

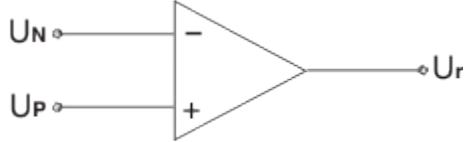
## MẠCH KHUẾCH ĐẠI

### 4.1. Giới thiệu

#### 4.1.1. các khái niệm cơ bản:

bộ khuếch đại thuật toán (operational amplifier - OA) là mạch khuếch đại tổ hợp có hệ số khuếch đại rất lớn, trở kháng vào lớn và trở kháng ra nhỏ... hiện nay, các bộ khuếch đại thuật toán (OA) đóng vai trò quan trọng và được sử dụng rộng rãi trong kĩ thuật khuếch đại, tạo tín hiệu sin, xung, trong bộ ổn áp và bộ lọc tích cực ...

ký hiệu của OA cho trên hình 8.1



**Hình 8.1: Ký hiệu OA**

OA khuếch đại hiệu điện thế  $U_d = U_P - U_N$  với hệ số khuếch đại  $K_d$ .

Do đó :  $U_r = K_d U_d = K_d (U_P - U_N)$

Nếu  $U_N = 0$  thì  $U_r = K_d U_P$  nên  $U_r$  đồng pha với tín hiệu vào  $U_P$ , vì vậy đầu vào P(positive) được gọi là đầu vào không đảo và ký hiệu bởi dấu (+).

Nếu  $U_P = 0$  thì  $U_r = -K_d U_N$  nên  $U_r$  ngược pha với tín hiệu vào  $U_N$ , vì vậy đầu vào N(negative) được gọi là đầu vào đảo và ký hiệu bởi dấu (-).

Ngoài ra OA còn có hai chân để cấp nguồn đối xứng, các chân bù điện áp, bù tần số...

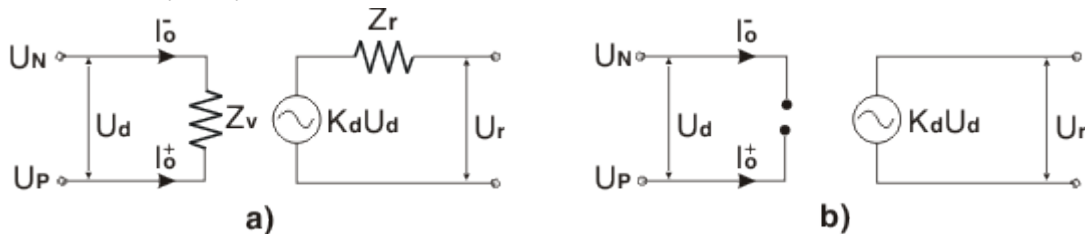
Moat bộ khuếch đại thuật toán lý tưởng có các tính chất sau:

Trở kháng vào  $Z_V = \infty$

Trở kháng ra  $Z_r = 0$

Hệ số khuếch đại  $K_d = \infty$

Theo sơ đồ tương đương hình 8.2b, OA lý tưởng sẽ có đặc điểm  $U_N = U_P$ , dòng điện vào OA ở đầu P và đầu N,  $I_P = I_N = 0$ .



**Hình 8.2: a) Sơ đồ tương đương O; b) sơ đồ tương đương OA lý tưởng**

Trên thực tế không có bộ khuếch đại thuật toán lý tưởng, thông thường moat OA có  $Z_V$  cỡ hàng trăm  $K$  tới hàng  $M$ ,  $Z_r$  cỡ hàng tới hàng vài chục,  $K_d$  khoảng vài trăm tới hàng triệu lần.

#### 4.1.2. hệ số nén đồng pha

nếu đặt vào đầu vào đảo và đầu vào không đảo các điện áp bằng nhau nghĩa là:

$U_P = U_N = U_{cm} \neq 0$  ( $U_{cm}$  gọi là điện áp đồng pha), theo lý thuyết thì  $U_r = 0$ , nhưng thực tế không như vậy

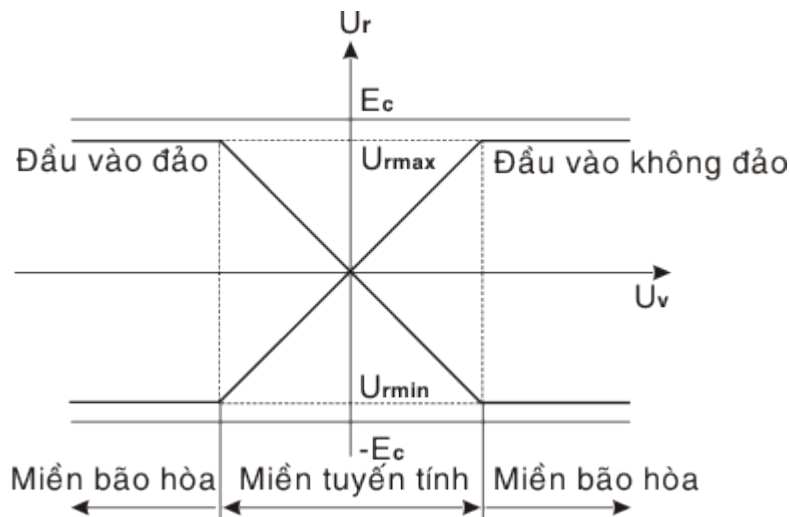
$$U_r = K_c U_{cm}$$

Với  $K_c$  được gọi là hệ số khuếch đại đồng pha. Nếu OA lý tưởng thì  $K_c = 0$ . Để đánh giá khả năng làm việc của OA thực so với OA lý tưởng người ta dùng hệ số nén đồng pha CMRR (Common Mode Rejection Ratio)

$$CMRR = \frac{K_d}{K_c}$$

Giá trị CMRR càng lớn thì OA càng gần với OA lý tưởng, thường  $CMRR = 10^3 \div 10^5$

#### 4.13 Đặc tuyến truyền đạt



**Hình 8.3: Đặc tuyến truyền đạt của OA**

Đặc tuyến quan trọng nhất của OA là đặc tuyến truyền đạt (hình 8.3), theo đặc tuyến này,  $U_r$  chỉ tỷ lệ với  $U_v$  trong dải điện áp ( $U_{rmin} - U_{rmax}$ ) nào đó. Dải điện áp này gọi là dải biến đổi điện áp ra của OA (hay miền tuyến tính). Ngoài dải này, điện áp ra không thay đổi và được xác định bằng các trị số  $U_{rmin}$ ,  $U_{rmax}$  gọi là điện áp bão hòa, giá trị điện áp này không phụ thuộc vào điện áp vào và gần bằng trị số nguồn cung cấp (điện áp bão hòa này thường thấp hơn trị số nguồn từ 1V đến 3V giá trị).

#### 4.14 Dòng vào tĩnh, điện áp vào lệch không

Dòng vào tĩnh là trị số trung bình của dòng vào đầu vào đảo và đầu vào không đảo

$$I_t = \frac{I_o + I_o}{2} \text{ Với } U_p = U_N$$

Dòng vào lệch không là hiệu dòng vào tĩnh ở hai đầu vào

$$I_0 = I_o - I_o$$

thông thường  $I_0 = 0,1I_t$

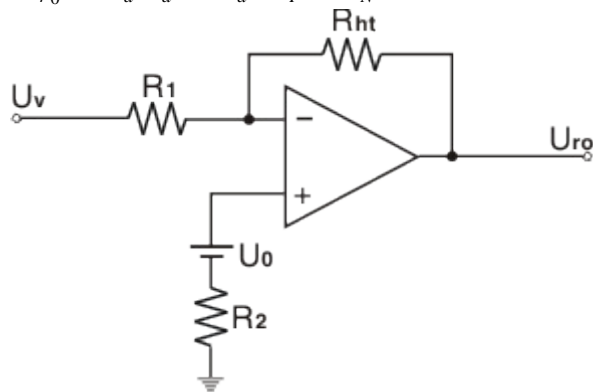
Dòng vào lệch không phụ thuộc vào nhiệt độ, do đó khi nhiệt độ thay đổi trị số dòng vào lệch không cũng không thay đổi theo.

Trong OA thực, khi  $U_p = U_N = 0$  thì  $U_r$  vẫn khác không. Lúc này điện áp ra do điện áp lệch không ở đầu vào gây nên. Vậy điện áp lệch không  $U_0$  là hiệu điện áp cần phải đạt giữa hai đầu vào OA để cho  $U_r = 0$ .

$$U_0 = U_p - U_N \text{ } U_r = 0$$

Điện áp lệch không  $U_0$  sẽ bù tới đầu ra một điện áp  $U_{r0}$

$$U_{r0} = K_d U_d = K_d (U_p - U_N)$$



**Hình 8.4: Điện áp lệch không**

Theo hình 8.4 ta có thể tính được:

$$U_N = \frac{R_1}{R_1 + R_{ht}} U_{r0}$$

$$U_P = U_0$$

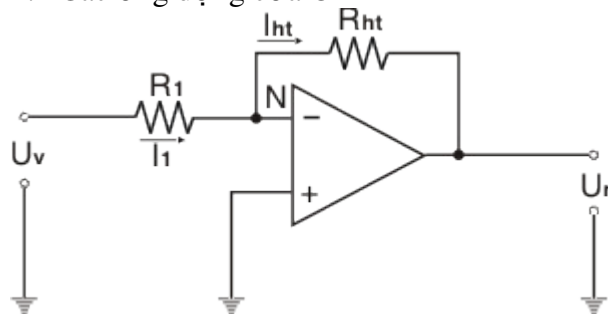
Do đó:

$$U_{r0} = K_d \left( U_0 - \frac{R_1}{R_1 + R_{ht}} U_{r0} \right)$$

Từ đó rút ra được:

$$U_{r0} = U_0 \frac{K_d}{1 - K_d \left( \frac{R_1}{R_1 + R_{ht}} \right)} = U_0 \frac{R_1}{R_1 + R_{ht}}$$

#### 4.2 Các ứng dụng của OA



**Hình 8.5: Bộ khuếch đại đảo**

Bộ khuếch đại đảo cho trên hình 8.5, có thực hiện hồi tiếp âm song song điện áp qua  $R_{ht}$ . Nếu coi OA lý tưởng, dòng vào OA,  $I_0 = 0$

Tại nút N ta có:

$$I_1 = I_{ht}$$

$$\frac{U_v}{R_1} = \frac{U_N}{R_{ht}} = \frac{U_N}{R_{ht}} = \frac{U_r}{R_{ht}}$$

Ta đã biết, với OA lý tưởng  $U_d = 0$  nên  $U_N = U_P$  mà  $U_P = 0$  nên  $U_N = 0$

Do đó:

$$\frac{U_v}{R_1} = \frac{U_r}{R_{ht}}$$

$$\text{Hệ số khuếch đại điện áp: } K_u = \frac{U_r}{U_v} = -\frac{R_{ht}}{R_1}$$

Dấu (-) thể hiện tín hiệu ra ngược pha với tín hiệu vào.

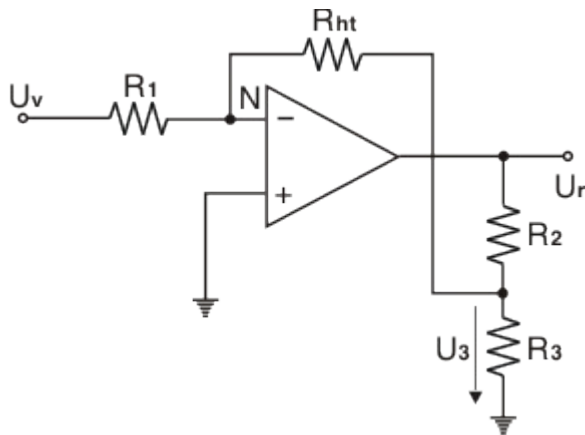
Nếu  $R_{ht} = R_1$  thì  $K_u = -1$ , sơ đồ hình 8.5 có tính chất lặp lại đảo tín hiệu.

Nếu  $R_1 = 0$ , từ phương trình  $I_1 = I_{ht}$ , ta có

$I_1 = \frac{U_r}{R_{ht}}$  hay  $U_r = I_1 R_{ht}$ , tức là điện áp ra tỷ lệ với dòng điện vào. Đây chính là mạch biến đổi dòng thành áp.

$$\text{Trở kháng vào: } Z_v = \frac{U_v}{I_1} = \frac{U_v}{\frac{U_v}{R_1}} = R_1$$

Trong trường hợp yêu cầu hệ số khuếch đại lớn thì phải chọn  $R_1$  nhỏ, nên trở kháng vào  $Z_v = R_1$  nhỏ. Khắc phục điều này bằng sơ đồ khuếch đại đảo hình 8.6



**Hình 8.6: Khuếch đại đảo có trở kháng vào lớn**

Bằng cách tính tương tự như trên ta có:

$$\frac{U_v}{R_1} = \frac{U_3}{R_{ht}}$$

Mặt khác:  $U_3 = \frac{R_3}{R_2 + R_3} U_r$  (công thức phân áp)

Vì vậy:  $U_r = \frac{R_{ht}}{R_1} \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right) U_v$

Trị số hệ số khuếch đại:

$$K_u = \frac{R_{ht}}{R_1} \left(1 + \frac{R_2}{R_3}\right)$$

Nếu ta chọn  $R_1 = R_2$ , thì  $K_u$  chỉ phụ thuộc vào tỷ số  $R_{ht}/R_3$ , có thể tăng tỷ số này tùy ý mà không ảnh hưởng đến trở kháng vào của mạch.

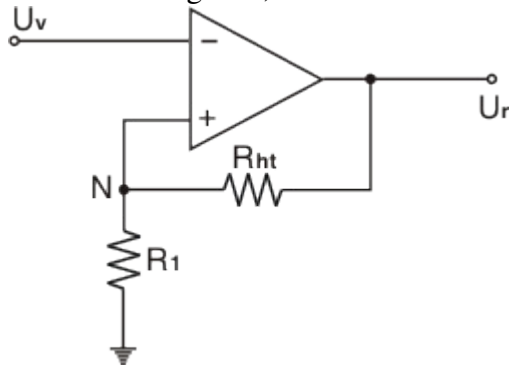
Ví dụ 4.1: Cho bộ khuếch đại như hình 4.5, với  $R_1 = 100K$ ,  $R_{ht} = 500K$ . Tính điện áp đầu ra khi điện áp vào là 2V

Giải:

$$\text{Ta có } U_r = \frac{R_{ht}}{R_1} U_v = \frac{500}{100} 2V = 10V$$

#### 4.2.2. Mạch khuếch đại không đảo

Bộ khuếch đại không đảo có mạch hồi tiếp âm điện áp đặt vào đầu vào đảo, còn tín hiệu đặt vào đầu vào không đảo, như sơ đồ hình 8.7



**Hình 8.7: Bộ khuếch đại không đảo**

Vì  $U_N = U_P$ . Trong trường hợp này  $U_P = U_V$  nên  $U_N = U_V$ .

Mặt khác ta có:

$$U_N = \frac{R_1}{R_1 + R_{ht}} U_r$$

Hệ số khuếch đại:

$$K_u = \frac{U_r}{U_v} = 1 + \frac{R_{ht}}{R_1}$$

khi  $R_1 \rightarrow \infty$ ,  $R_{ht} \rightarrow 0$  thì  $K_u = 1$ , sơ đồ hình 8.7 trở thành bộ lặp lại điện áp.

Ví dụ 4.2: Cho mạch khuếch đại không đảo như hình 8.7 với  $R_1 = 100K$ ,  $R_{ht} = 500K$ ,  $U_v = 2V$ .

Tính điện áp ra

Giải:

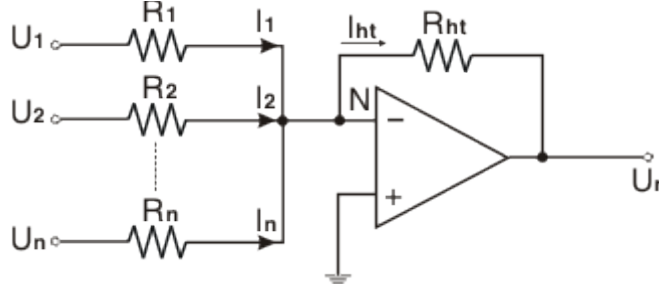
Điện áp ra được tính theo công thức:

$$U_r = \left(1 + \frac{R_{ht}}{R_1}\right) U_v = \left(1 + \frac{500K}{100K}\right) 2V = 12V$$

#### 4.2.3 Mạch cộng

Mạch cộng đảo:

Sơ đồ mạch cộng đảo như hình 8.8



Hình 8.8: Mạch cộng đảo

$$\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \dots + \frac{U_n}{R_n} + \frac{U_N}{R_{ht}} = 0$$

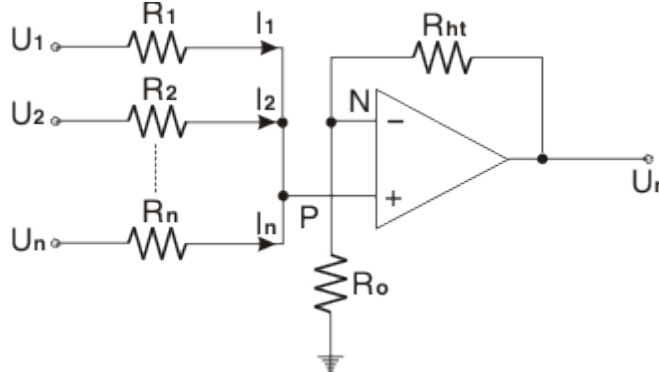
$U_N = 0$  nên:

$$U_r = -\frac{R_{ht}}{R_1} U_1 - \frac{R_{ht}}{R_2} U_2 - \dots - \frac{R_{ht}}{R_n} U_n$$

hay  $U_r = -\sum_{i=1}^n \frac{R_{ht}}{R_i} U_i$  với  $\frac{R_{ht}}{R_i}$

Mạch cộng không đảo

Sơ đồ mạch khuếch đại không đảo như hình 8.9.



Hình 8.9: Mạch cộng không đảo

Tại nút N

$$U_N = \frac{R_0}{R_0 + R_{ht}} U_r$$

Tại nút P:  $I_0 = 0$  nên:

$$I_1 = I_2 = \dots = I_n = 0$$

$$\frac{U_1 - U_P}{R_1} = \frac{U_2 - U_P}{R_2} = \dots = \frac{U_n - U_P}{R_n} = 0$$

$$U_P = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_2} = \dots = \frac{1}{R_n} \quad \frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2} = \dots = \frac{U_n}{R_n}$$

Thay  $U_N = U_P$  ta có:

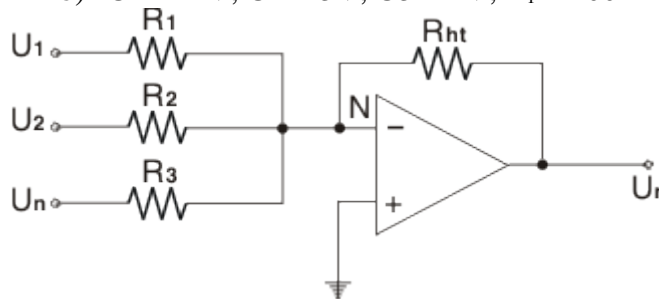
$$\frac{R_0}{R_0 + R_{ht}} U_r = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_n} \quad \frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2} = \dots = \frac{U_n}{R_n}$$

Nếu chọn  $R_1 = R_2 = \dots = R_n = R$  thì:

$$U_r = \frac{R_0 + R_{ht}}{nR_0} \sum_{i=1}^n U_i$$

Ví dụ 4.3: Cho mạch điện như hình 4.10,  $R_{ht} = 10M$  biết:

- a)  $U_1 = 1V; U_2 = 2V; U_3 = 3V; R_1 = 500K; R_2 = 1M; R_3 = 1M$  .  
 b)  $U_1 = -2V; U_2 = 3V; U_3 = 1V; R_1 = 200K; R_2 = 500K; R_3 = 1M$  .



**Hình 8.10**

Tính  $U_r$  trong hai trường hợp đó

Giải:

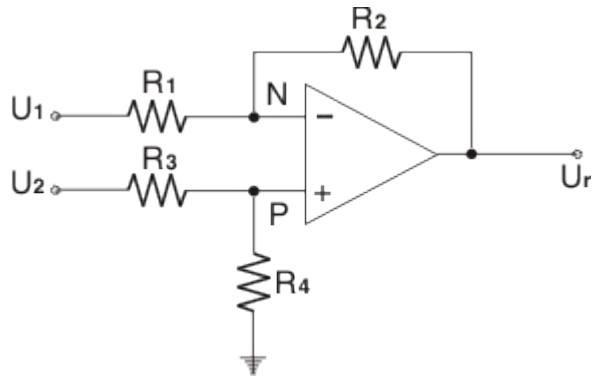
Đây là mạch cộng đảo nên ta có:

$$a) U_r = - \left( \frac{R_{ht}}{R_1} U_1 + \frac{R_{ht}}{R_2} U_2 + \frac{R_{ht}}{R_3} U_3 \right) = - \left( \frac{10000}{500} \cdot 1 + \frac{10000}{1000} \cdot 2 + \frac{10000}{1000} \cdot 3 \right) = -7V$$

$$b) U_r = - \left( \frac{R_{ht}}{R_1} U_1 + \frac{R_{ht}}{R_2} U_2 + \frac{R_{ht}}{R_3} U_3 \right) = - \left( \frac{10000}{200} \cdot (-2) + \frac{10000}{500} \cdot 3 + \frac{10000}{1000} \cdot 1 \right) = 3V$$

Mạch trừ

Sơ đồ mạch trừ được cho trên hình 8.11



**Hình 8.11: Sơ đồ mạch trừ**

Tại nút N:

$$\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_N}{R_2} - \frac{U_r}{R_2}$$

$$U_N \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{U_1}{R_1} - \frac{U_r}{R_2}$$

Tại nút P

$$U_P = \frac{R_4}{R_3 + R_4} U_2$$

Thay  $U_N = U_P$  ta có:

$$\frac{R_4}{R_3 + R_4} U_2 \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{U_1}{R_1} - \frac{U_r}{R_2}$$

$$U_r = \frac{R_4(R_1 + R_2)}{R_1(R_3 + R_4)} U_2 - \frac{R_2}{R_1} U_1$$

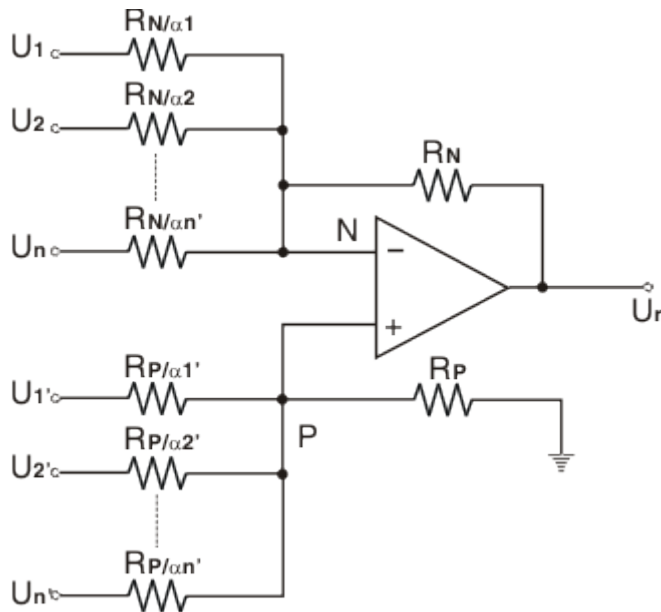
Nếu chọn  $R_2 = R_1$ ,  $R_4 = R_3$  ta có:

$$U_r = \frac{1}{1 + \frac{R_3}{R_4}} U_2 - U_1$$

Nếu  $\frac{R_3}{R_4} = 1$  thì

$$U_r = U_2 - U_1$$

Khi muốn trừ nhiều thành phần điện áp người ta sử dụng mạch trừ nhiều thành phần như hình 8.12.



**Hình 8.12: Mạch trừ nhiều thành phần**

Để tính toán điện áp ra, ta xét dòng điện tại nút N và P.

Tại nút N:

$$\sum_{i=1}^n \frac{U_i - U_N}{R_N / \alpha_i} - \frac{U_N - U_r}{R_N} = 0$$

$$\sum_{i=1}^n (U_i - U_N) \alpha_i - (U_N - U_r) = 0$$

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i U_i - U_N \sum_{i=1}^n \alpha_i - U_N + U_r = 0$$

Tương tự tại nút P ta có:

$$\sum_{i=1}^m \alpha_i' U_i' - U_P \sum_{i=1}^m \alpha_i' - U_P = 0$$

Thay  $U_N = U_P$  ta sẽ tính được:

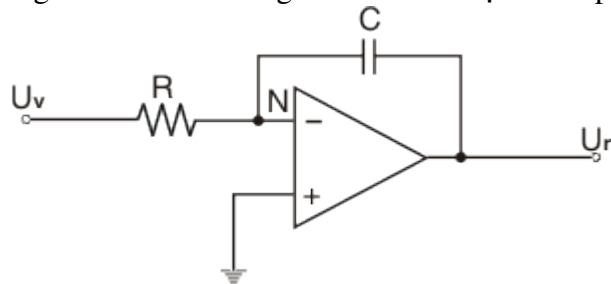
$$U_r = \frac{\sum_{i=1}^m \alpha_i' U_i' - \sum_{i=1}^n \alpha_i U_i}{1 - \sum_{i=1}^m \alpha_i' + \sum_{i=1}^n \alpha_i}$$

Mạch tích phân

Mạch tích phân là một mạch bốn cực, trong đó tín hiệu ra tỷ lệ với tích phân tín hiệu đầu vào.

$$U_r = k \int U_v dt$$

Người ta có thể dùng OA để tính mạch tích phân như hình 8.13





**Hình 8.13: Mạch tích phân**

Thật vậy:

Tại nút N:

$$i_r = i_c$$

$$i_r = \frac{U_v - U_N}{R}$$

$$i_c = C \frac{dU_c}{dt} = C \frac{d(U_N - U_r)}{dt}$$

Thay  $i_r = i_c$  và  $U_N = 0$  ta được:

$$\frac{U_v}{R} = C \frac{dU_r}{dt}$$

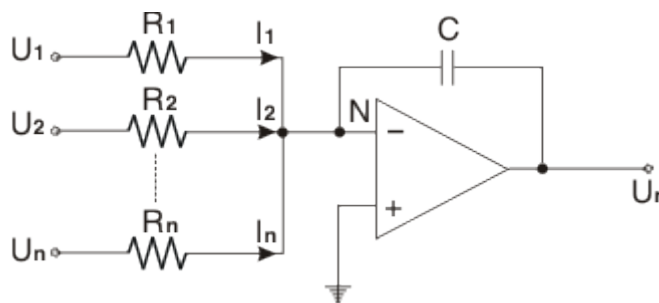
$$U_r = \frac{1}{RC} \int_0^t U_v dt = U_{r0}$$

$U_{r0}$  là điện áp trên tụ C tại thời điểm  $t = 0$ , thông thường  $U_{r0} = 0$ , khi  $t = 0$ . Vì vậy:

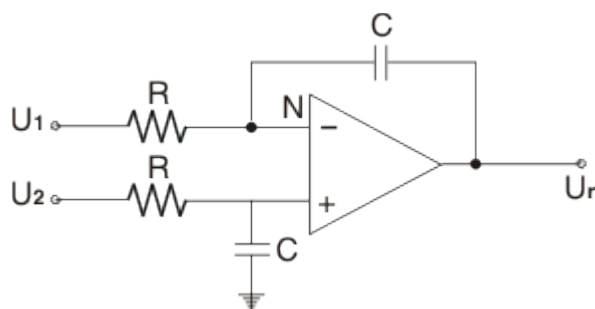
$$U_r = \frac{1}{RC} \int_0^t U_v dt = \frac{1}{RC} \int_0^t U_v dt$$

Với  $RC$  được gọi là hằng số tích phân.

Khi muốn cộng hoặc trừ các tích phân, người ta dùng mạch tích phân tổng và tích phân hiệu như hình 8.14 và 8.15



**Hình 8.14: Mạch tích phân tổng**



**Hình 8.15: Mạch tích phân hiệu**

Bằng cách tính tương tự như mạch cộng, mạch trừ và mạch tích phân ta có thể tính được:

Với mạch tích phân tổng:

$$U_r = \int_0^t \left( \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \dots + \frac{U_n}{R_n} \right) dt$$

Với mạch tích phân hiệu:

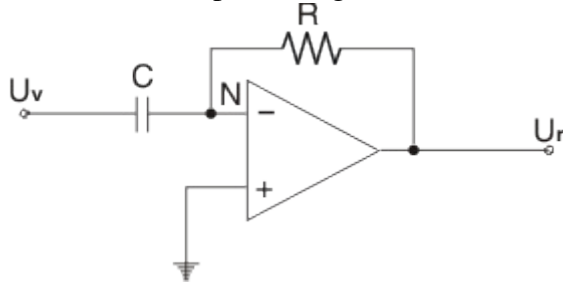
$$U_r = \frac{1}{RC} \int (U_2 - U_1) dt$$

Mạch vi phân

Mạch vi phân là một mạng bốn cực, trong đó tín hiệu ra tỷ lệ với vi phân tín hiệu đầu vào.

$$U_r = k \frac{dU_v}{dt}$$

Sơ đồ mạch vi phân dùng OA được cho trên hình 8.16



**Hình 8.16: Mạch vi phân**

Tính tương tự mạch tích phân ta có:

$$U_r = -RC \frac{dU_v}{dt}$$

Với  $RC$  được gọi là hằng số vi phân.

Khi tín hiệu vào là hình sin, mạch vi phân làm việc như một bộ lọc tần cao, hệ số khuếch đại của nó tỷ lệ thuận với tần số tín hiệu vào và làm quay pha tín hiệu vào một góc  $90^\circ$ . Thường mạch vi phân

làm việc kém ổn định ở tần cao vì khi đó  $Z_c = \frac{1}{C} \rightarrow 0$ , làm hệ số hồi tiếp âm giảm.