoff alla maglia:

$$V_{IN} = I \cdot 2R + V_{ON} + I \cdot R \quad I = \frac{V_{IN} - V_{ON}}{3R}$$

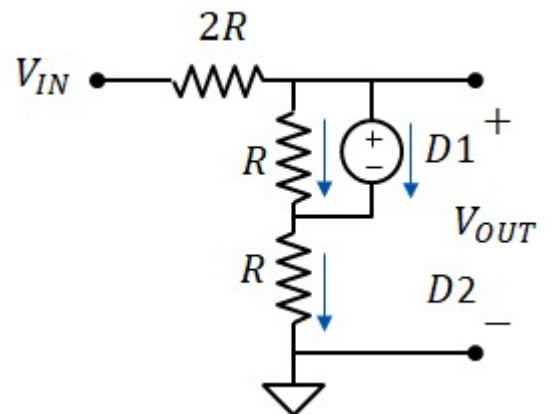
$$V_{OUT} = R \cdot I + V_{ON} = \frac{V_{IN} - V_{ON}}{3R} \cdot R + V_{ON} = \frac{V_{IN}}{3} + \frac{2}{3}V_{ON}$$

valida se: $i_{d1} = I - \frac{V_{ON}}{R} > 0 \quad V_{IN} > 4 \cdot V_{ON}$

$v_{d2} = -R \cdot I = -\frac{V_{IN} - V_{ON}}{3} < V_{ON} \quad V_{IN} > 2V_{ON}$

$$V_{OUT} = \frac{V_{IN}}{3} + \frac{2}{3}V_{ON}$$

$$V_{IN} > 4 \cdot V_{ON}$$



caso 4: D1 ON e D2 ON

$$V_{OUT} = 0$$

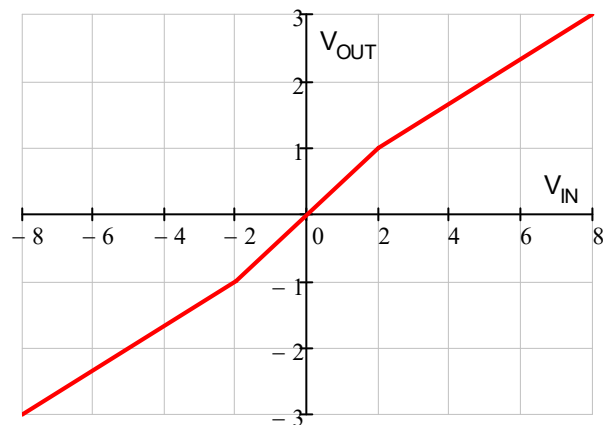
valida se: $i_{d1} > 0$ e $i_{d2} > 0$

$$i_{d1} = \frac{V_{IN}}{2R} - \frac{V_{ON}}{R} > 0 \quad V_{IN} > 2V_{ON}$$

$$i_{d2} = \frac{-V_{ON}}{R} - \frac{V_{IN}}{2R} > 0 \quad V_{IN} < -2V_{ON}$$

impossibile. come è da aspettarsi poichè i primi tre casi coprono tutti i possibili valori di V_{IN}

$V_{IN} < -4V_{ON}$	$V_{OUT} = \frac{V_{IN}}{3} - \frac{2}{3}V_{ON}$
$-4V_{ON} < V_{IN} < 4V_{ON}$	$V_{OUT} = \frac{V_{IN}}{2}$
$V_{IN} > 4V_{ON}$	$V_{OUT} = \frac{V_{IN}}{3} + \frac{2}{3}V_{ON}$



2a) Tensione V_{OUT} con $V_{IN} = -5V$

$$V_{OUT} = \frac{V_{IN}}{3} - \frac{2}{3}V_{ON} = -2V$$

2b) Tensione V_{OUT} con $V_{IN} = 1V$

$$V_{OUT} = \frac{V_{IN}}{2} = 0.5V$$

2c) Tensione V_{OUT} con $V_{IN} = 5V$

$$V_{OUT} = \frac{V_{IN}}{3} + \frac{2}{3}V_{ON} = 2V$$

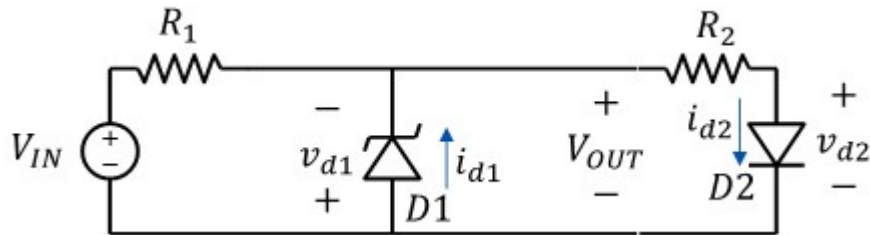
D1 OFF
D2 ON

D1 OFF
D2 OFF

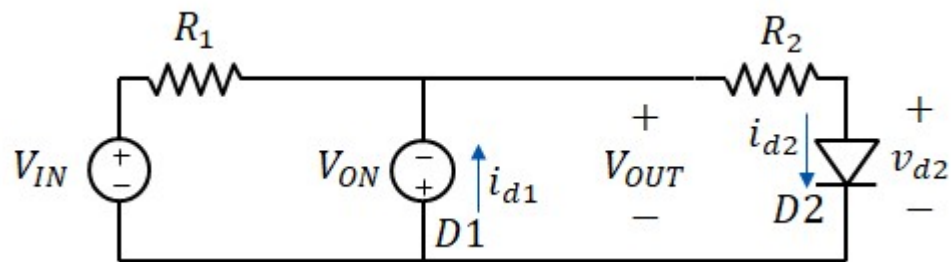
D1 ON
D2 OFF

Esercizio 7

DATI: $R_1 = 1\text{k}\Omega$, $R_2 = 4\text{k}\Omega$, $V_{ON} = 0.5\text{V}$, $V_Z = 6.5\text{V}$



Supponiamo D1 ON:



Scriviamo la legge di Kirchhoff alla maglia D1-D2-R2:

$$V_{ON} + R_2 \cdot i_{d2} + v_{d2} = 0$$

$$v_{d2} = -V_{ON} - R_2 \cdot i_{d2}$$

da questa relazione si può dedurre che $v_{d2} \leq -V_{ON} < V_{ON}$ poichè $i_{d2} \geq 0$

Quindi D2 è sempre spento o al limite dell'accensione.

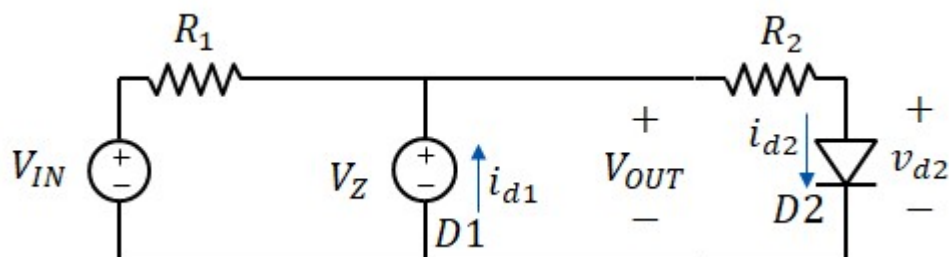
Verifichiamo la condizione ON per D1:

$$i_{d1} = \frac{-V_{ON} - V_{IN}}{R_S} > 0$$

$$V_{IN} < -V_{ON}$$

$$V_{OUT} = -V_{ON}$$

Supponiamo D1 in regione ZENER:



Si verifica facilmente che D2 è ON:

$$v_{d2} = V_{ON} \quad i_{d2} = \frac{V_Z - V_{ON}}{R_2} = 1.5 \cdot \text{mA}$$

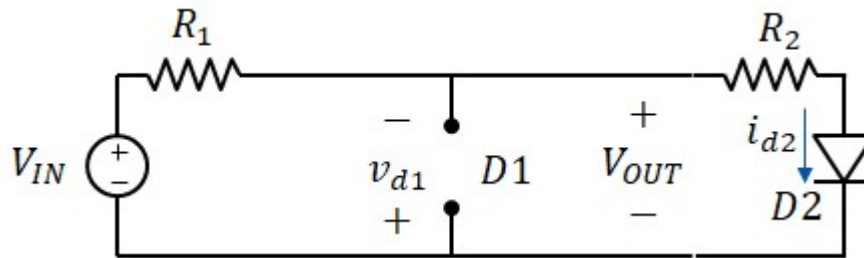
L'ipotesi che D1 sia in ZENER è vera se: $i_{d1} < 0$

$$i_{d1} = \frac{V_Z - V_{IN}}{R_1} + i_{d2} < 0 \quad \text{se} \quad \frac{V_Z - V_{IN}}{R_1} < -i_{d2} \quad V_{IN} > V_Z + R_1 \cdot i_{d2} = V_Z + \frac{R_1}{R_2} (V_Z - V_{ON})$$

$$V_Z + \frac{R_1}{R_2} (V_Z - V_{ON}) = 8 \text{ V}$$

Supponiamo D1 OFF:

$$-0.5V < V_{IN} < 8V$$



Ipotesi: D2 ON: $i_{d2} = \frac{V_{IN} - V_{ON}}{R_1 + R_2} > 0$ se: $V_{IN} > V_{ON}$

$$V_{OUT} = V_{ON} + R_2 \cdot i_{d2} = V_{ON} + R_2 \cdot \frac{V_{IN} - V_{ON}}{R_1 + R_2} = V_{IN} \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_1} + V_{ON} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$\frac{R_2}{R_2 + R_1} = \frac{4}{5} \quad V_{ON} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} = 0.1V$$

Ipotesi: D2 OFF: $V_{OUT} = V_{IN}$
 $v_{d2} = V_{OUT} < V_{ON}$ se: $V_{IN} < V_{ON}$

Riassumendo il circuito ha quattro possibili regioni di funzionamento:

$$V_{IN} < -V_{ON}$$

D1 ON, D2 OFF:

$$V_{OUT} = -V_{ON}$$

$$-V_{ON} < V_{IN} < V_{ON}$$

D1 OFF, D2 OFF:

$$V_{OUT} = V_{IN}$$

$$V_{ON} < V_{IN} < V_Z + \frac{R_1}{R_2}(V_Z - V_{ON})$$

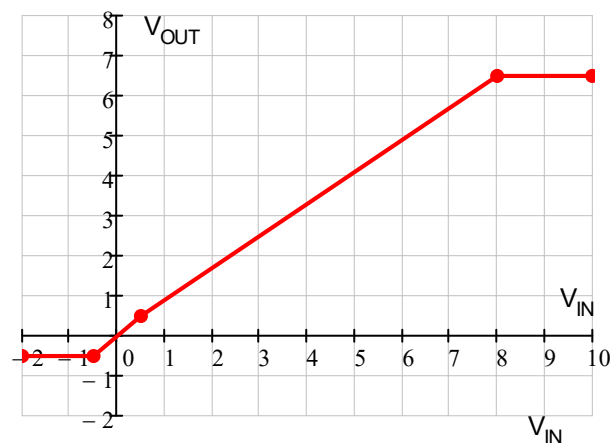
D1 OFF, D2 ON:

$$V_{OUT} = V_{IN} \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_1} + V_{ON} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$V_{IN} > V_Z + \frac{R_1}{R_2}(V_Z - V_{ON})$$

D1 ZENER, D2 ON:

$$V_{OUT} = V_Z$$

D1 ON
D2 OFFD1 OFF
D2 OFFD1 OFF
D2 OND1 ZENER
D2 ON