

GT ĐIỆN TỬ CƠ BẢN

Ch2 PHÂN TÍCH MẠCH KHÔNG TUYẾN TÍNH

I. Khái niệm phi tuyến

- Trong chương trước, ta đã phân tích mạch điện tuyến tính, là mạch có đặc tuyến $v - i$ là đường thẳng
- Mạch điện phi tuyến là mạch có đặc tuyến $v - i$ là đường cong (không thẳng).
- Các linh kiện điện tử thường là các linh kiện có đặc tính phi tuyến ở chế độ tín hiệu lớn như diod, transistor lưỡng cực nối, transistor trường...

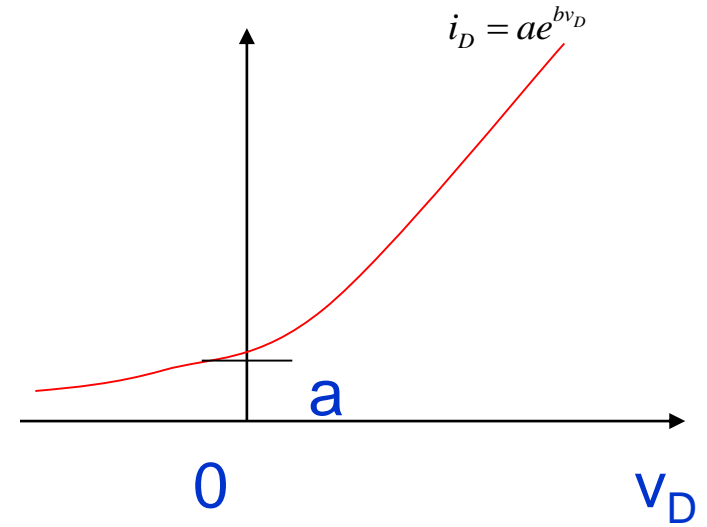
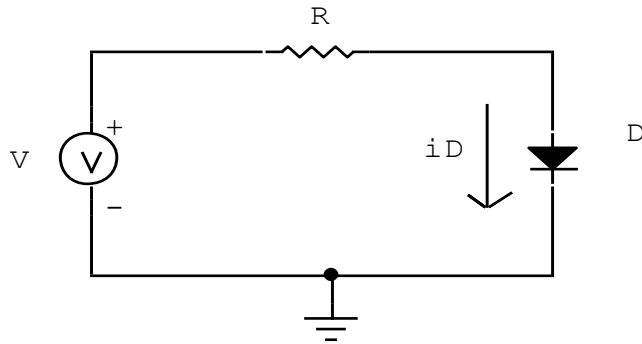
Với mạch phi tuyến, ta có thể tuyến tính hoá khi xét ở chế độ tín hiệu nhỏ.

Chú ý: Các định lý Chồng chập, Thevenin, Norton, chỉ áp dụng cho mạch tuyến tính.

•

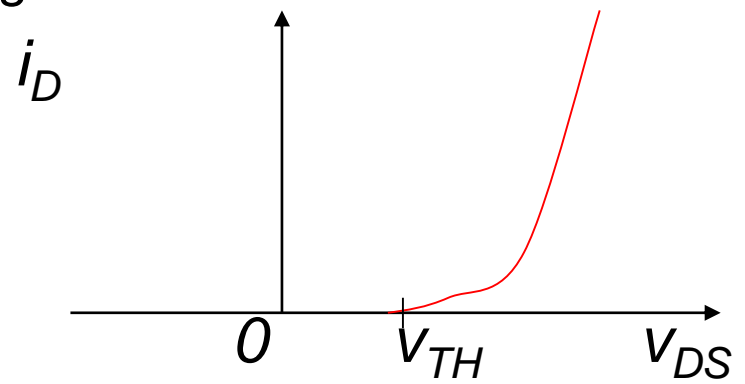
- II. Các phần tử phi tuyến
- Đặc tuyến của

$$i_D = I_S e^{v_D/v_T} = ae^{bv_D}$$



- Hoặc đặc tuyến của MOSFET loại tăng:

$$i_D = \begin{cases} \frac{K}{2} (v_{GS} - v_{TH})^2 & \text{khi } v_{DS} \geq V_{TH} \\ 0 & \text{khi } v_{DS} < V_{TH} \end{cases}$$



- Phương trình dòng diod

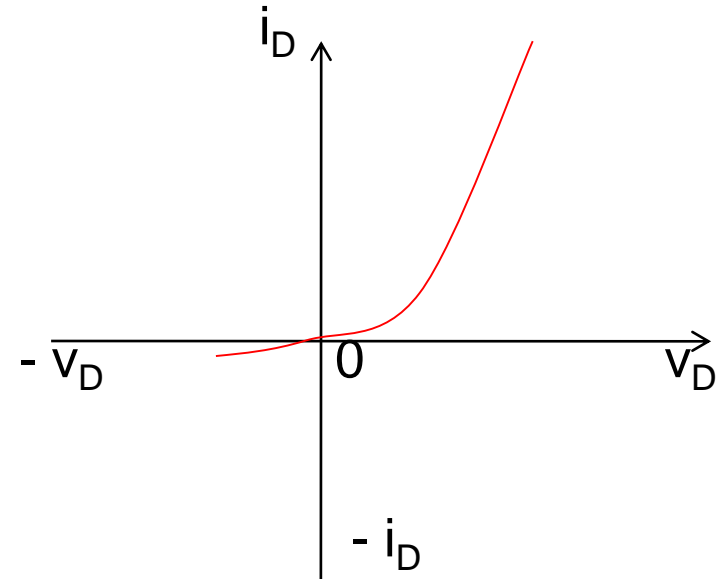
$$i_D = I_S \left(e^{v_D/V_T} - 1 \right)$$

- I_S dòng bão hoà ngược
- Điện thế nhiệt:

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

- hằng số Boltzmann
 $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$
- Điện tích điện tử:
 $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- Nhiệt độ tuyệt đối:
 $T^\circ\text{K} = 273^\circ\text{C} + t^\circ\text{C}$

- Đặc tuyến diod



- Ở $t = 25^\circ\text{C}$ cho $V_T = 0,025 \text{ V}$
- Ở $t = 27^\circ\text{C}$, cho $V_T = 0,026 \text{ V}$

- **Thí dụ:**
- Xác định dòng điện diod i_D có điện thế hai đầu diod $v_D = 0,5 \text{ V}; 0,6\text{V}; 0,7 \text{ V}$. Cho biết diod có điện thế nhiệt $V_T = 0,025 \text{ V}$ và dòng điện bảo hoà ngược $I_s = 1 \text{ pF}$.

- **Giải:**

Dòng diod cho bởi:

$$i_D = I_s \left(e^{v_D/V_T} - 1 \right)$$

Thay các trị số đã cho vào, được với $v_D = 0,5 \text{ V}$

$$i_D = 1 \times 10^{-12} \left(e^{0,5/0,025} - 1 \right) = 0,49 \text{ mA}$$

Tương tự với $v_D = 0,6\text{V}$ cho $i_D = 26 \text{ mA}$; $v_D = 0,7 \text{ V}$, $i_D = 1450 \text{ mA}$.
 Lưu ý khi v_D tăng ngoài $0,6\text{V}$, dòng i_D tăng rất nhanh.

- Khi $v_D = -0,2 \text{ V}$, tính được:

$$i_D = 1 \times 10^{-12} \left(e^{-0,2/0,025} - 1 \right) = -0,9997 \times 10^{-12} \text{ A}$$

Dòng i_D rất nhỏ, xem như không đáng kể

- Thí dụ 2

Cho MOSFET có $V_{TH} = 1V$, $K = 4 \text{ mA/V}^2$. Tính i_D khi $v_{DS} = 2V, 4V$.

- *Giải:*

- Với $v_{DS} = 2V$, cho:

$$i_D = \frac{K}{2} (v_{DS} - V_{TH})^2 = \frac{4 \times 10^{-3}}{2} (2 - 1)^2 = 2 \text{ mA}$$

- Với $v_{DS} = 4V$, cho:

$$i_D = \frac{K}{2} (v_{DS} - V_{TH})^2 = \frac{4 \times 10^{-3}}{2} (4 - 1)^2 = 18 \text{ mA}$$

- Khi $v_{DS} = 0,5V$, cho:

- $v_{DS} < V_{TH}$, $i_D = 0$

- Theo hai thí dụ trên, i_D không tăng tuyến tính theo v_D .

III. Phương pháp phân tích mạch

1. Phương pháp toán học (giải tích)

- Theo mạch điện diod ta có:

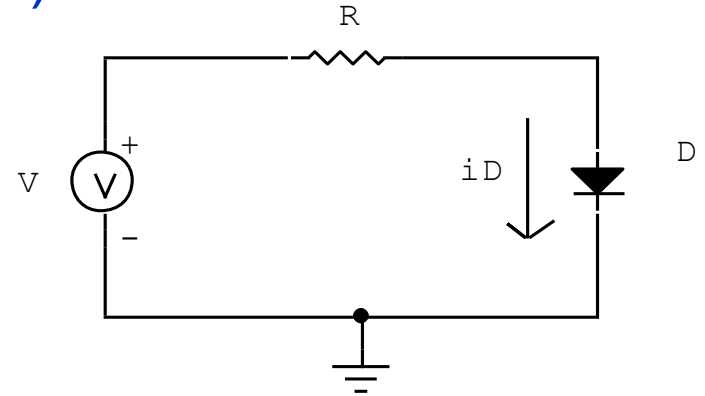
$$\frac{v_D - V}{R} + i_D = 0 \quad (1)$$

$$i_D = ae^{bv_D} \quad (2)$$

Giải phương trình bằng:

- Thử đúng hay sai
- Phương pháp toán số

$$\frac{v_D - V}{R} + ae^{bv_D} = 0$$



$$\frac{V - v_D}{R} = i_D \Rightarrow \frac{v_D - V}{R} = -i_D$$
$$\frac{v_D - V}{R} + i_D = 0$$

- Thí dụ:
- Xét mạch diod ở trên, nhưng với $i_D = kv_D^2$.
- Giải:

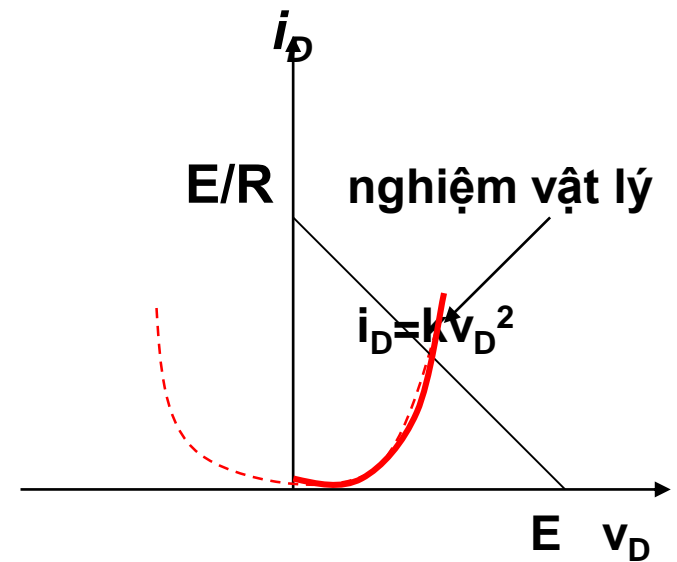
$$\frac{v_D - V}{R} + kv_D^2 = 0$$

$$Rkv_D^2 + v_D - E = 0$$

- Chọn trị số dương:

$$v_D = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4RkE}}{2Rk}$$

$$i_D = k \left[\frac{-1 + \sqrt{1 + 4RkE}}{2Rk} \right]^2$$



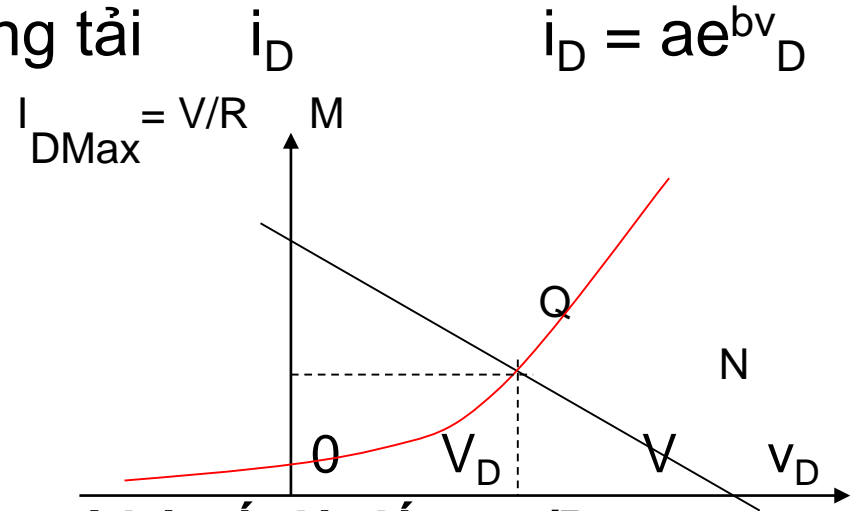
- 2. Phương pháp đồ thị

- Dùng cách vẽ đường thẳng tải

- (1) cho :

$$\frac{v_D - V}{R} = -ae^{bv_D}$$

- $\frac{V}{R} - \frac{v_D}{R} = ae^{bv_D} \quad (3)$



- vế trái của (3) là đường thẳng có hệ số độ dốc $-1/R$,

- vế phải của (3) là đặc tuyến của diod

Giao điểm của hai đường này cho nghiệm số của(1) và (2) hay của (3)

Cách vẽ đường thẳng tải tĩnh:

- Cho $v_D = 0 \rightarrow I_{DM} = V/R$ cho điểm M trên đồ thị

- Cho $I_D = 0 \rightarrow v_{DN} = V$ cho điểm N trên đồ thị

- **Thí dụ 1: Cho**

$$V=1,$$

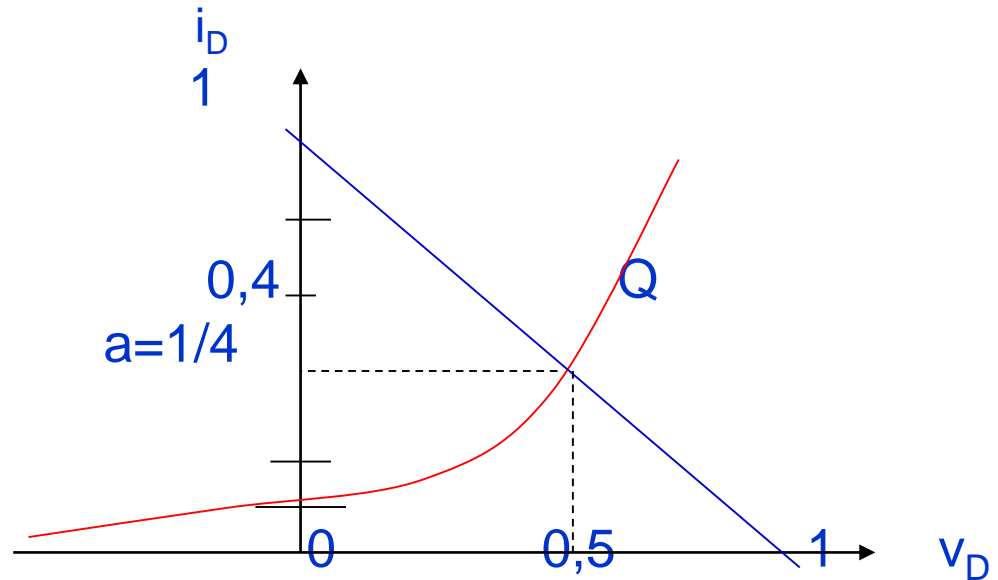
$$R=1$$

$$a = 1/4$$

$$b=1$$

$$v_D = 0,5 \text{ V}$$

$$\text{Được: } i_D = 0,4 \text{ A}$$



- **Thí dụ 2: Cho mạch diod có phương trình sau:**

$$i_D = -\frac{v_D - E}{R}$$

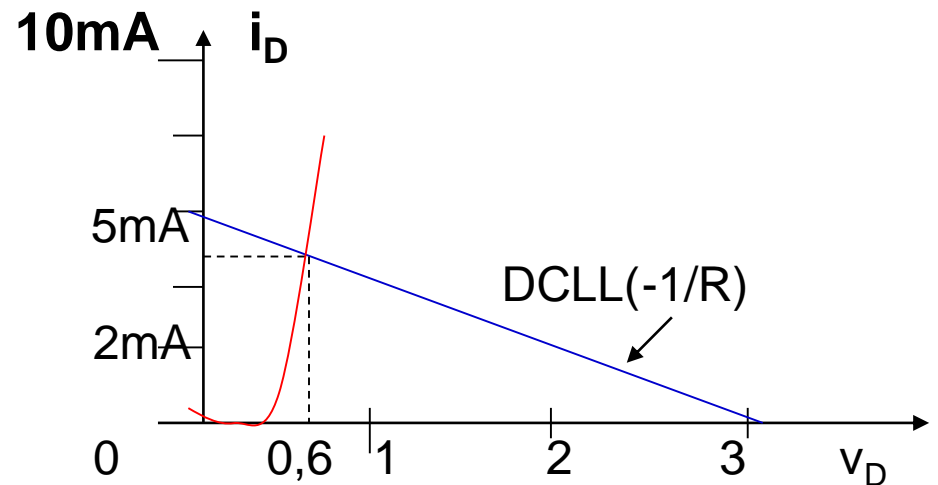
$$i_D = I_S (e^{v_D/v_T} - 1)$$

- **Với E = 3 V, R = 500 Ω**

- Tính được:

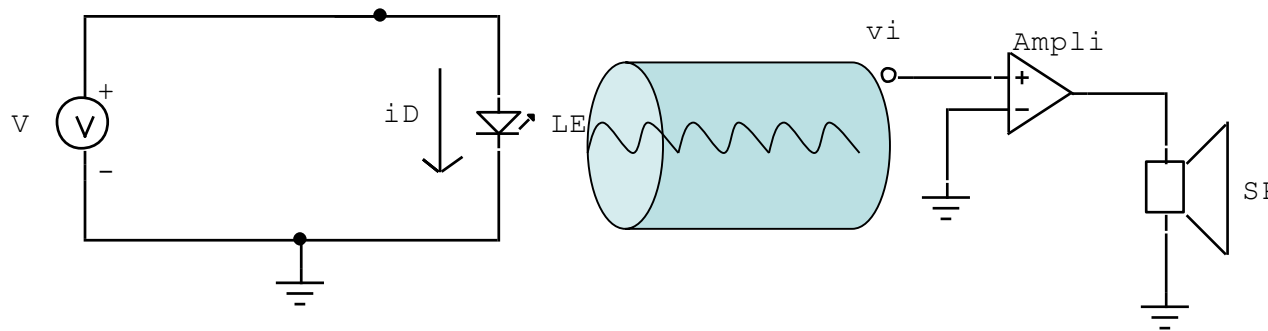
$$i_D = -\frac{0,6V}{500\Omega} + \frac{3V}{500\Omega}$$

$$= -1,2mA + 6mA = 4,8mA$$



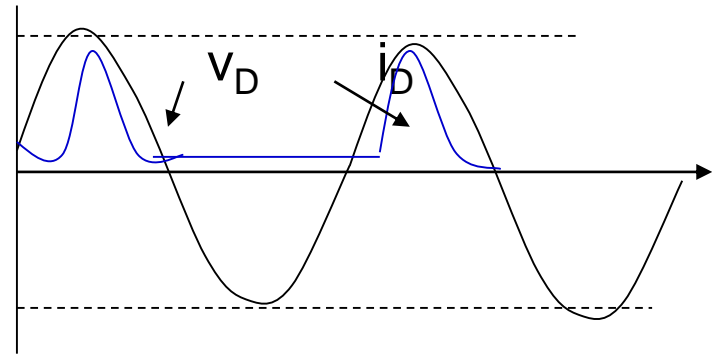
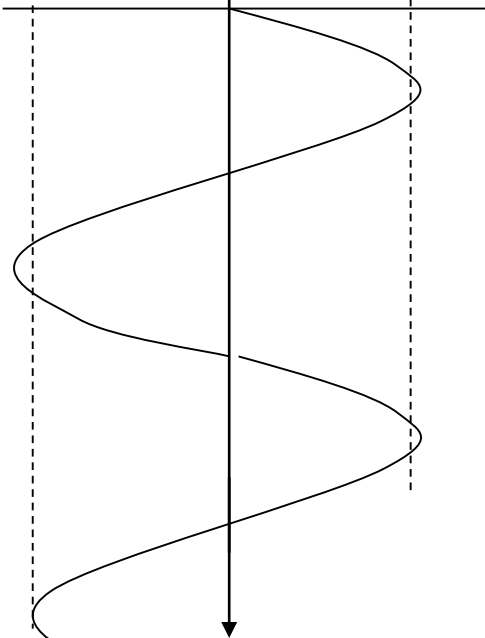
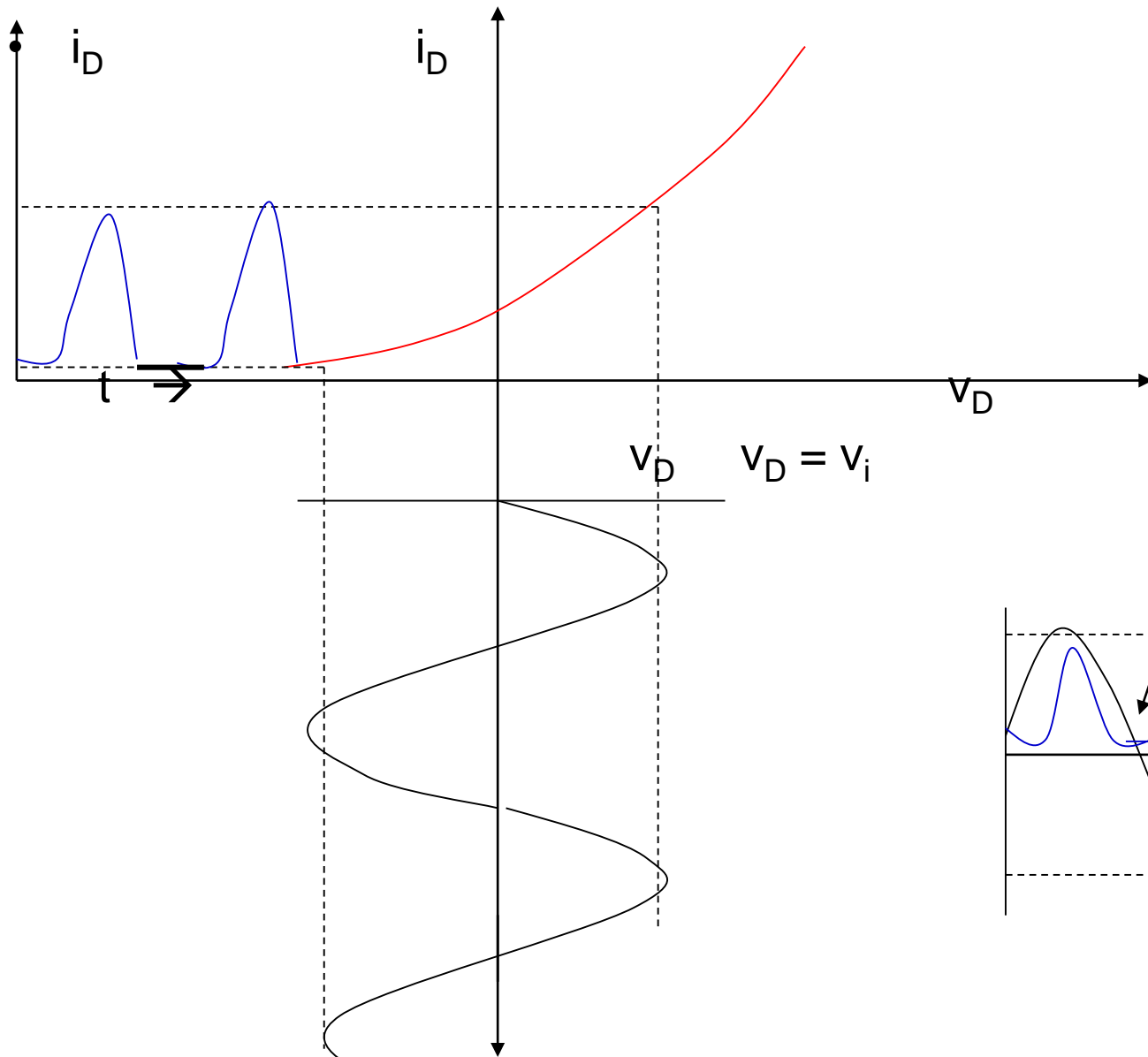
3. Phương pháp phân tích gia tăng (tín hiệu nhỏ)

- Sơ đồ: Khuếch đại âm nhạc



- $v_i(t) \rightarrow i_D(t) \rightarrow$ ánh sáng $\rightarrow i_R \rightarrow$ âm thanh (khuếch đại)
↑
phi tuyến
← tuyến tính →

- LED là linh kiện phi tuyến \rightarrow sai dạng



Thí dụ:

Với mạch diod cho ở trên, tính i_D khi $v_D = 0,5V, 0,6V, 0,7V$. Cho biết $V_T = 0,025V, I_s = 1 \text{ pA}$.

Giải:

$$i_D = I_s(e^{v_D/V_{TH}} - 1).$$

-Với $V_D = 0,5V$

$$i_D = 1 \times 10^{-12}(e^{0.5/0.025} - 1) = 0.49 \text{ mA}.$$

-với $V_D = 0,6V$

$$i_D = 26 \text{ mA},$$

-Với $V_D = 0,7V$

$$i_D = 1450 \text{ mA}.$$

Ta thấy dòng i_D tăng rất nhanh khi V_D lớn hơn $0,6V$ và không tăng tuyến tính với v_D .

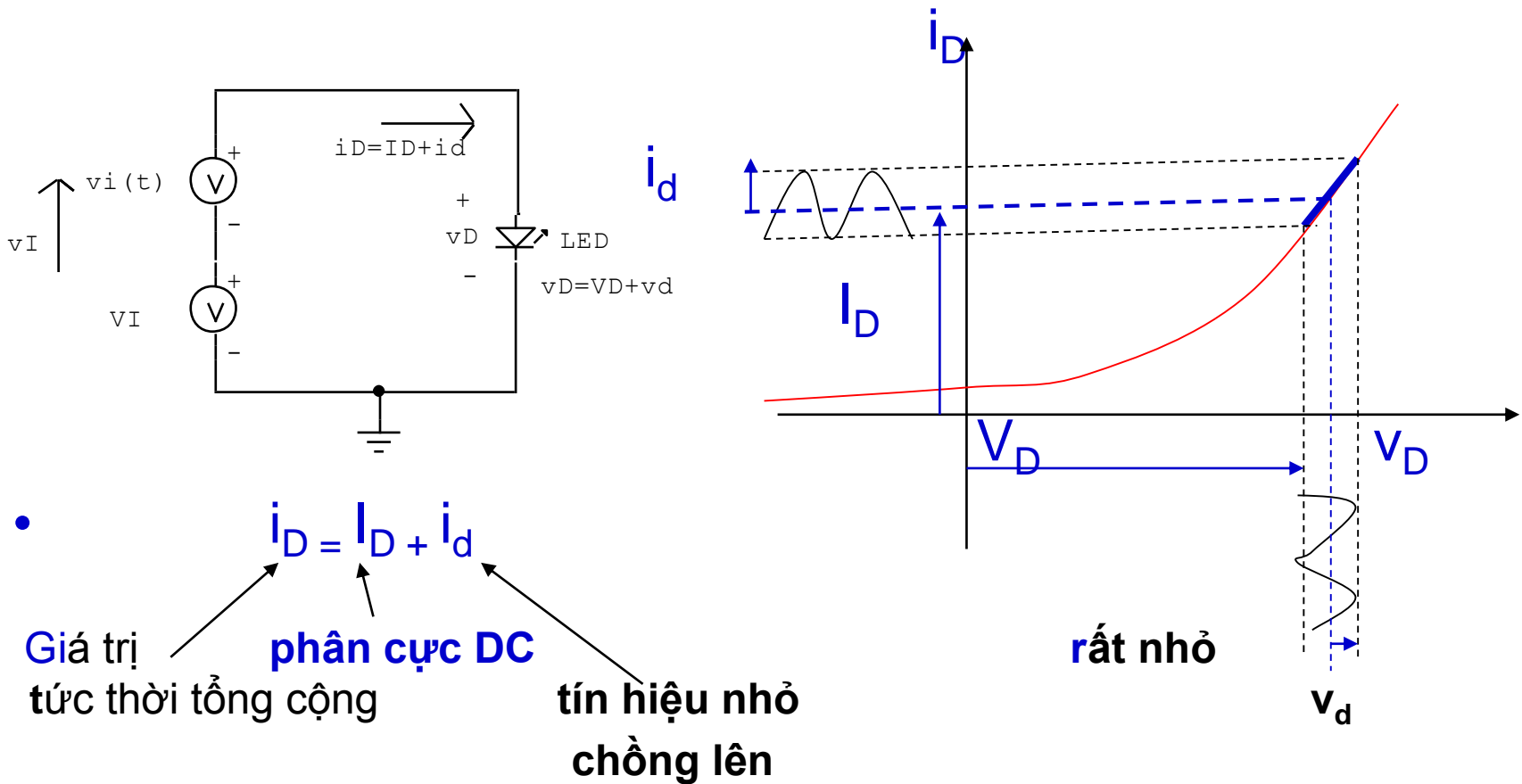
Chú ý: khi $v_D = - 0,2V$ cho i_D :

$$i_D = I_s(e^{v_D/V_{TH}} - 1) = 1 \times 10^{-12}(e^{-0.2/0.025} - 1) = - 0.9997 \times 10^{-12}A.$$

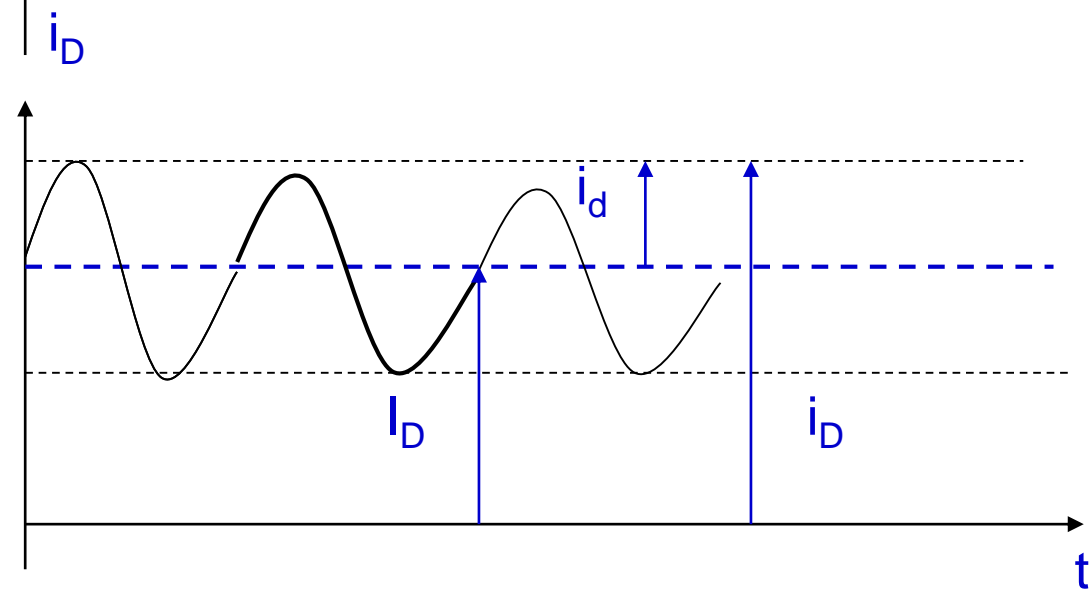
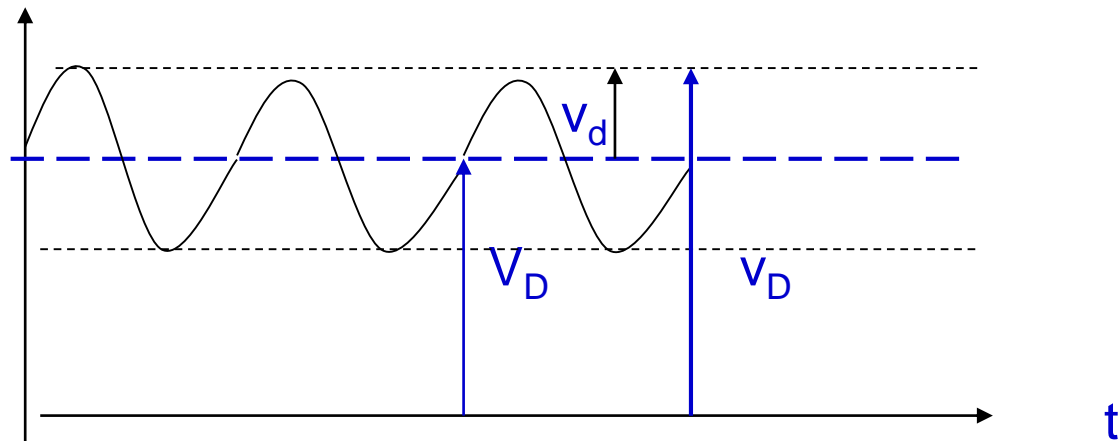
IV. Phân tích tín hiệu nhỏ

1. Phương pháp tín hiệu nhỏ

• Phân cực điểm Q và cho tín hiệu nhỏ tác động ngõ vào cho:



- Dạng sóng: $v_D = v_i$



a. Ý nghĩa toán học

- Khai triển chuỗi Taylor của hàm số $f(x)$ tại trị $x = x_0$:

$$y = f(x) = f(x_0) + \left. \frac{df}{dx} \right|_{x_0} (x - x_0) + \frac{1}{2!} \left. \frac{d^2 f}{dx^2} \right|_{x_0} (x - x_0)^2 + \dots$$

- Áp dụng vào hàm $i_D = f(v_D)$ không tuyến tính
- Thay thế $v_D = V_D + v_d = V_D + \Delta v_D$ ← gia tăng chung quanh V_D
- Khai triển Taylor $f(v_D)$ gần $v_D = V_D$ cho:

$$i_D = f(V_D) + \left. \frac{df(v_D)}{dv_D} \right|_{v_D = V_D} (\Delta v_D) + \frac{1}{2!} \left. \frac{d^2 f(v_D)}{dv_D^2} \right|_{v_D = V_D} (\Delta v_D^2) + \dots$$

- qua số hạng bậc cao vì Δv_D rất bé, ta được:

$$i_D = f(V_D) + \left. \frac{df(v_D)}{dv_D} \right|_{v_D = V_D} (\Delta v_D)$$

- **Hay có thể viết:**

$$i_D = f(V_D) + \left. \frac{df(v_D)}{dv_D} \right|_{v_D = V_D} (\Delta v_D)$$

$$i_D = I_D + \Delta i_D$$

$$I_D = f(V_D)$$

← **Điểm tĩnh điều hành Q**

$$\Delta i_D = \left. \frac{df(v_D)}{dv_D} \right|_{v_D = V_D} (\Delta v_D)$$

↙
hằng số thừa số của Δv_D

- **Ký hiệu:**

$$\Delta v_D = v_d, \quad \Delta i_D = i_d$$

Với thí dụ diod cho:

$$i_D = ae^{bv_D}$$

$$= I_D + i_d \approx ae^{bv_D} + ae^{bv_D} \cdot b \cdot v_d$$

$$I_D = ae^{bv_D} \quad \Longrightarrow \quad \text{Điểm tĩnh Q (DC)}$$

$$i_d = ae^{bv_D} \cdot b \cdot v_d = \underbrace{(I_D \cdot b)}_{\text{h.s}} \cdot v_d \quad \Longrightarrow \quad \text{tín hiệu nhỏ}$$

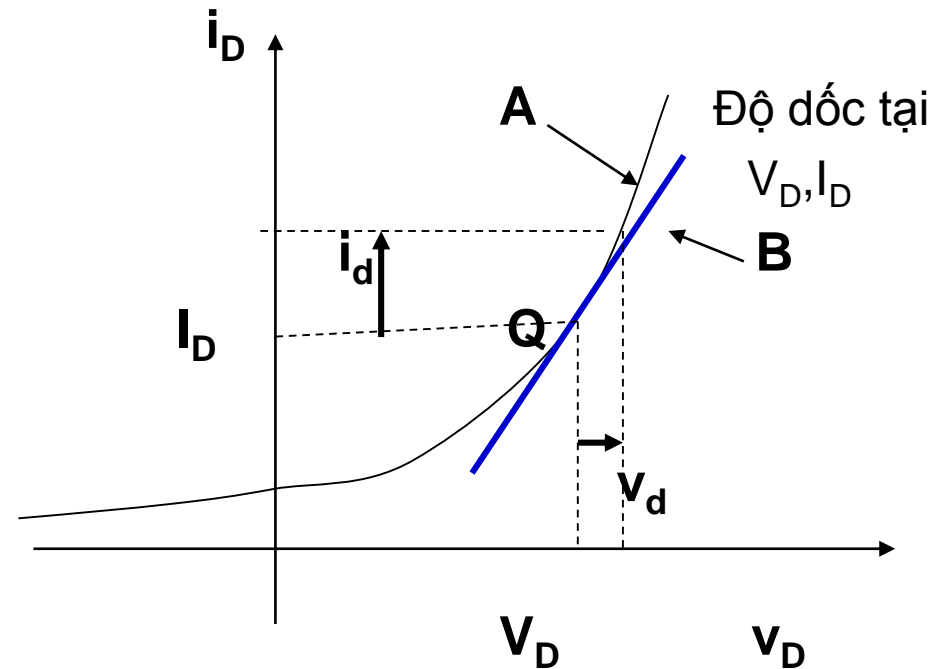
$$\text{h.s} \quad \Longrightarrow \quad \text{tuyến tính}$$

b. Giải thích bằng đồ thị

- Ta có:

$$I_D = ae^{bv_D} \quad \Longrightarrow \quad \text{Điểm tĩnh Q}$$

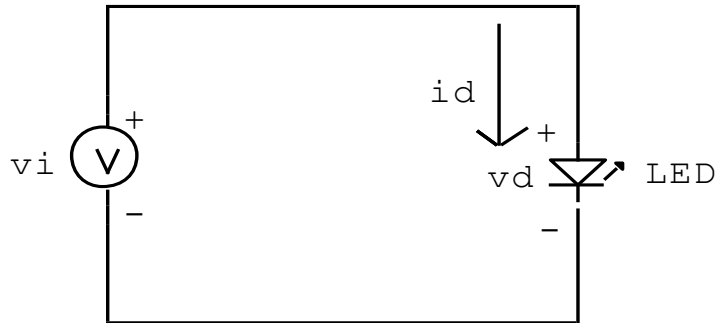
$$i_d = I_D \cdot b \cdot v_d$$



Ta làm tuyến tính **A** với **B**

3. Giải thích bằng mạch điện

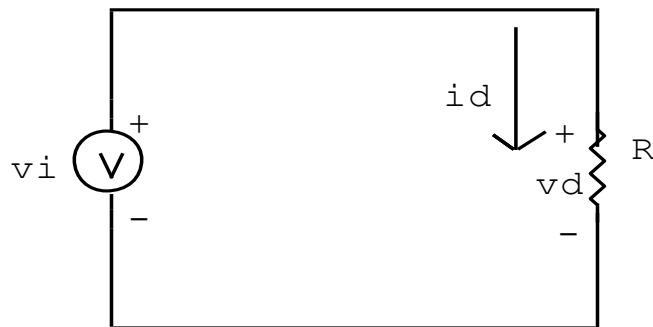
- Mạch tín hiệu lớn



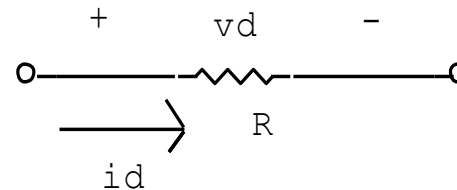
$$I_D = a e^{b v_D}$$

Đáp ứng tín hiệu nhỏ:

- Mạch tín hiệu nhỏ



$$i_d = I_D \cdot b \cdot v_d$$



$$R = \frac{1}{I_D b}$$

Tuyến tính

2. Phân tích bằng tuyến tính từng mảnh

- Phương pháp thứ tư để giải mạch không tuyến tính là dùng phân tích tuyến tính từng mảnh
- Đó là cách dùng các đoạn thẳng rồi kể đó áp dụng phương pháp phân tích mạch tuyến tính để tính toán với các đoạn thẳng đó.
- Để đơn giản, ta xét thí dụ với diod và khi đó gọi là **mô hình diod diod lý tưởng**
- Trước hết, ta triển khai mô hình tuyến tính từng mảnh đơn giản của diod:

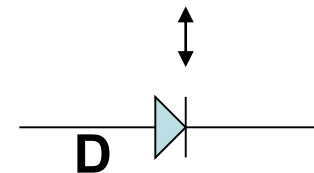
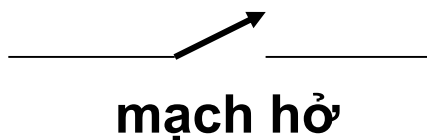
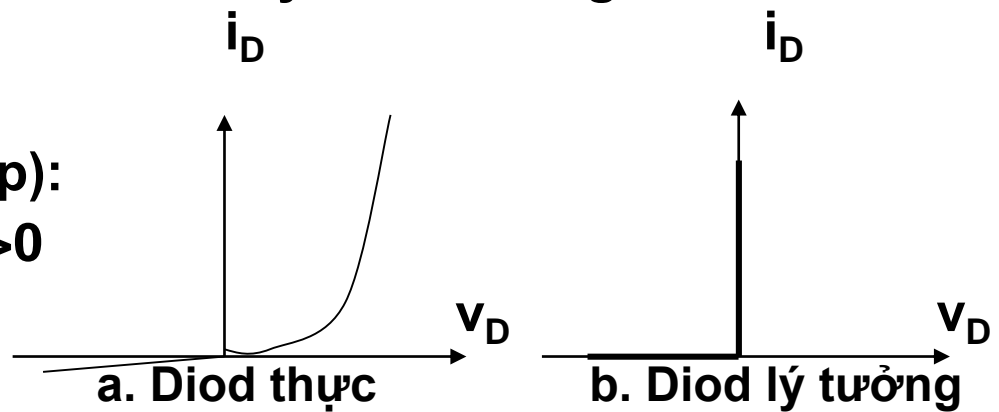
- Xấp xỉ thứ nhất:

Diod ON (mạch nối tiếp):

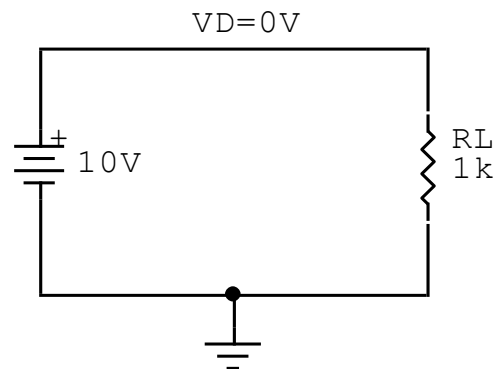
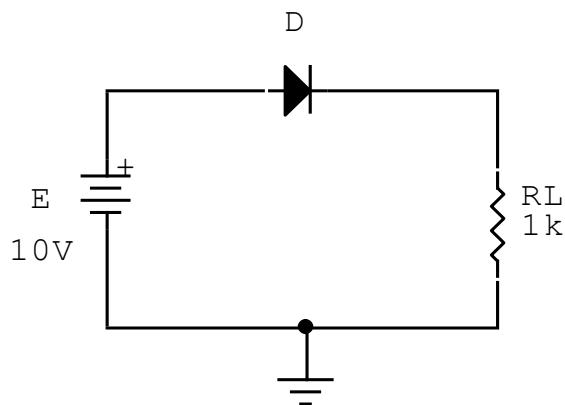
$V_D = 0$ V với tất cả $V_D > 0$

Diod OFF (mạch hở):

$I_D = 0$ với mọi $V_D < 0$



- **Thí dụ:**
- **Cho mạch diod theo H. Với diod lý tưởng**

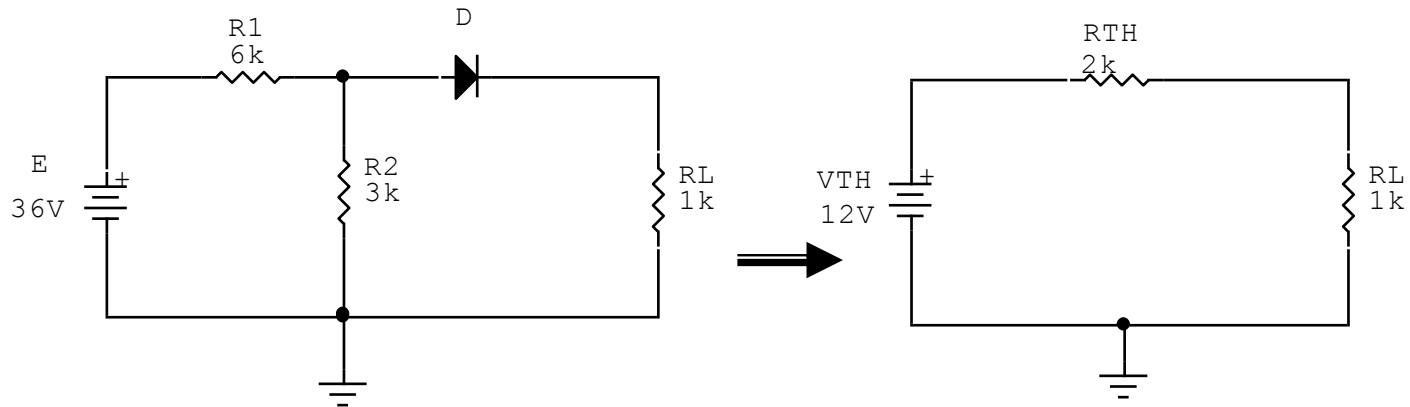


- **Ta có:**

$$V_L = E = 10V$$

$$I_L = V_L / R_L = 10V / 1k\Omega = 10 \text{ mA}$$

- **Thí dụ 2:** Cho mạch diod theo H. . Với $V_D = 0V$



- **Tính được:**

$$V_{TH} = \frac{3}{3+6} (36V) = 12V$$

$$R_{TH} = \frac{3(6)}{3+6} k\Omega = 2k\Omega$$

$$I_L = \frac{12V}{(2+1)} = 4mA$$

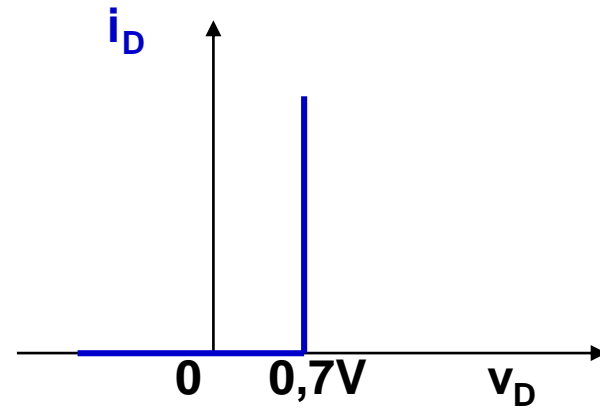
$$V_L = R_L I_L = 1k\Omega (4mA) = 4V$$

- **Xấp xỉ thứ hai:**

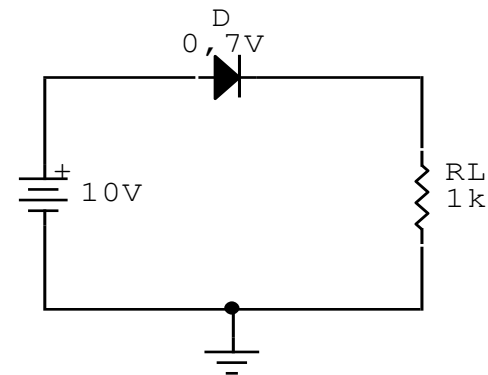
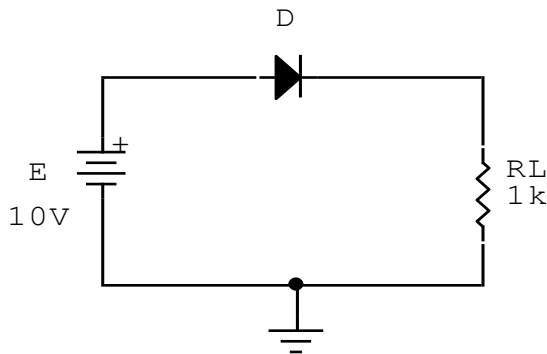
cho $V_D = 0,7V$ khi diod dẫn

Thí dụ: Cho mạch theo H. .

Với $V_D = 0,7V$



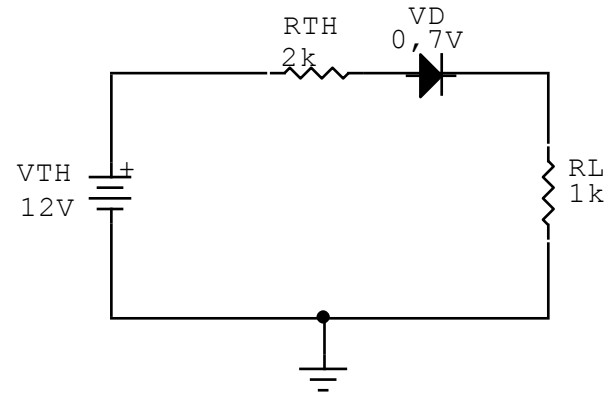
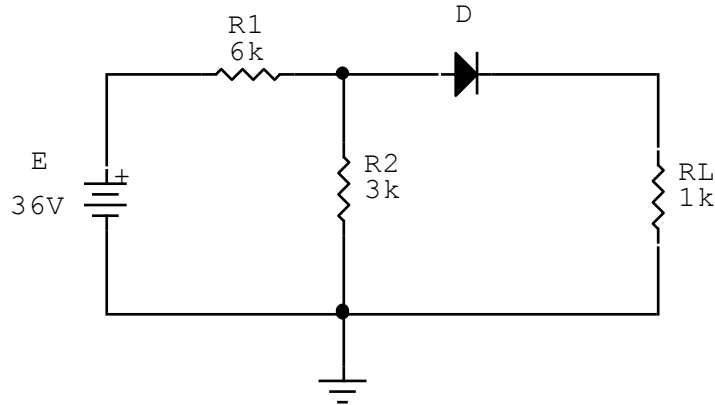
$v_D = 0V$



$$V_L = 10V - 0,7V = 9,3V$$

$$I_L = \frac{9,3V}{1k\Omega} = 9,3mA$$

- **Thi dụ 2 : Cho mạch diod ở H. Với $V_D = 0,7V$**



- **Tính được:**

$$V_{TH} = \frac{3}{3+6}(36V) = 12V$$

$$R_{TH} = \frac{3(6)}{3+6} k\Omega = 2k\Omega$$

$$V_L = 12V - 0,7V = 11,3V$$

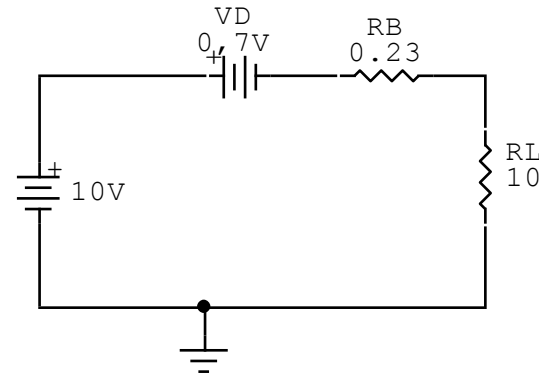
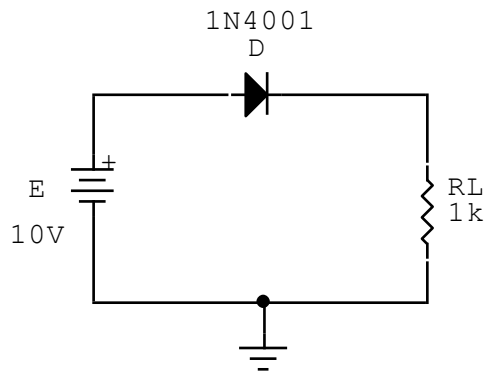
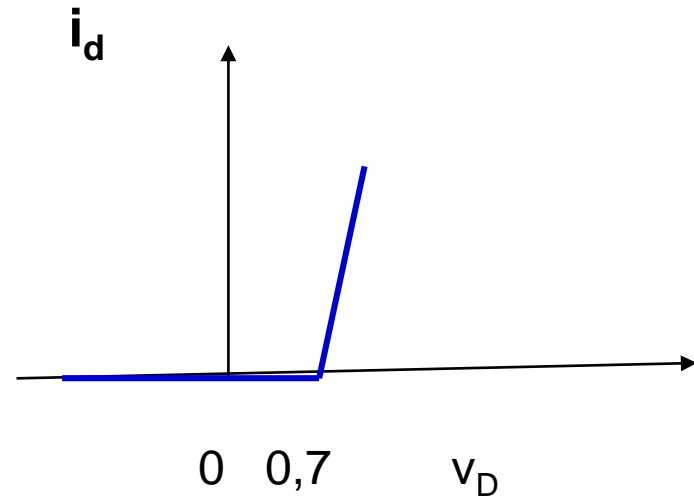
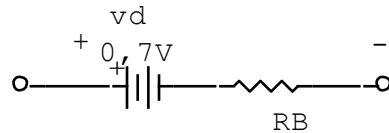
$$I_L = \frac{11,3V}{(2+1)} = 3,77mA$$

$$V_L = R_L I_L = 1k\Omega (3,77mA) = 3,77V$$

- Xấp xỉ 3:

Mạch tương đương Diod dẫn:

$$V_D = 0,7 + I_D R_B,$$



$$V_T = 10V - 0,7V = 9,3V$$

$$I_L = \frac{9,3V}{(0,23\Omega + 10\Omega)} = 0,909A$$

$$V_L = I_L R_L = 0,909A(10\Omega) = 9,9V$$

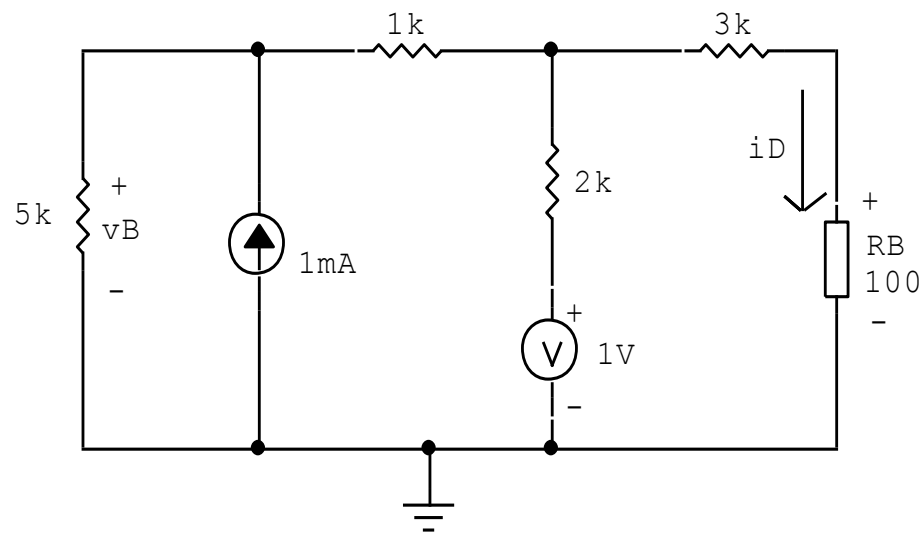
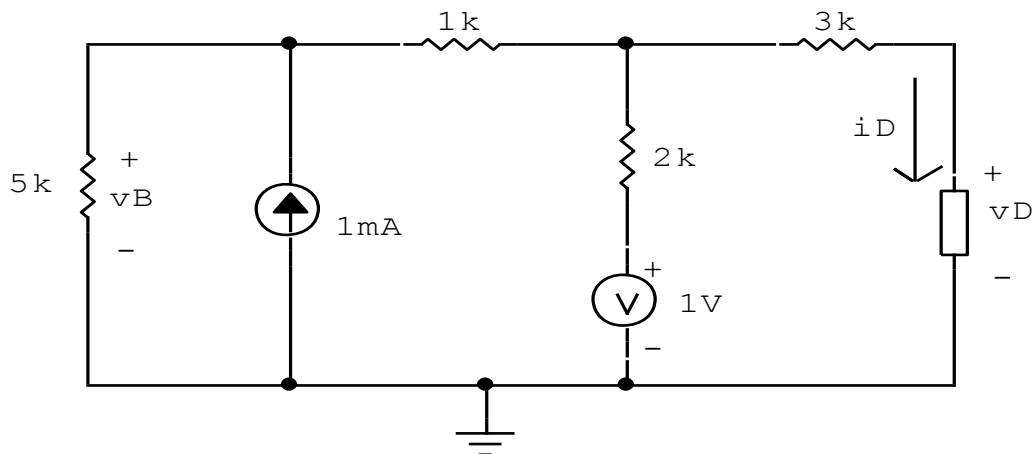
- **Thí dụ 3:** Cho mạch điện ở H. . Với diod có mô hình $V_D = 0,7V$ và $R_B = 100 \text{ Ohm}$.

- Ta có thể giải phi tuyến bằng cách làm tuyến tính phần tử phi tuyến và sau đó giải như mạch tuyến tính (áp dụng định lý chồng chập, Thevenin, Norton...)

❖ Xem diod có $V_D = 0V$

Và $R_B = 100 \Omega$

❖ Áp dụng nguyên lý chồng chập lần lượt tính:

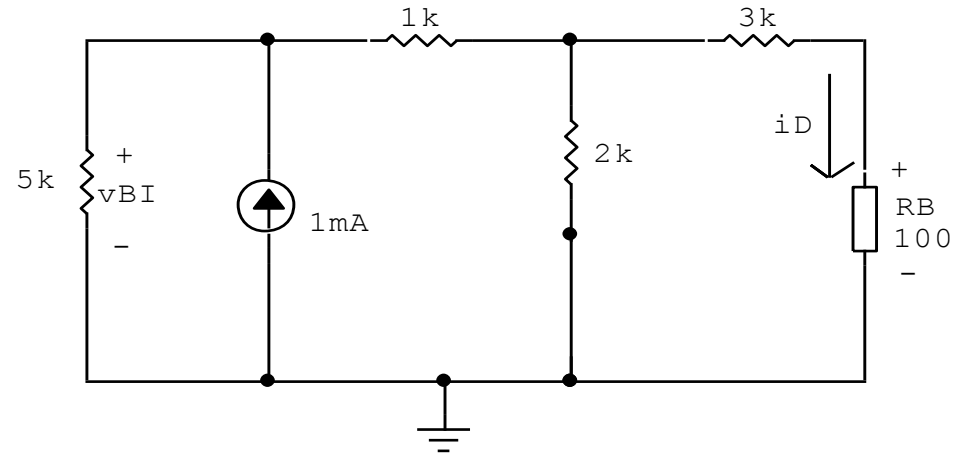


- Bước 1. Nối tắt nguồn thế tính được V_{BI} :**

$$R_{eq} = \left[(3k\Omega + 100\Omega) \parallel 2k\Omega + 1k\Omega \right] \parallel 5k\Omega$$

$$= 1,535k\Omega$$

$$v_{BI} = 1,535k\Omega(1mA) = 1,535V$$



- Bước 2. Cho hở dòng 1mA, tính v_{BV} :**

$$R_x = (1k\Omega + 5k\Omega) \parallel (3k\Omega + 100\Omega)$$

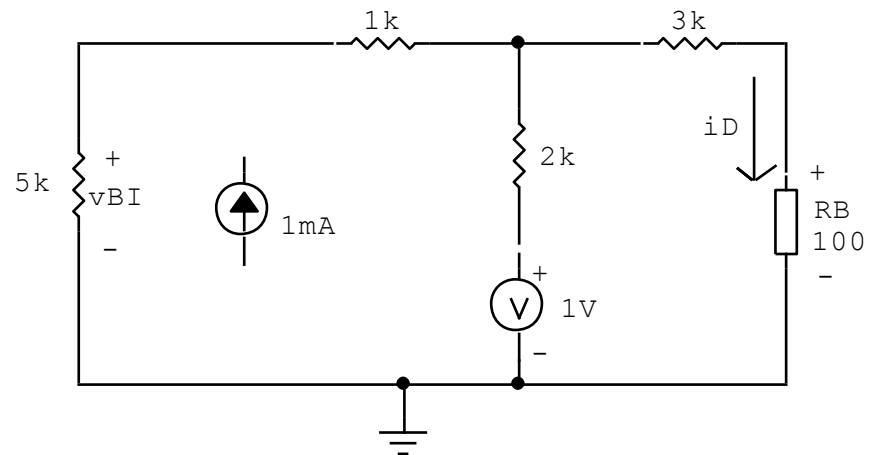
$$= 2,05k\Omega$$

$$v_x = 1V \frac{R_x}{2k\Omega + R_x} = 1V \frac{2,05k\Omega}{2k\Omega + 2,05k\Omega}$$

$$= 0,51V$$

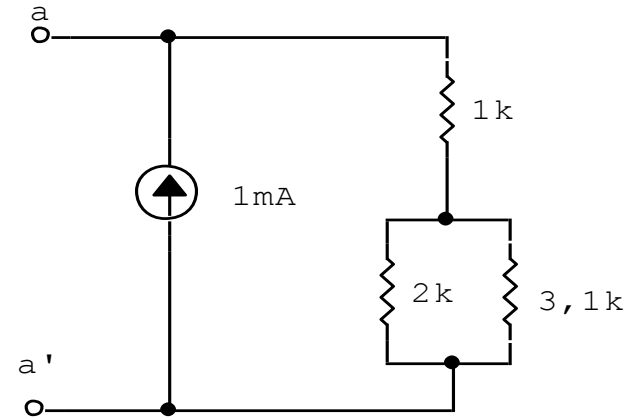
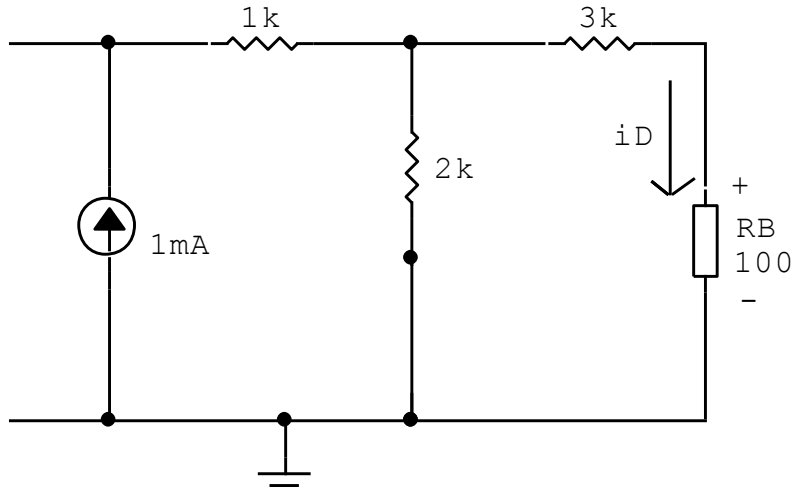
$$v_{BV} = v_x \frac{5k\Omega}{1k\Omega + 5k\Omega} = 0,51V \frac{5k\Omega}{1k\Omega + 5k\Omega}$$

$$= 0,425V$$



$$\rightarrow V_B = V_{BI} + V_{BV} = 1.535 V + 0.425 V = 1.96 V. 27 \text{ 📢}$$

- **Giải theo nguyên lý chồng chất và Thevenin**
- Bước 1: Nối tắt V, giải theo I, cắt rời điện trở 5k Ω



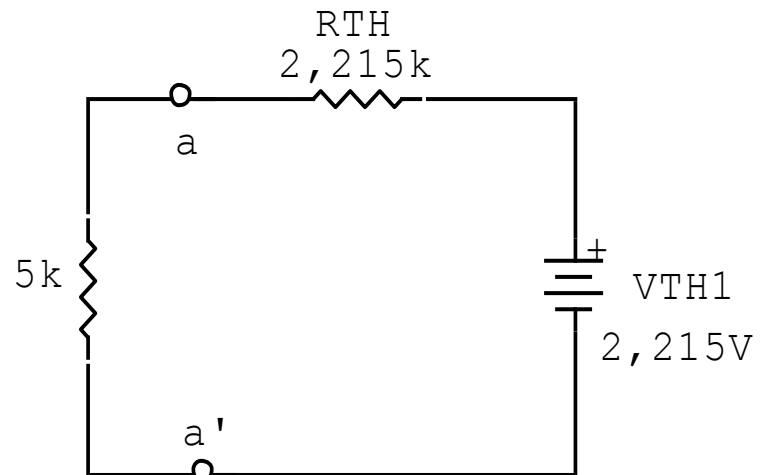
$$R_N = \left[2k\Omega \parallel (3k\Omega + 0,1k\Omega) \right] + 1k\Omega$$

$$= (1,215 + 1)k\Omega = 2,215k\Omega$$

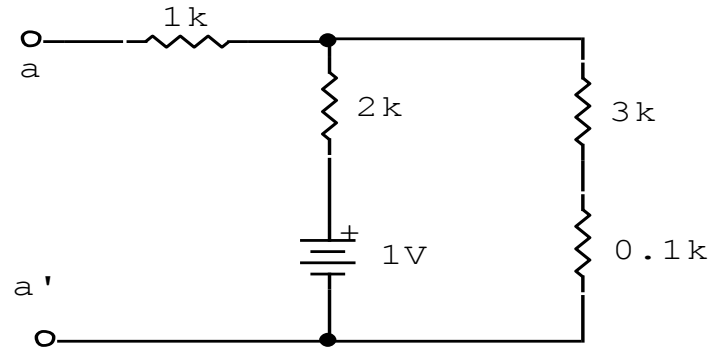
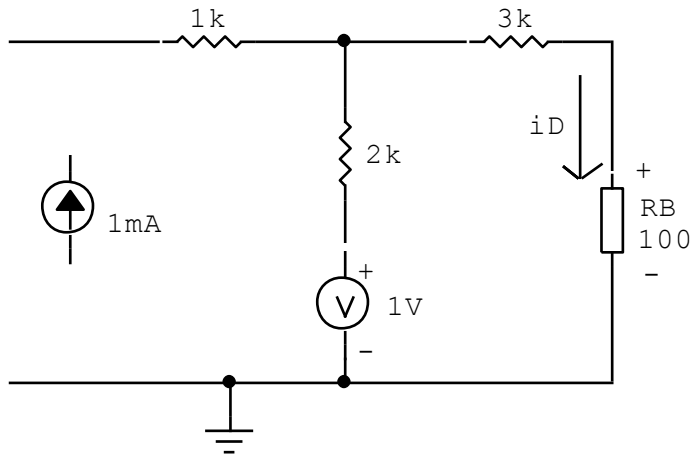
$$V_{TH1} = I(R_N) = 1mA(2,215k\Omega)$$

$$= 2,215V$$

$$V_{1(5k\Omega)} = \frac{5k\Omega}{5k\Omega + 2,215k\Omega} (2,215V) = 1,535V$$



- Bước 2: Hở I, và tính theo V

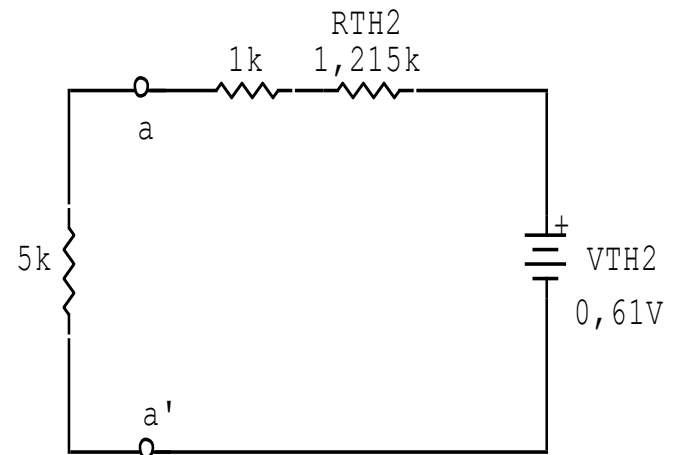


Tính được:

$$V_{TH2} = \frac{3,1k\Omega}{3,1k\Omega + 2k\Omega} 1V = 0,61V$$

$$R_{TH} = R_N = 1,215k\Omega$$

$$V_{2(5k\Omega)} = \frac{5k\Omega}{(1,215 + 1 + 5)k\Omega} (0,61V) = 0,423V$$



Vậy:

$$V_{T(5k\Omega)} = V_{1(5k\Omega)} + V_{2(5k\Omega)} = 1,535V + 0,423V = 1,958V$$