

## Bài 10: KHUẾCH ĐẠI THUẬT TOÁN

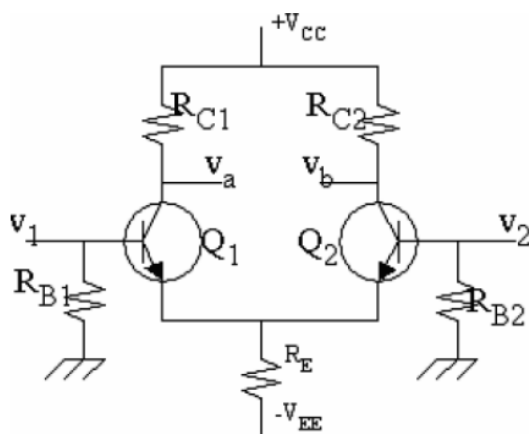
Mạch khuếch đại thuật toán (operational amplifier), thường được gọi tắt là op-amp là một mạch khuếch đại "DC-coupled" (tín hiệu đầu vào bao gồm cả tín hiệu BIAS) với hệ số khuếch đại rất cao, có đầu vào vi sai, và thông thường có đầu ra đơn. Trong những ứng dụng thông thường, đầu ra được điều khiển bằng một mạch hồi tiếp âm sao cho có thể xác định độ lợi đầu ra, tổng trở đầu vào và tổng trở đầu ra.

Các mạch khuếch đại thuật toán (KĐTT) có những ứng dụng trải rộng trong rất nhiều các thiết bị điện tử thời nay từ các thiết bị điện tử dân dụng, công nghiệp và khoa học. Các mạch khuếch đại thuật toán thông dụng hiện nay có giá bán rất rẻ. Các thiết kế hiện đại đã được điện tử hóa chặt chẽ hơn trước đây, và một số thiết kế cho phép mạch điện chịu đựng được tình trạng ngắn mạch đầu ra mà không làm hư hỏng.

Một bộ KĐTT có hai đầu vào mà thực chất chính là 2 đầu vào của một bộ khuếch đại vi sai, tầng đầu của bộ KĐTT.

### 10.1 Mạch khuếch đại vi sai

Dạng căn bản của mạch khuếch đại vi sai được trình bày như hình sau:



- Mạch đối xứng theo đường thẳng đứng. Các phần tử tương ứng giống nhau về mọi đặc tính.

$$R_{B1} = R_{B2}$$

$$R_{C1} = R_{C2}$$

$$V_{CC} = V_{EE}$$

Q1 giống hệt Q2, thường được chế tạo trên cùng một mẫu tinh thể.

- Mạch có 2 ngõ vào  $v_1, v_2$  và 2 ngõ ra là  $v_a, v_b$ .

Hình 10.1: Mạch khuếch đại vi sai

- Có 2 phương pháp lấy tín hiệu ra: Lấy ra ở cả 2 cực C của 2 T hoặc lấy ra từ một cực và điểm GND

- Phân biệt 3 trường hợp:

+ Khi hai tín hiệu vào cùng biên độ và cùng pha  $v_1=v_2$ , do mạch

$$V_a = K.v_1$$

$$V_b = K.v_2$$

là đối xứng nên có  $V_a=V_b \Rightarrow$  ngõ ra vi sai=0

+ Khi tín hiệu vào có dạng vi sai  $v_1=-v_2$  (cùng biên độ nhưng ngược pha):

Khi đó  $V_a-V_b=K_{VS}(v_1-v_2) \neq 0$ , trong đó  $K_{VS}$  là hệ số khuếch đại vi sai, giá trị này thường rất lớn

Như vậy, mạch khuếch đại vi sai chỉ khuếch đại đại lượng là sai số của 2 tín hiệu vào mà không khuếch đại từng tín hiệu thành phần

+ Khi 2 tín hiệu vào là bất kỳ, thì mạch khuếch đại sẽ khuếch đại cả thành phần vi sai và không vi sai của 2 tín hiệu đó.

\*Mạch phân cực:

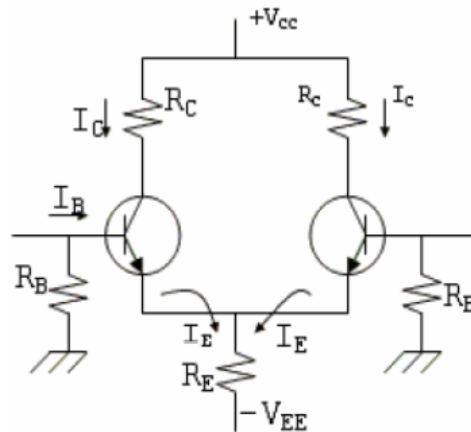
Khi mạch hoàn toàn đối xứng, ta có:

$$V_{CC} + V_{EE} - R_C I_C - V_{CE} - 2R_E I_E = 0$$

Xem  $I_C \approx I_E$

Suy ra:  $V_{CE} = (V_{CC} + V_{EE}) - (R_C + 2R_E)I_C$

Phương trình này xác định đường thẳng tải điện tĩnh, đồ thị  $I_C=f(V_{CE})$ .



Hình 10.2: Mạch phân cực

Ngoài ra ta có:

$$R_B I_B + V_{BE} + 2R_E I_E - V_{EE} = 0$$

Mà ta có:

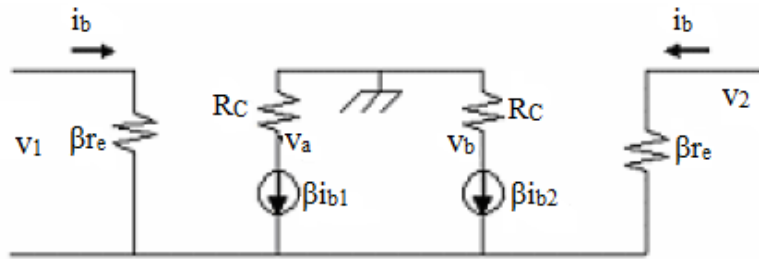
$$I_E \approx I_C = \beta I_B \text{ hay } I_B = I_E / \beta$$

$$\text{Suy ra: } R_B I_E / \beta + V_{BE} + 2R_E I_E - V_{EE} = 0$$

$$I_E = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{2R_E + \frac{R_B}{\beta}} \approx I_C$$

\* Mạch tương đương xoay chiều

Ta có mạch tương đương xoay chiều của mạch khuếch đại vi sai được trình bày trong hình sau:



Hình 10.3: Mạch tương đương xoay chiều

$$v_1 = -v_2$$

$$v_a = -v_b$$

Như vậy dòng điện luôn ngược chiều trong 2 transistor, không qua  $R_E$  nên có thể bỏ qua  $R_E$  trong khi tính toán:

Ta có:

$$\frac{v_a}{R_C} + \beta i_{b1} = 0 \text{ và } i_{b1} = \frac{v_1}{\beta r_e}$$

Suy ra:

$$\frac{v_a}{R_C} = -\frac{v_1}{r_e} \Rightarrow \frac{v_a}{v_1} = -\frac{R_C}{r_e}$$

Ngoài ra:

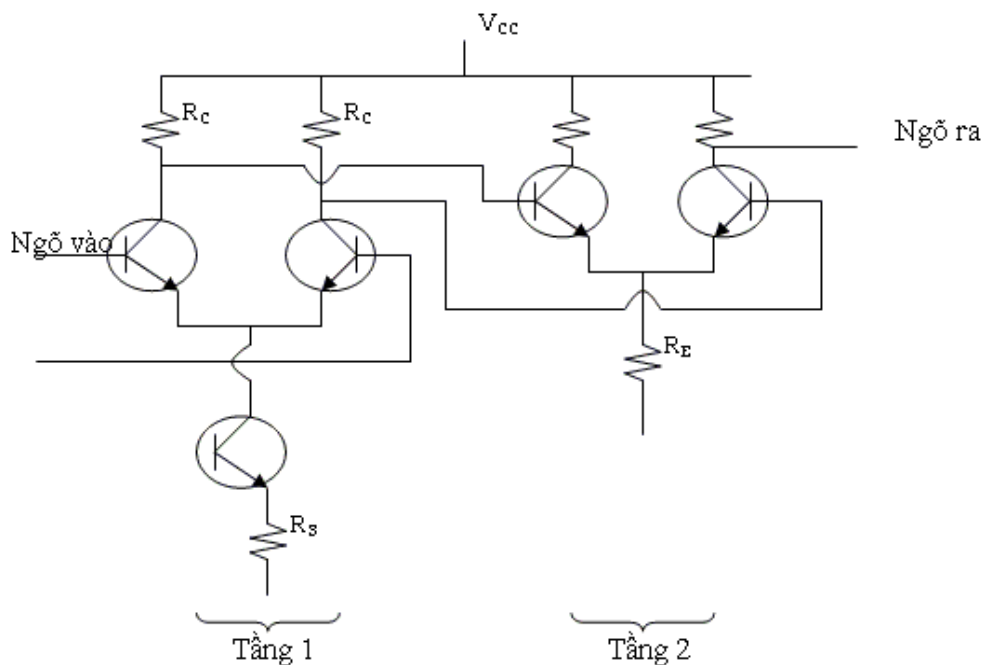
$$A_v = \frac{v_a - v_b}{v_1 - v_2} = \frac{2v_a}{2v_1} = \frac{v_a}{v_1} = -\frac{R_C}{r_e}$$

Mạch KĐTT sử dụng mạch vi sai tổng hợp, gồm 3 tầng: tầng đầu, các tầng giữa và tầng cuối.

a) **Tầng đầu:** là mạch vi sai căn bản mà ta đã khảo sát bên trên.

b) **Các tầng giữa:** các tầng giữa có thể là vi sai hay đơn cực.

\* *Mắc nối tiếp vi sai với vi sai:* sơ đồ mạch mắc nối tiếp vi sai với vi sai được trình bày trong hình sau:



Hình 10.4: Mắc nối tiếp vi sai với vi sai

Tuy nhiên đối với mạch này thì tổng trở vào của tầng vi sai thứ 2 có thể làm mất cân bằng tổng trở ra của tầng vi sai trước. Tầng sau không cần dùng nguồn dòng điện.

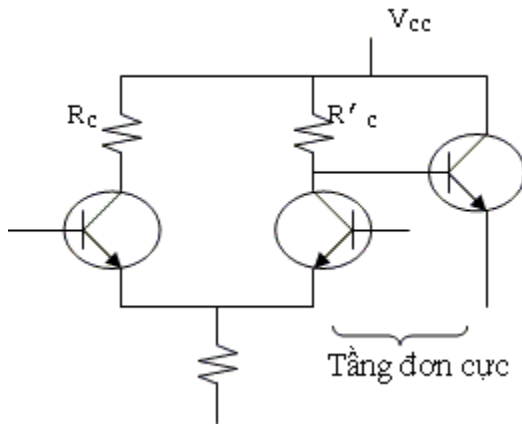
\* *Mắc vi sai nối tiếp với đơn cực:*

Người ta thường dùng tầng đơn cực để:

- Dễ sử dụng.
- Dễ tạo mạch công suất.

Nhưng mạch đơn cực sẽ làm phát sinh một số vấn đề mới:

- Làm mất cân bằng tầng vi sai, nên hai điện trở  $R_C$  của tầng vi sai đôi khi phải có trị số khác nhau để bù trừ cho sự mất cân bằng.



Trong đó:

$$R_C = R'_C // Z_V$$

Với:  $Z_V$  là tổng trở vào của tầng đơn cực.

Hình 10.5

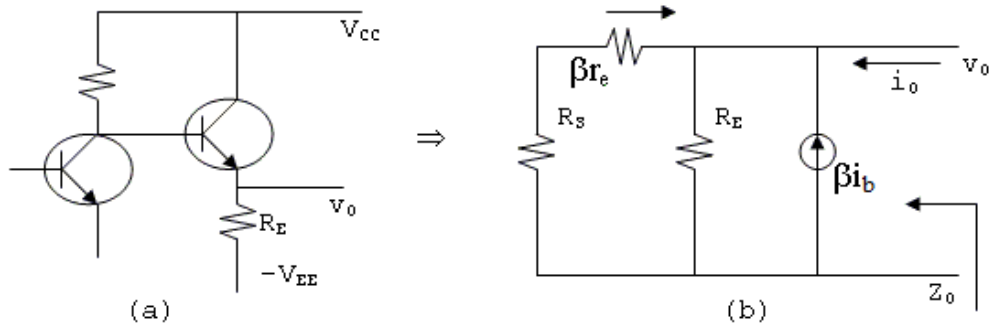
### c) Tầng cuối:

Phải thỏa mãn các điều kiện:

- Cho một tổng trở ra thật nhỏ.
- Điện thế phân cực tại ngõ ra bằng 0 volt khi hai ngõ vào ở 0 volt.

\* Điều kiện về tổng trở ra:

Để được tổng trở ra nhỏ, người ta thường dùng mạch cực thu chung.



Hình 10.6

Để tính tổng trở ra ta dùng mạch tương đương **hình 10.6(b)**, trong đó  $R_S$  là tổng trở ra của tầng (đơn cực) đứng trước.

Ta có:

$$Z_o = \frac{v_o}{i_o}$$

Phân giải mạch ta tìm được:

$$Z_o = \frac{v_o}{i_o} = \frac{R_E(R_S + \beta r_e)}{R_E(1 + \beta) + \beta r_e + R_S}$$

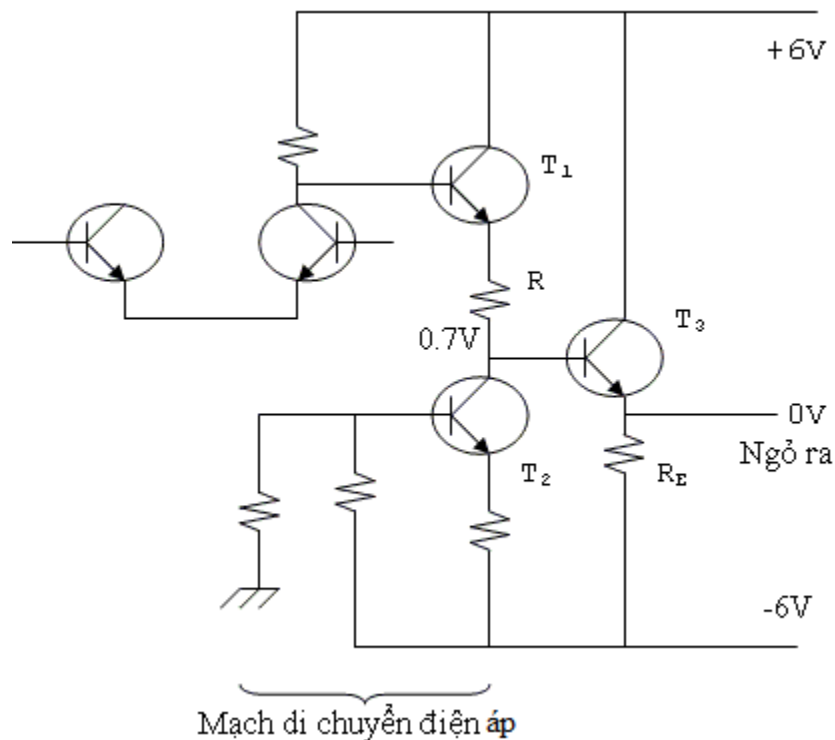
Thông thường  $\beta R_E$  rất lớn nên:

$$Z_o = \frac{v_o}{v_i} \approx r_e + \frac{R_s}{\beta}$$

\* *Điều kiện về điện áp phân cực:*

Vì các tầng được mắc trực tiếp với nhau nên điện áp phân cực ngõ ra của tầng cuối có thể không ở 0 volt khi ngõ vào ở 0 volt. Để giải quyết người ta dùng mạch di chuyển điện áp (Level shifting network) gồm có: một nguồn dòng điện I và một điện trở R sao cho:  $E = R.I$ , trong đó E là điện áp phân cực ngõ ra (khác 0 volt) của tầng cuối. Tuy nhiên, như vậy tổng trở ra sẽ tăng thêm một trị số là R. Vì vậy để thoả mãn cả hai điều kiện, người ta dùng mạch di chuyển điện áp trước một tầng cực thu chung.

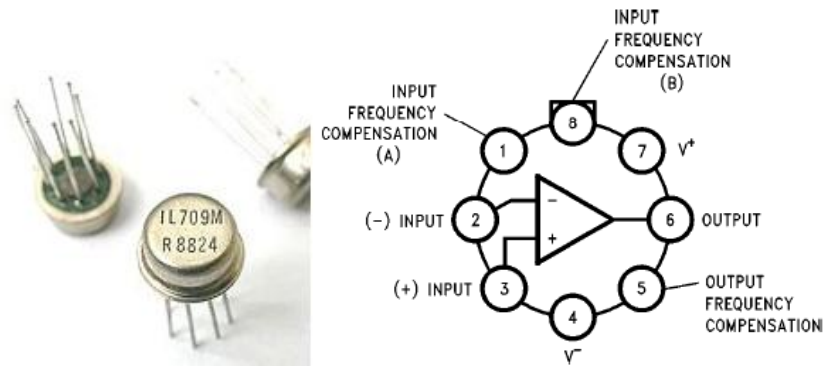
Ta có sơ đồ mạch của tầng cuối như sau:



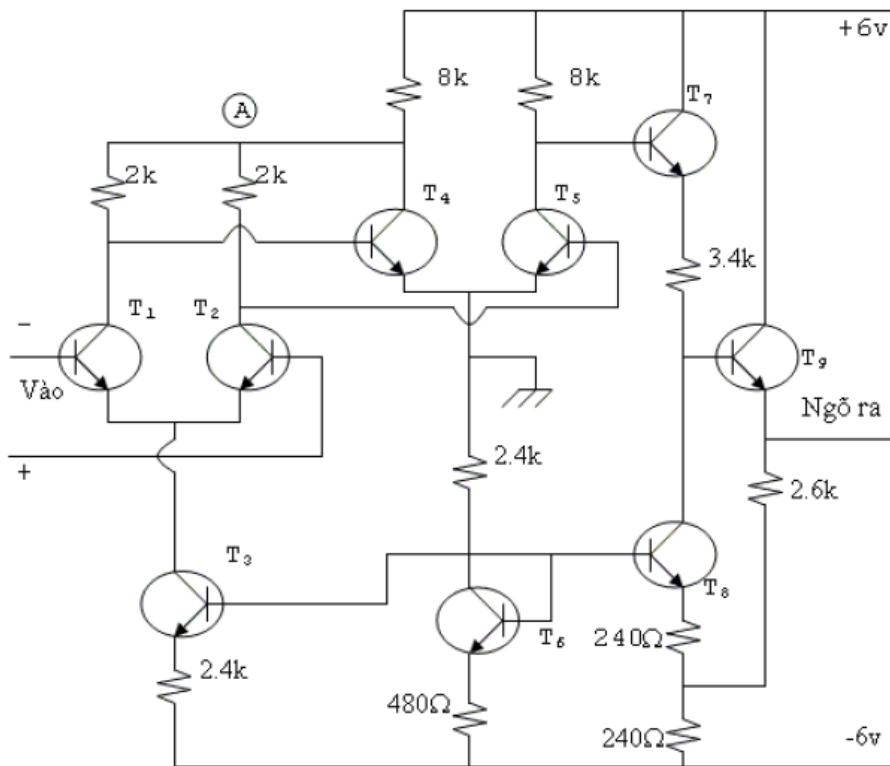
Hình 10.7

Trong đó R và T<sub>2</sub> là mạch di chuyển điện áp, T<sub>3</sub> là tầng cực thu chung để cho tổng trở ra nhỏ.

Ví dụ một op-amp  $\mu$ pc 709 của hãng Fairchild:



Hình 10.8: Sơ đồ chân của op-amp  $\mu$ pc 709



Hình 10.9: Sơ đồ mạch của op-amp  $\mu$ pc 709

$T_1, T_2$ : Mạch vi sai căn bản ngõ vào.

$T_3$ : Nguồn dòng điện cho  $T_1$  và  $T_2$ . Điện áp phân cực tại cực nền của  $T_3$  được xác định bởi cầu phân áp gồm  $T_6$  (mắc thành diode), điện trở  $480\Omega$  và  $2.4k\Omega$ .

$T_4, T_5$ : không phải là vi sai vì 2 chân E nối mass.  $T_4$  có nhiệm vụ ổn định điện áp tại điểm A cho  $T_1$  và  $T_2$ .

$T_5$ : Là tầng đơn cực chuyển tiếp giữa vi sai và tầng cuối.

$T_7$ : Là mạch cực thu chung đầu tiên và  $T_8$  là mạch di chuyển điện áp với điện trở  $3.4k$ .

$T_9$ : Là mạch cực thu chung cũng là tầng cuối để đạt được tổng trở ra nhỏ.

## 10.2 Mạch khuếch đại thuật toán căn bản

Ta khảo sát khuếch đại thuật toán (operational amplifier hay op-amp) ở trạng thái lý tưởng. Sau đây là các đặc tính của một op-amp lý tưởng:

- Độ lợi vòng hở A (open loop gain) bằng vô cực.
- Băng tần rộng từ 0Hz đến vô cực.
- Tổng trở vào bằng vô cực.
- Tổng trở ra bằng 0.
- Các hệ số  $\lambda$  bằng vô cực.
- Khi ngõ vào ở 0 volt, ngõ ra luôn ở 0 volt.

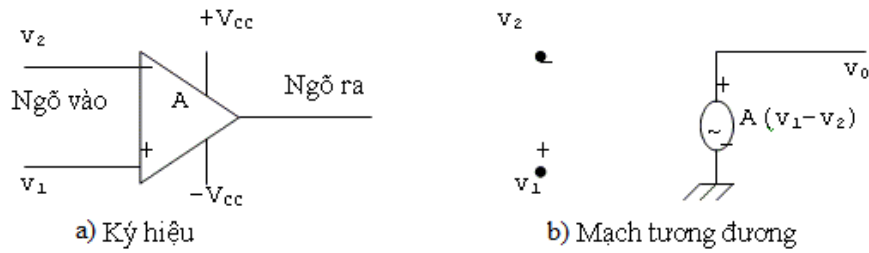
Để đơn giản trong việc tính toán trên op-amp, có thể tính toán trên op-amp lý tưởng sau đó thực hiện bổ chính các thông số trong mạch. Để có được một cái nhìn tổng quan giữa op-amp thực tế và op-amps lý tưởng, có thể so sánh một vài thông số giữa op-amp lý tưởng và op-amp thông dụng (general purpose) như bảng sau:

| Op-amps lý tưởng  | Op-amps thực tế (*)  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Độ lợi vô cùng lớn</li><li>▪ Tổng trở ngõ vào <math>\rightarrow \infty</math></li><li>▪ Tổng trở ngõ ra = 0</li><li>▪ Băng thông <math>\rightarrow \infty</math></li><li>▪ Dòng vào tĩnh = 0</li><li>▪ Dòng vào lệch = 0</li><li>▪ Điện áp lệch: <math>V_{\text{offset}} = 0</math></li><li>▪ Slew Rate: SR <math>\rightarrow \infty</math></li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Độ lợi 100.000 ÷ 200.000</li><li>▪ Tổng trở vào <math>10^6 \div 10^{13} \Omega</math></li><li>▪ Tổng trở ngõ ra nhỏ</li><li>▪ Băng thông hữu hạn</li><li>▪ Dòng vào tĩnh nhỏ</li><li>▪ Dòng vào lệch: 20 <math>\rightarrow</math> 30nA</li><li>▪ Điện áp lệch: 2 <math>\rightarrow</math> 10mV</li><li>▪ Slew Rate: 0.7 <math>\rightarrow</math> 100V/ms</li></ul> |

(\*) Trên thực tế có những op-amps được chế tạo với mục đích chuyên dụng (trong kỹ thuật hàng không vũ trụ, quân sự, y tế, công nghiệp ...), các đặc tính của nó rất gần với đặc tính của op-amps lý tưởng.

Bộ op-amp chỉ có một đầu ra duy nhất, hai đầu vào cấp nguồn và các chân bù điện áp, bù tần số, ... thông thường bộ op-amp là IC có 8 chân. Hình bên dưới là ký hiệu và mạch tương đương của op-amp.





Hình 10.10: Ký hiệu và mạch tương đương của op-amp

Từ các đặc tính trên ta thấy:

$$A = \frac{v_o}{v_1 - v_2} \rightarrow \infty \text{ nên khi } v_o \text{ xác định và chưa bão hoà thì } v_1 = v_2$$

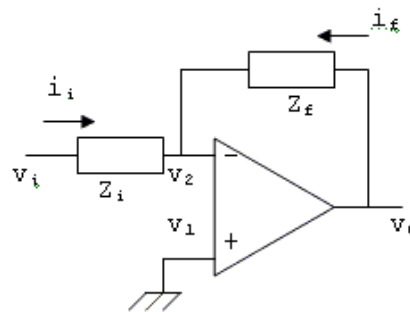
$Z_i \rightarrow \infty$  nên không có dòng điện chạy vào op-amp từ các ngõ vào.

$Z_o \rightarrow 0\Omega$  nên ngõ ra  $v_o$  không bị ảnh hưởng khi mắc tải.

Vì  $A$  rất lớn nên phải dùng op-amp với hồi tiếp âm. Với hồi tiếp âm, ta có hai dạng mạch khuếch đại căn bản sau:

### 10.2.1 Mạch khuếch đại đảo (Inverting Amplifier):

Dạng mạch căn bản như sau:



Hình 10.11: Mạch khuếch đại đảo

$Z_i, Z_f$  có thể có bất kỳ dạng nào.

Tín hiệu đưa vào ngõ vào (-)

$V_i$  có thể xoay chiều hoặc một chiều

Do op-amp lý tưởng nên:  $v_1 = v_2 = 0$

$$i_i = -i_f \Rightarrow \frac{v_i}{Z_i} = -\frac{v_o}{Z_f}$$

Suy ra độ lợi điện áp của mạch:

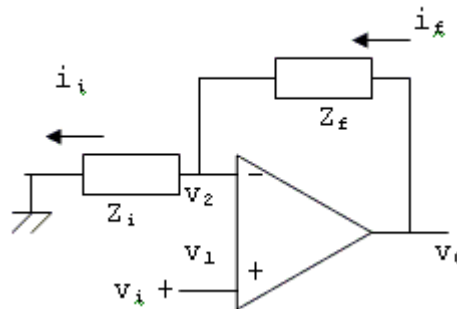
$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{Z_f}{Z_i}$$

**Nhận xét:**

- Khi  $Z_f$  và  $Z_i$  là điện trở thuần thì  $v_o$  và  $v_i$  sẽ lệch pha  $180^\circ$  (nên được gọi là mạch khuếch đại đảo và ngõ vào ( - ) được gọi là ngõ vào đảo).
- $Z_f$  đóng vai trò mạch hồi tiếp âm.  $Z_f$  càng lớn (hồi tiếp âm càng nhỏ) độ khuếch đại của mạch càng lớn.
- Khi  $Z_f$  và  $Z_i$  là điện trở thuần thì op-amp có tính khuếch đại cả điện thế một chiều.

### 10.2.2 Mạch khuếch đại không đảo (Non inverting Amplifier)

Dạng mạch căn bản như sau.



Hình 10.12: Mạch khuếch đại không đảo

Ta có:  $v_1 = v_2 = v_i$  và  $i_f = i_i$

$$i_f = \frac{v_o - v_2}{Z_f}$$

$$i_i = \frac{v_2}{Z_i} \Rightarrow \frac{v_o - v_2}{Z_f} = \frac{v_2}{Z_i}$$

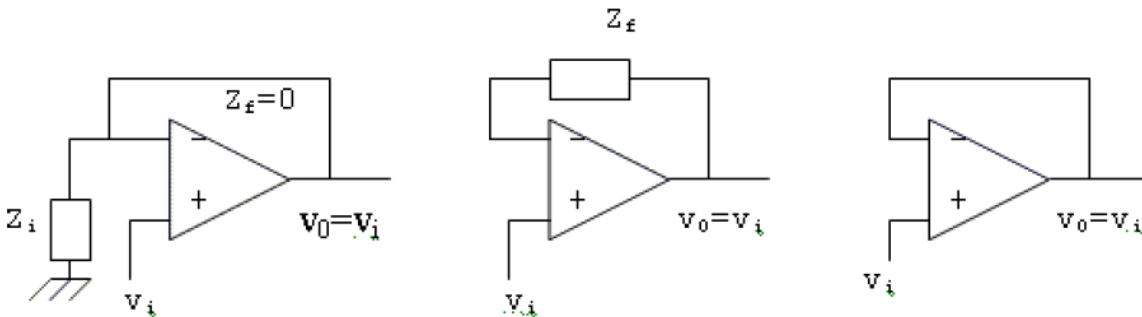
Suy ra:

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = 1 + \frac{Z_f}{Z_i}$$

**Nhận xét:**

- $Z_f, Z_i$  có thể có bất kỳ dạng nào.
- $v_o$  và  $v_i$  cũng có thể có bất kỳ dạng nào.

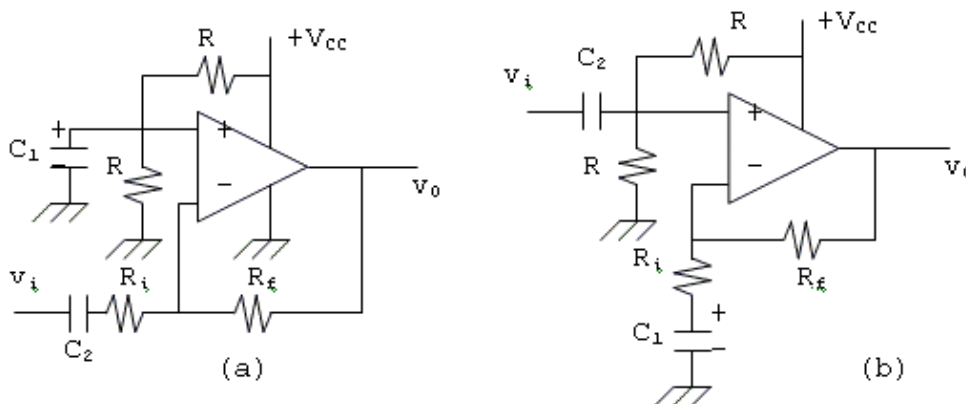
- Khi  $Z_f, Z_i$  là điện trở thuần thì ngõ ra  $v_o$  sẽ có cùng pha với ngõ vào  $v_i$  (nên mạch được gọi là mạch khuếch đại không đảo và ngõ vào  $(+)$  được gọi là ngõ vào không đảo).
- $Z_f$  cũng đóng vai trò hồi tiếp âm. Để tăng độ khuếch đại  $A_v$ , ta có thể tăng  $Z_f$  hoặc giảm  $Z_i$ .
- Mạch khuếch đại cả tín hiệu một chiều khi  $Z_f$  và  $Z_i$  là điện trở thuần. Mạch cũng giữ nguyên tính chất không đảo và có cùng công thức với trường hợp của tín hiệu xoay chiều.
- Khi  $Z_f=0$ , ta có:  $A_v=1 \Rightarrow v_o=v_i$  hoặc  $Z_i=\infty$  ta cũng có  $A_v=1$  và  $v_o=v_i$  (hình 10.13). Lúc này mạch được gọi là mạch theo điện áp (voltage follower) thường được dùng làm mạch đệm (buffer) vì có tổng trở vào lớn và tổng trở ra nhỏ như mạch cực thu chung ở BJT.



Hình 10.13: Mạch theo điện áp (voltage follower)

### 10.2.3 Op-amp phân cực bằng nguồn đơn

Phần trên là các đặc tính và hai mạch khuếch đại căn bản được khảo sát khi op-amp được phân cực bằng nguồn đối xứng. Thực tế, để tiện trong thiết kế mạch và sử dụng, khi không cần thiết thì op-amp được phân cực bằng nguồn đơn. Lúc bấy giờ chân nối với nguồn âm  $-V_{CC}$  được nối mass. Hai dạng mạch khuếch đại căn bản như sau:



Hình 10.14: Mạch op-amp phân cực bằng nguồn đơn

Người ta phải phân cực một ngõ vào (thường là ngõ vào +) để điện áp phân cực ở hai ngõ vào lúc này là  $V_{CC}/2$  và điện áp phân cực ở ngõ ra cũng là  $V_{CC}/2$ . Hai điện trở  $R$  phải được chọn khá lớn để tránh làm giảm tổng trở vào của op-amp. Khi đưa tín hiệu vào phải qua tụ liên lạc ( $C_2$  trong mạch) để không làm lệch điện áp phân cực. Như vậy, khi phân cực bằng nguồn đơn, op-amp mất tính chất khuếch đại tín hiệu một chiều. Trong **hình 10.14(a)**, mạch khuếch đại đảo,  $C_1$  là tụ lọc điện áp phân cực ở ngõ vào (+). Trong **hình 10.14(b)**, mạch khuếch đại không đảo,  $C_1$  dùng để tạo hồi tiếp xoay chiều cho mạch và giữ điện áp phân cực ở ngõ vào (-) là  $V_{CC}/2$ . Độ khuếch đại của mạch vẫn không đổi.

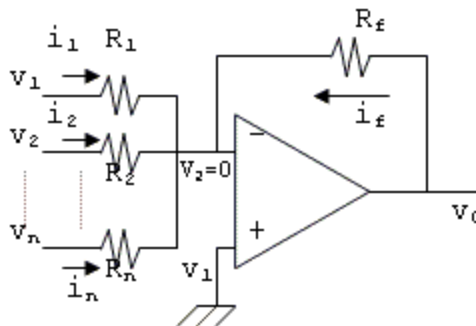
### 10.3 Một số ứng dụng của op-amp

#### 10.3.1 Mạch làm toán

Đây là các mạch điện tử đặc biệt trong đó sự liên hệ giữa điện áp ngõ vào và ngõ ra là các phương trình toán học đơn giản.

##### a/ Mạch cộng:

Sơ đồ mạch cộng như sau:



Hình 10.15: Sơ đồ mạch cộng

Từ mạch trên ta có các dòng điện chạy qua các điện trở là:

$$i_1 = \frac{V_1}{R_1}; i_2 = \frac{V_2}{R_2}; \dots; i_n = \frac{V_n}{R_n}$$

Tổng các dòng điện này chạy qua  $R_f$  và tạo thành  $v_o$  nên ta có:

$$v_o = -R_f \left( \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \dots + \frac{V_n}{R_n} \right)$$

Suy ra :

$$v_o = \sum_{j=1}^n k_j v_j$$

Trong đó:

$$k_1 = -\frac{R_f}{R_1}; k_2 = -\frac{R_f}{R_2}; \dots; k_n = -\frac{R_f}{R_n}$$

Nếu:  $R_f = R_1 = R_2 = \dots = R_n$  thì ta có:

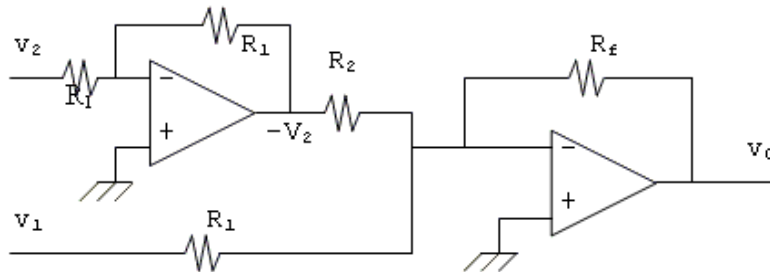
$$v_o = -\sum_{j=1}^n v_j$$

Tín hiệu ngõ ra bằng tổng các tín hiệu ngõ vào nhưng ngược pha. Ta chú ý  $v_i$  là một điện áp bất kỳ có thể là một chiều hoặc xoay chiều.

#### b/ Mạch trừ:

Ta có 2 cách tạo mạch trừ.

**\*Trừ bằng phương pháp đổi dấu:** Để trừ một số, ta cộng với số đối của số đó.



Hình 10.16: Mạch trừ bằng phương pháp đổi dấu

Từ mạch trên ta thấy rằng: đầu tiên  $v_2$  được làm đảo rồi cộng với  $v_1$ . Do đó theo mạch ta có:

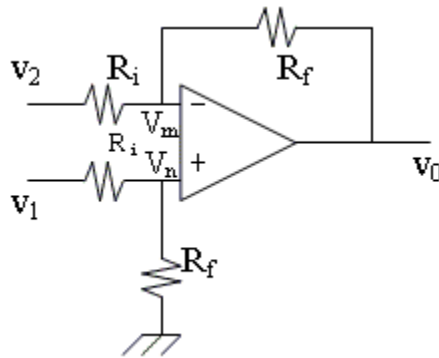
$$v_o = -\left[ \frac{R_f}{R_1} v_1 + \left( -\frac{R_f}{R_2} \right) v_2 \right]$$

Nếu ta chọn  $R_f = R_1 = R_2$ , ta được:

$$v_o = -(v_1 - v_2)$$

Như vậy ta thấy tín hiệu ở ngõ ra là hiệu của hai tín hiệu ngõ vào nhưng đổi dấu.

\* **Trừ bằng mạch vi sai:** Dạng mạch cơ bản như sau



Hình 10.17: Mạch trừ bằng mạch vi sai

Ta có:

$$V_m = V_n = v_1 \cdot \frac{R_f}{R_f + R_i}$$

Dòng điện vào từ  $v_2$  qua  $R_i$  sẽ qua  $R_f$  nên:

$$\frac{v_2 - V_m}{R_i} = \frac{V_m - v_o}{R_f}$$

Thay trị số của  $V_m$  vào biểu thức trên ta tìm được:

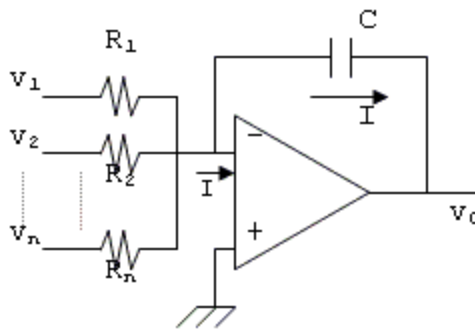
$$v_o = \frac{R_f}{R_i} (v_1 - v_2)$$

Nếu  $R_f = R_i$ , ta có:  $v_o = (v_1 - v_2)$

Như vậy ta thấy rằng tín hiệu ở ngõ ra là hiệu của hai tín hiệu ngõ vào.

### c/ **Mạch tích phân:**

Dạng mạch tích phân như sau:



Hình 10.18: Mạch tích phân

Ta có dòng điện ngõ vào:

$$I = \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \dots + \frac{V_n}{R_n}$$

Dòng điện này nạp vào tụ C và tạo ra  $v_o$

$$v_o = -\frac{1}{C} \int_0^t I dt = -\frac{1}{C} \int_0^t \left( \frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \dots + \frac{V_n}{R_n} \right) dt$$

Hay

$$v_o = -\int_0^t \left( \frac{1}{R_1 C} \cdot V_1 + \frac{1}{R_2 C} \cdot V_2 + \dots + \frac{1}{R_n C} \cdot V_n \right) dt$$

Suy ra

$$v_o = -\int_0^t \sum_{j=1}^n k_j \cdot v_j \cdot dt$$

Với  $k_j$  là độ lợi của các ngõ vào:

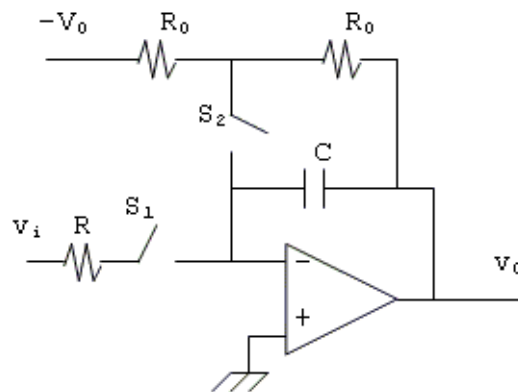
$$k_j = \frac{1}{CR_j}$$

Đặc biệt khi  $R_1=R_2=\dots=R_n=R$  thì ta được:

$$v_o = -\frac{1}{RC} \int_0^t \sum_{j=1}^n v_j \cdot dt$$

\* Hai vấn đề thực tế:

- Điều kiện ban đầu hay hằng số tích phân: ta có dạng mạch căn bản như sau



Hình 10.19: Mạch tích phân với hằng số tích phân

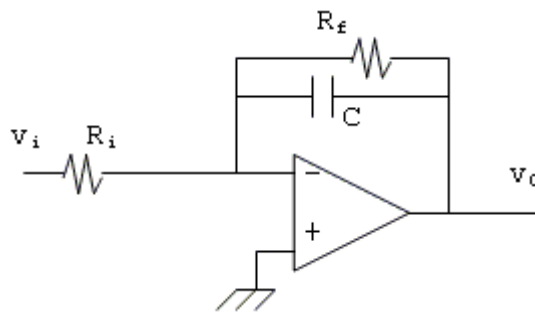
Trước hết khoá  $S_1$  hở, khoá  $S_2$  đóng, tụ  $C$  sẽ nạp điện. Ngõ ra sẽ tăng từ 0 lên đến trị số  $V_o$  (lưu ý sự đổi dấu). Sau đó  $S_2$  được mở ra và  $S_1$  đóng kín tụ  $C$  vẫn giữ trị số này vì không có lối thoát. Mạch này thành mạch lấy tích phân của  $v_i$ .

Do đó:

$$v_o = -\int \frac{1}{RC} v_i dt + V_o$$

Với  $V_o$  là điều kiện ban đầu hay hằng số lấy tích phân.

- Trừ điện thế offset: ta có dạng mạch căn bản như sau



Hình 10.20: Mạch tích phân với trừ điện thế offset

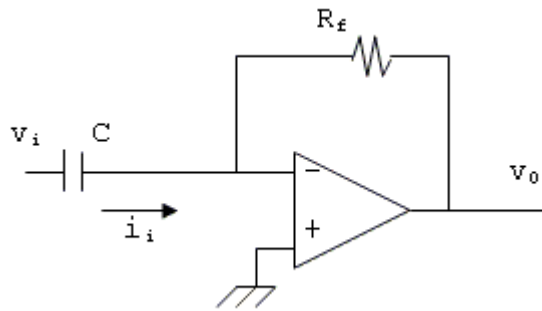
Với các op-amp có điện thế offset lớn ở ngõ ra (điện thế ngõ ra khi ngõ vào bằng 0V),  $v_o$  sẽ chịu một sai số đáng kể. Để khắc phục tình trạng này, một điện trở  $R_f$  được mắc song song với tụ điện  $C$  để tạo hồi tiếp âm cho tần số thấp. Như vậy khi có  $R_f$ , mạch chỉ có tính tích phân khi tần số của tín hiệu  $f$  thoả:

$$f > \frac{1}{2\pi R_f \cdot C} \text{ trong đó } R_f \text{ không được quá lớn vì sự hồi tiếp âm sẽ yếu.}$$

#### **d/ Mạch vi phân**

Dạng mạch vi phân như sau:





Tín hiệu vi nạp vào tụ C bằng dòng điện  $i_i$

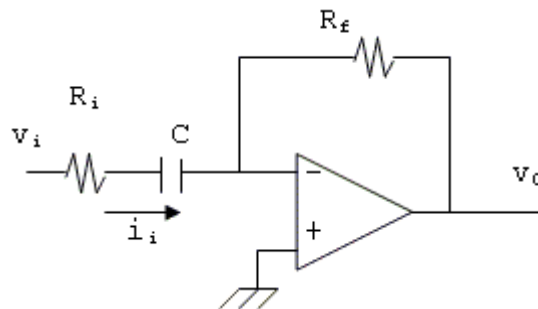
có trị số:  $i_i = C \cdot \frac{dv_i}{dt}$

Đây cũng chính là dòng điện chạy qua điện trở R, vậy:

$$v_o = -RC \cdot \frac{dv_i}{dt}$$

Hình 10.21: Mạch vi phân

Vấn đề thực tế là giảm tạp âm. Mạch đơn giản như trên ít được dùng trong thực tế vì có đặc tính khuếch đại tạp âm ở tần số cao, đây là do độ lợi của toàn mạch tăng theo tần số. Để khắc phục một phần nào, người ta mắc thêm một điện trở nối tiếp với tụ C ở ngõ vào như **hình 10.22**.



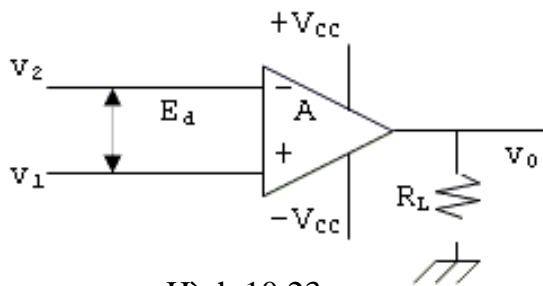
Hình 10.22

Lúc này mạch chỉ có đặc tính lấy vi phân tốt khi tần số của tín hiệu nhỏ hơn  $1/2\pi R_i C$ . Phải lựa chọn  $R_i$  sao cho để mạch giảm thiểu tối đa tạp âm mà điều kiện trên vẫn được thoả mãn.

### 10.3.2 Mạch so sánh

#### a/ Điện thế ngõ ra bảo hòa

Ta xem mạch như hình sau:



Hình 10.23

Ta có:  $v_0 = A(v_1 - v_2) = A E_d$

Với  $E_d = v_1 - v_2$

$E_d$  là điện thế khác nhau giữa 2 ngõ vào và được định nghĩa:

$E_d = (\text{điện thế ngõ vào } +) - (\text{điện thế ngõ vào } -)$ ;

Do mạch không có hồi tiếp âm nên:

$$v_0 = A E_d$$

Trong đó  $A$  là độ lợi vòng hở của op-amp. Vì  $A$  rất lớn nên theo công thức trên  $v_0$  rất lớn. Khi  $E_d$  nhỏ,  $v_0$  được xác định. Khi  $E_d$  vượt quá một trị số nào đó thì  $v_0$  đạt đến trị số bão hòa và được gọi là  $V_{Sat}$ . Trị số của  $E_d$  tùy thuộc vào mỗi op-amp và có trị số vào khoảng vài chục  $\mu V$ .

- Khi  $E_d$  âm, mạch đảo pha nên  $v_0 = -V_{Sat}$

- Khi  $E_d$  dương, tức  $v_1 > v_2$  thì  $v_0 = +V_{Sat}$

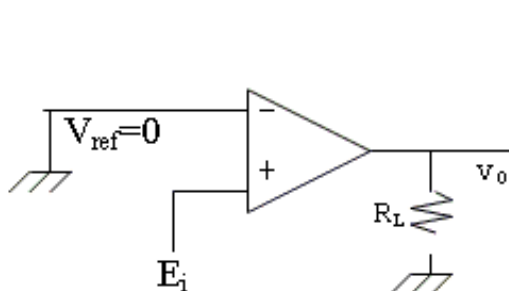
Điện áp ngõ ra bão hòa thường nhỏ hơn điện áp nguồn từ 1 volt đến 2 volt. Để ý là  $|+V_{Sat}|$  có thể khác  $|-V_{Sat}|$ . Như vậy ta thấy điện áp  $E_d$  tối đa là:

$$+ E_{dmax} = \frac{+ V_{Sat}}{A}$$

$$- E_{dmax} = \frac{- V_{Sat}}{A}$$

### b/ Mạch so sánh mức 0 (tách mức zero)

\* So sánh mức zero không đảo: ta có dạng mạch cơ bản như sau:



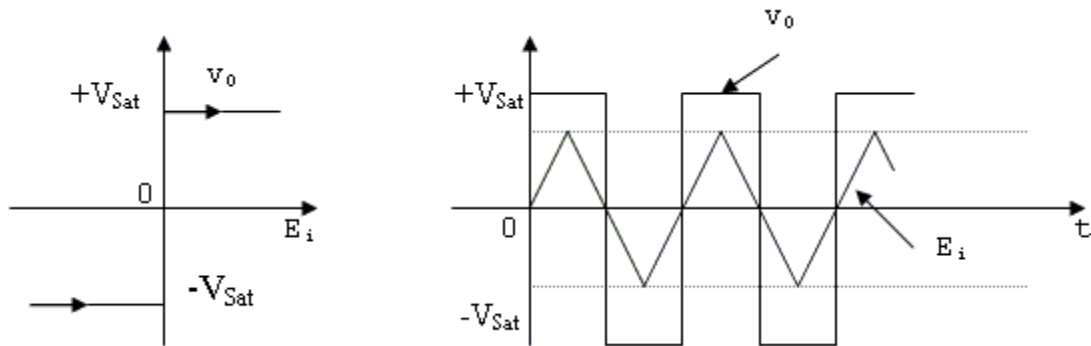
Hình 10.24

Điện thế ở ngõ vào (-) được dùng làm điện thế chuẩn và  $E_i$  là điện thế muốn đem so sánh với điện thế chuẩn được đưa vào ngõ vào (+).

Khi  $E_i > V_{ref} = 0V$  thì  $v_0 = +V_{Sat}$

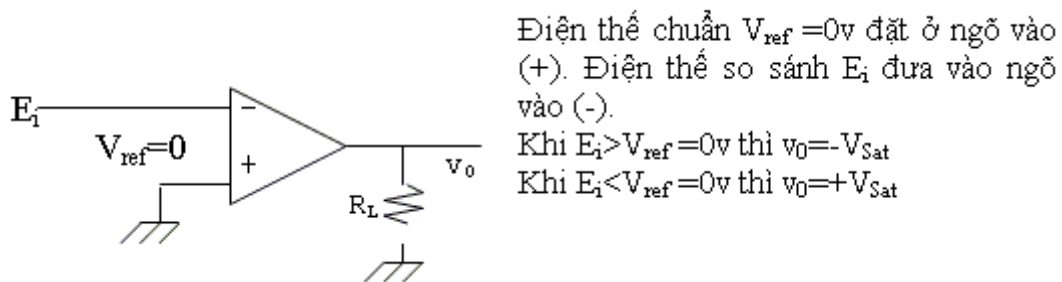
Khi  $E_i < V_{ref} = 0V$  thì  $v_0 = -V_{Sat}$

Ví dụ khi  $E_i$  có dạng tam giác thì dạng sóng ngõ ra  $v_o$  có dạng như hình sau:

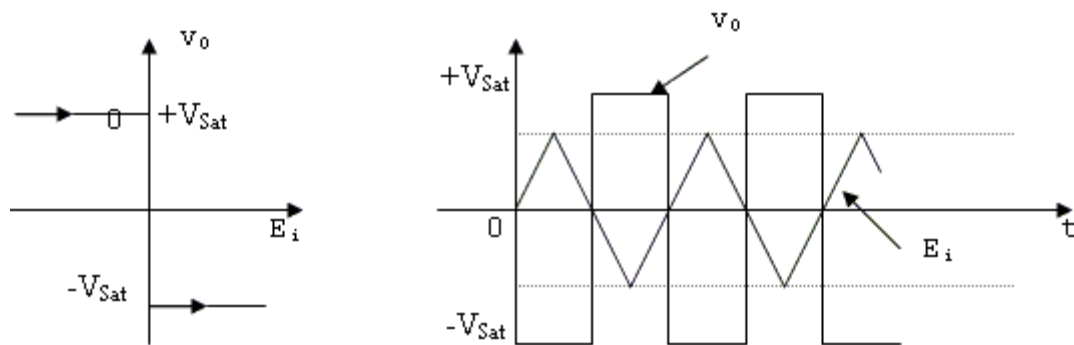


Hình 10.25

\* **Mạch so sánh mức zero đảo:** ta có dạng mạch cơ bản như sau:



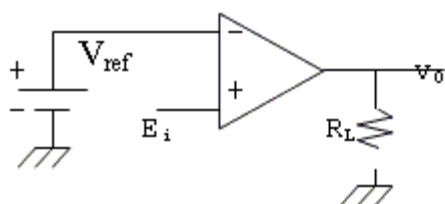
Hình 10.26



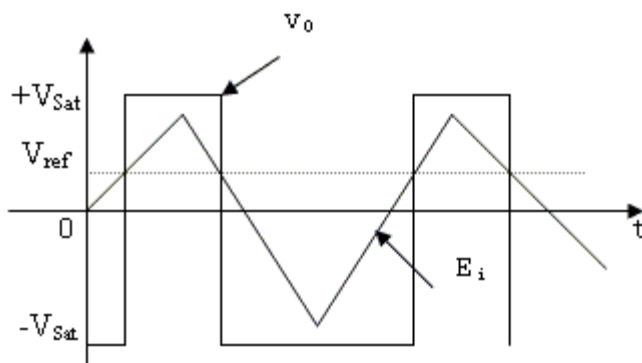
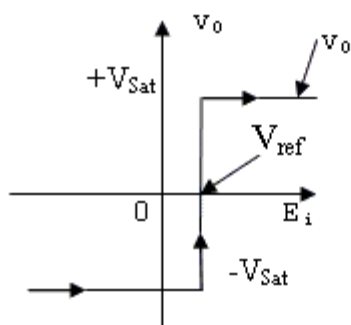
Hình 10.27

c/Mạch so sánh với 2 ngõ vào có điện thế bất kỳ

\* **So sánh mức dương không đảo:**

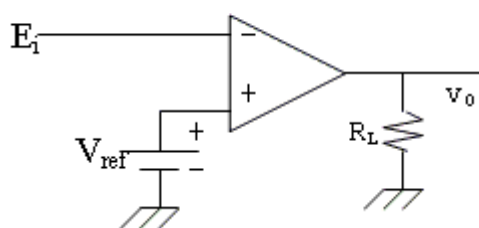


Điện thế chuẩn  $V_{ref} > 0V$  đặt ở ngõ vào (-).  
 Điện thế so sánh  $E_i$  đưa vào ngõ vào (+).  
 Khi  $E_i > V_{ref}$  thì  $v_0 = +V_{Sat}$   
 Khi  $E_i < V_{ref}$  thì  $v_0 = -V_{Sat}$



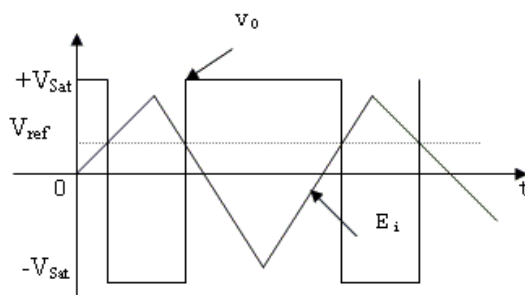
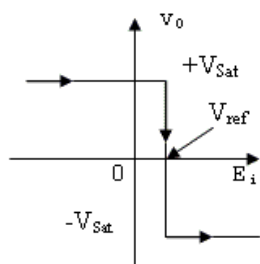
Hình 10.28

**\* So sánh mức dương đảo:**



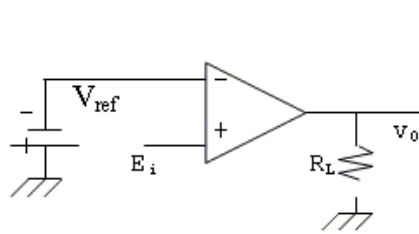
Điện thế chuẩn  $V_{ref} > 0V$  đặt ở ngõ vào (+).  
 Điện thế so sánh  $E_i$  đưa vào ngõ vào (-).  
 Khi  $E_i > V_{ref}$  thì  $v_0 = -V_{Sat}$   
 Khi  $E_i < V_{ref}$  thì  $v_0 = +V_{Sat}$

Hình 10.29

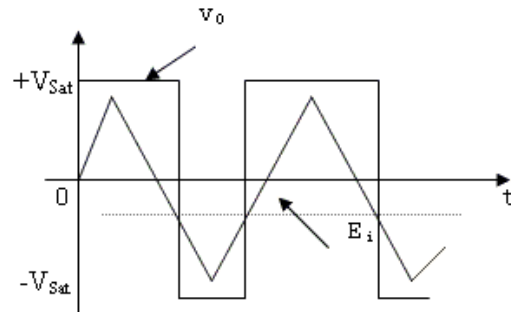
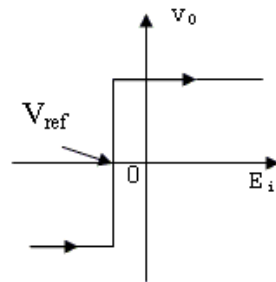


Hình 10.30

**\* So sánh mức âm không đảo:**

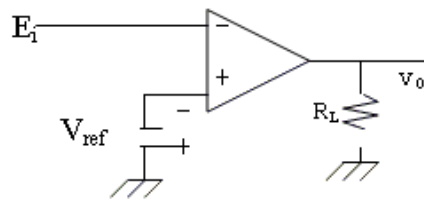


Điện thế chuẩn  $V_{ref} < 0v$  đặt ở ngõ vào (-).  
 Điện thế so sánh  $E_i$  đưa vào ngõ vào (+).  
 Khi  $E_i > V_{ref}$  thì  $v_0 = +V_{Sat}$   
 Khi  $E_i < V_{ref}$  thì  $v_0 = -V_{Sat}$

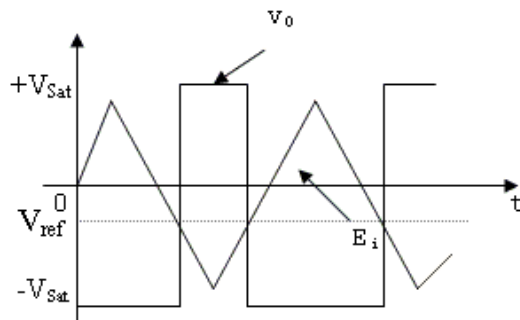
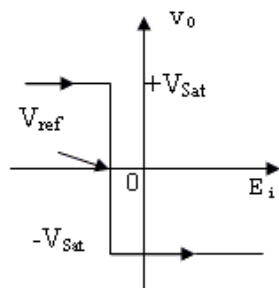


Hình 10.31

**\* So sánh mức âm đảo:**

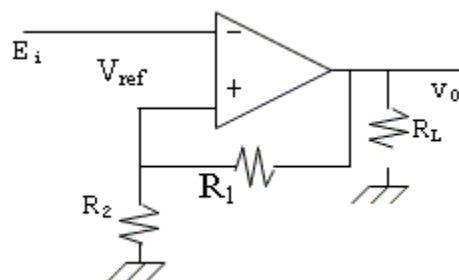


Điện thế chuẩn  $V_{ref} < 0v$  đặt ở ngõ vào (+). Điện thế so sánh  $E_i$  đưa vào ngõ vào (-).  
 Khi  $E_i > V_{ref}$  thì  $v_0 = +V_{Sat}$   
 Khi  $E_i < V_{ref}$  thì  $v_0 = -V_{Sat}$



**d/ Mạch so sánh với hồi tiếp dương**

**\* Mạch đảo:**



Tín hiệu so sánh  $E_i$  được đưa vào ngõ vào (-). Điện áp chuẩn  $V_{ref}$  được lấy từ một phần của điện áp ngõ ra  $v_o$  qua cầu phân áp  $R_1, R_2$ . Các điện trở  $R_1, R_2$  như vậy còn đóng vai trò một hồi tiếp dương nên  $v_o$  luôn luôn ở trạng thái bão hòa. Tùy theo mức tín hiệu vào mà  $v_o$  giao hoán ở một trong hai trạng thái  $+V_{Sat}$  và  $-V_{Sat}$ .

Ta có:

$$V_{ref} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot v_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{Sat} = \beta V_{Sat}$$

Trong đó  $\beta$  được gọi là tỉ số hồi tiếp dương:

$$\beta = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Nếu ta tăng  $E_i$  từ từ, ta nhận thấy:

Khi  $E_i < V_{ref}$  thì  $v_o = +V_{Sat}$

Khi  $E_i > V_{ref}$  thì  $v_o = -V_{Sat}$

Trị số của  $E_i = V_{ref} = \beta \cdot (+V_{Sat})$  làm cho mạch bắt đầu đổi trạng thái được gọi là điểm nảy trên (upper trigger point) hay điểm thêm trên (upper threshold point).

$$V_{UTP} = \beta \cdot (+V_{Sat})$$

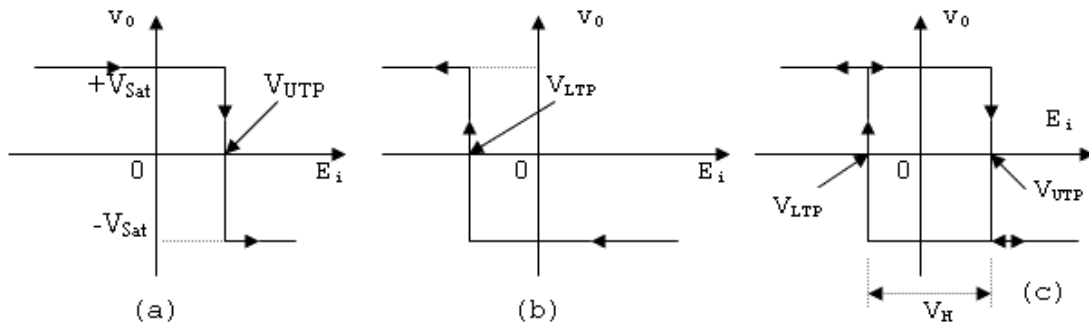
Bây giờ nếu ta giảm  $E_i$  từ từ, chú ý là lúc này  $v_o = -V_{Sat}$  và  $V_{ref} = \beta(-V_{Sat})$ , ta thấy khi  $E_i < \beta(-V_{Sat})$  thì  $v_o$  chuyển sang trạng thái  $+V_{Sat}$ . Trị số của  $E_i$  lúc này:  $E_i = V_{ref} = \beta(-V_{Sat})$  được gọi là điểm nảy dưới hay điểm thêm dưới (lower trigger point-lower threshold point- $V_{LTP}$ ). Như vậy chu trình trạng thái của mạch như hình bên dưới.

Người ta định nghĩa:

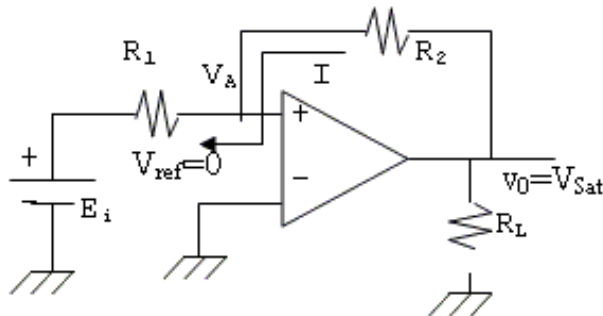
$$V_H = (\text{Hysteresis}) = V_{UTP} - V_{LTP}$$

$$V_H = \beta \{ (+V_{Sat}) - (-V_{Sat}) \}$$

$$\text{Nếu } |+V_{Sat}| = |-V_{Sat}| \Rightarrow V_H = |2\beta \cdot V_{Sat}|$$



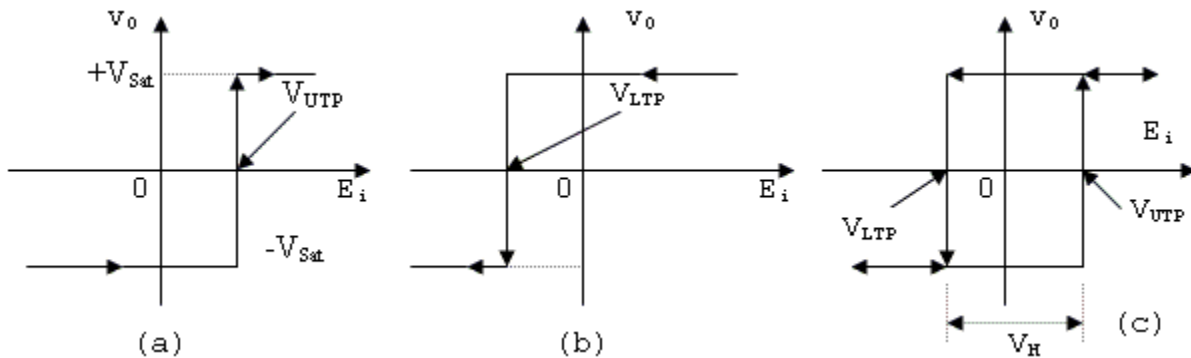
\* **Mạch không đảo:** Dạng mạch như sau



Thay đổi  $E_i$  ta nhận thấy:

- Khi  $V_A < V_{ref} = 0$  thì  $v_0 = -V_{Sat}$
- Khi  $V_A$  bắt đầu lớn hơn 0 volt, mạch đổi trạng thái và  $v_0 = +V_{Sat}$ . Trị số  $E_i$  khi  $v_0$  bắt đầu đổi trạng thái được gọi là điểm này trên  $V_{UTP}$ .

Bây giờ nếu ta giảm  $E_i$  ( $v_0$  đang là  $+V_{Sat}$ ), khi  $V_A$  bắt đầu nhỏ hơn  $V_{ref} = 0V$  thì  $v_0$  đổi trạng thái và bằng  $-V_{Sat}$ . Trị số của  $E_i$  lúc này gọi là điểm này dưới  $V_{LTP}$ .



Tính  $V_{UTP}$  và  $V_{LTP}$

Ta có:  $V_A = V_{Sat} - R_2 I$

$$\text{Và: } I = \frac{V_{Sat} - E_i}{R_1 + R_2}$$

$$\text{Vậy: } V_A = V_{Sat} - \frac{V_{Sat} - E_i}{R_1 + R_2} \cdot R_2 = V_{Sat} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{Sat} + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot E_i$$

Phân biệt 2 trường hợp:

- Khi tăng  $E_i$  từ trị số thật âm lên, lúc đầu  $v_0 = -V_{Sat}$  nên:

$$V_A = (-V_{Sat}) - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot (-V_{Sat}) + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot E_i$$

Khi  $V_A = 0$  tức  $E_i = V_{UTP}$ ,  $v_0$  đổi trạng thái, ta suy ra:

$$V_{UTP} = -\frac{R_1}{R_2} (-V_{Sat}) > 0$$

- Khi giảm  $E_i$  từ trị số dương dần xuống, lúc này  $v_0 = +V_{Sat}$  nên:

$$V_A = (+V_{Sat}) - \frac{R_2}{R_1 + R_2} (+V_{Sat}) + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot E_i$$

Khi  $V_A = 0$ , tức  $E_i = V_{LTP}$ , mạch đổi trạng thái. Vậy:

$$(+V_{Sat}) \left(1 - \frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) + \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_{LTP} = 0$$

$$\Rightarrow V_{LTP} = -\frac{R_1}{R_2} (+V_{Sat}) < 0$$

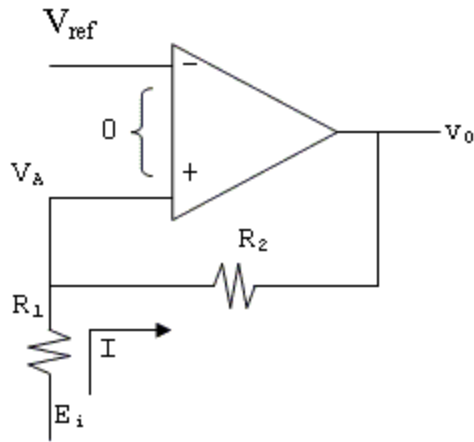
$$\text{Và: } V_H = V_{UTP} - V_{LTP} = \frac{R_1}{R_2} [(+V_{Sat}) - (-V_{Sat})]$$

Chú ý là  $|+V_{Sat}|$  có thể khác  $|-V_{Sat}|$

**e/ Mạch so sánh trong trường hợp 2 ngõ vào có điện thế bất kỳ với hồi tiếp dương**

**\*Dùng mạch không đảo:** Dạng mạch như sau





Khi  $V_A < V_{ref} \Rightarrow v_0 = -V_{Sat}$  và  $V_A = E_i - R_1 I$

$$\text{Với } I = \frac{E_i - v_0}{R_1 + R_2}$$

$$\text{Nên } V_A = E_i - R_1 \frac{E_i - v_0}{R_1 + R_2}$$

$$\text{Hay } V_A = E_i - \frac{R_1}{R_1 + R_2} E_i + \frac{R_1}{R_1 + R_2} v_0$$

Khi  $V_A = V_{ref}$  thì mạch đổi trạng thái ( $v_0$  đổi thành  $+V_{Sat}$ ), trị số của  $E_i$  lúc này gọi là điểm này trên  $V_{UTP}$ . Từ công thức  $V_A$  ta tìm được:

$$V_{UTP} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} V_{ref} - \frac{R_1}{R_2} (-V_{Sat})$$

Nếu chọn  $R_2 = nR_1$ , ta có:

$$V_{UTP} = \left(1 + \frac{1}{n}\right) V_{ref} - \frac{1}{n} (-V_{Sat})$$

- Ở trạng thái mới ( $v_0 = +V_{Sat}$ ), bây giờ ta giảm  $E_i$  thì khi  $V_A$  có trị số:

$$V_A = E_i - \frac{R_1}{R_1 + R_2} E_i - \frac{R_1}{R_2 + R_1} (+V_{Sat})$$

bằng  $V_{ref}$  thì mạch sẽ đổi trạng thái, trị số của  $E_i$  lúc này gọi là điểm này dưới  $V_{LTP}$ . Tương tự như trên ta tìm được:

$$V_{LTP} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} V_{ref} - \frac{R_1}{R_2} (+V_{Sat})$$

và nếu  $nR_1 = R_2$  thì:

$$V_{LTP} = \left(1 + \frac{1}{n}\right) V_{ref} - \frac{1}{n} (+V_{Sat})$$

từ đó:

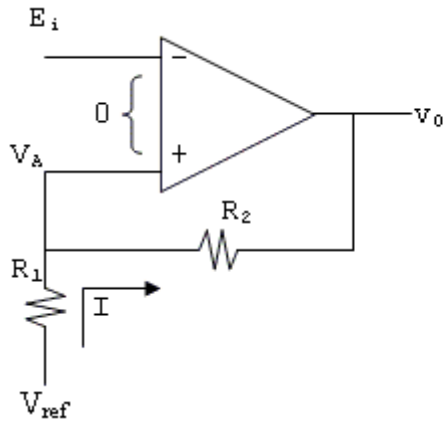
$$V_H = V_{UTP} - V_{LTP} = \frac{(+V_{Sat}) - (-V_{Sat})}{n}$$

Người ta thường định nghĩa trị số trung tâm là trị trung bình của  $V_{UTP}$  và  $V_{LTP}$ :

$$V_{\alpha} = \frac{V_{UTP} + V_{LTP}}{2} = \left(1 + \frac{1}{n}\right) V_{ref}$$

nếu  $|+V_{sat}| = |-V_{Sat}|$

\* **Dùng mạch đảo:** Dạng mạch căn bản như hình sau:



Khi  $E_i$  còn nhỏ hơn  $V_A$ ,  $v_0$  ở trạng thái  $+V_{Sat}$ .

Dòng điện  $I$  qua  $R_1, R_2$  có trị số:

$$I = \frac{V_{ref} - v_0}{R_1 + R_2}$$

Điện thế tại ngõ vào (+) là:

$$V_A = -R_1 I + V_{ref}$$

Nếu ta tăng  $E_i$  lên từ từ, khi  $E_i$  đạt đến trị số  $V_A$  thì mạch đổi trạng thái, trị số của  $E_i$  lúc đó, cũng là trị số của  $V_A$ , gọi là điểm nảy trên  $V_{UTP}$ .

$$V_{UTP} = -R_1 I + V_{ref}$$

$$= -R_1 \cdot \frac{V_{ref} - v_0}{R_1 + R_2} + V_{ref}$$

$$V_{UTP} = \left(1 - \frac{R_1}{R_1 + R_2}\right) V_{ref} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} (+V_{Sat})$$

$$\Rightarrow V_{UTP} = \frac{n}{1+n} V_{ref} + \frac{1}{1+n} (+V_{Sat})$$

Nếu chọn  $R_2 = nR_1$

- Ở trạng thái mới  $v_0 = -V_{Sat}$

$$\text{Dòng } I = \frac{V_{ref} - v_0}{R_1 + R_2} = \frac{V_{ref} - (-V_{Sat})}{R_1 + R_2}$$

$$V_A = -R_1 I + V_{ref} = -R_1 \frac{V_{ref} - (-V_{Sat})}{R_1 + R_2} + V_{ref}$$

Nếu ta giảm  $E_i$  từ từ, đến khi  $E_i = V_A$  mạch sẽ đổi trạng thái ( $v_0 = -V_{Sat}$ ) và  $E_i = V_A$  lúc đó có trị số là  $V_{LTP}$  (điểm nảy dưới).

$$\Rightarrow V_{LTP} = \left(1 - \frac{R_1}{R_1 + R_2}\right) V_{ref} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} (-V_{Sat})$$

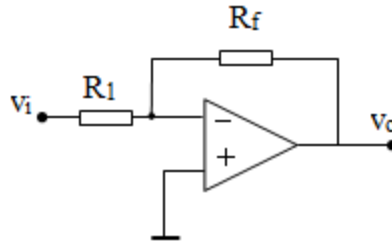
và nếu  $R_2 = nR_1$ , ta tìm được:

$$V_{LTP} = \frac{n}{1+n} V_{ref} + \frac{1}{1+n} (-V_{Sat})$$

## Bài tập

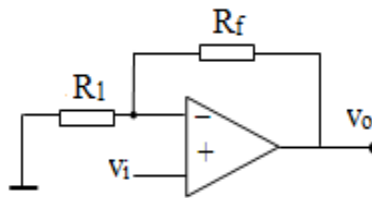
Bài 1: Cho mạch điện như hình sau, với  $R_1=10\text{k}\Omega$ ,  $R_f=50\text{k}\Omega$ ,  $v_{o(\text{max})}=14\text{V}$ .

- Xác định hệ số khuếch đại của mạch
- Xác định điện áp ra với mỗi giá trị điện áp vào  $v_i=0,2\text{V}$ ;  $-1\text{V}$ ;  $2\text{V}$ ;  $-3\text{V}$ ;  $4\text{V}$

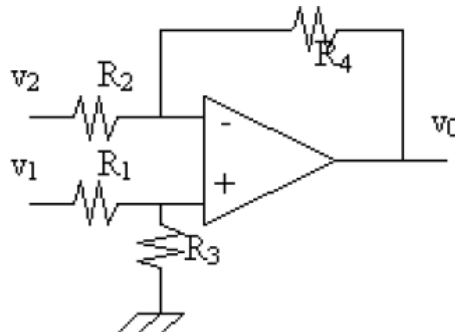


Bài 2: Cho mạch điện như hình sau, với  $R_1=12\text{k}\Omega$ ,  $R_f=180\text{k}\Omega$ ,  $v_{o(\text{max})}=14\text{V}$ .

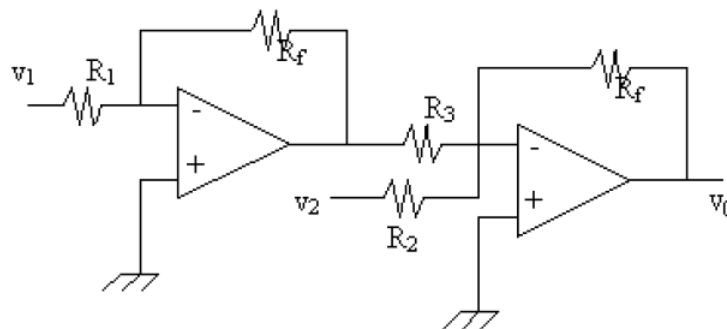
- Xác định hệ số khuếch đại của mạch
- Xác định điện áp ra với mỗi giá trị điện áp vào  $v_i=-0,4\text{V}$ ;  $0,8\text{V}$ ;  $1,2\text{V}$ ;  $-1,4\text{V}$



Câu 3: Cho mạch điện như hình sau, hãy xác định  $v_o$ .



Bài 4: Cho mạch điện như hình sau, hãy xác định  $v_o$ .



Bài 5: Cho mạch điện như hình sau.

a) Tìm biểu thức điện áp ngõ ra ( $v_o$ ) theo điện áp vào.

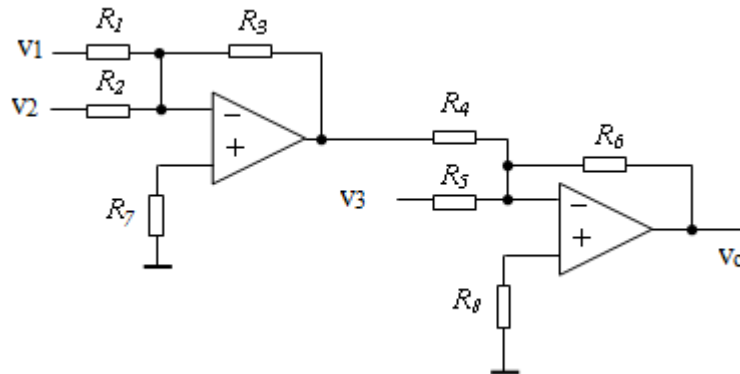
b) Tính  $v_o$  khi:

$$R_1 = 25k\Omega; R_2 = 10k\Omega; R_3 = 50k\Omega$$

$$R_4 = R_6 = 100k\Omega; R_5 = 10k\Omega;$$

$$v_1=0,2V; v_2=0,3V; v_3=0,5V$$

c) Nêu tác dụng của  $R_7, R_8$ . Tìm giá trị của nó để mạch làm việc tốt nhất?



Bài 6: Cho mạch điện như hình sau, với:  $R_1=10k\Omega, R_2=50k\Omega, v_{o(max)}=14V$

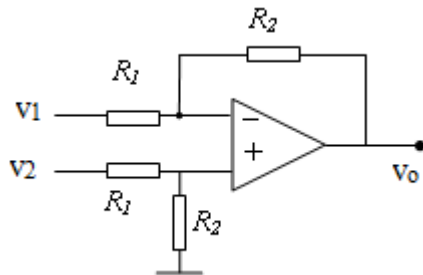
a) Tìm biểu thức điện áp ngõ ra ( $v_o$ ) theo điện áp vào.

b) Tính  $v_o$  khi:

$$v_1=4V; v_2=2V$$

$$v_1=1V; v_2=5V$$

$$v_1=6V; v_2=1V$$



Bài 7: Cho mạch điện như hình sau, với:

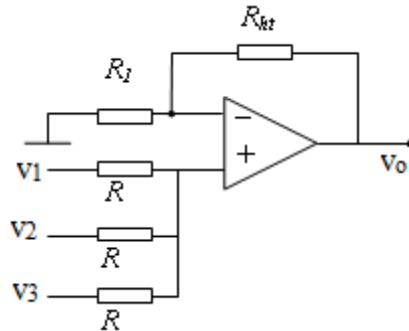
$$R = 50k\Omega; R_1 = 10k\Omega$$

$$R_{y\pi} = 30k\Omega; E = 15V$$

a) Tìm biểu thức điện áp ngõ ra ( $v_o$ ) theo điện áp vào.

b) Tính  $v_o$  khi:

$$v_1=0,3V; v_2=1V; v_3=-2V$$



Bài 8: Cho mạch điện như hình sau, với:

a) Tìm biểu thức điện áp ngõ ra ( $v_o$ ) theo điện áp vào.

b) Xác định  $v_o$  khi:

$$v_1=(1+10\sin 100t)V$$

$$v_2=-1V$$

$$C=1\mu F$$

$$R_1=R_2=100k\Omega$$

