CHƯƠNG V:

MẠCH ĐIỀU CHẾ, TÁCH SÓNG VÀ TRỘN TẦN

I. ĐIỀU CHẾ – ĐIỀU BIÊN.

1. Định nghĩa.

- Điều chế là quá trình ghi tin tức vào một dao động cao tần nhờ biến đổi một thông số nào đó (biên độ, tần số, góc pha, độ rộng xung...) của dao động cao tần theo tin tức.

Tin tức được gọi là tín hiệu điều chế.

Dao động cao tần gọi là tải tin, còn dao động cao tần mang tin tức gọi là dao động cao tần đã điều chế.

Thông qua quá trình điều chế, tin tức ở miền tần số thấp được chuyển sang miền tần số cao để truyền đi xa.

- Điều biên là quá trình ghi tin tức vào một dao động cao tần làm cho biên độ của dao động cao tần biến đổi theo tin tức.

Để đơn giản, giả thiết tin tức u_s và tải tin u_t đều là dao động điều hòa và tần số tin tức biến thiên từ $\omega_{smin} \div \omega_{smax}$, ta có:

$$\begin{aligned} u_s &= \hat{U}_s \cos \omega_s t \\ u_t &= \hat{U}_t \cos \omega_t t \end{aligned} \quad \text{với } \omega_t >> \omega_s$$

Do đó, tín hiệu điều biên:

$$u_{db} = \left(\hat{U}_t + \hat{U}_s \cos \omega_s t\right)\cos \omega_t t = \hat{U}_t\left(1 + m\cos \omega_s t\right)\cos \omega_t t$$

Trong đó: $m = \dfrac{\hat{U}_s}{\hat{U}_t}$ là hệ số điều chế.

Hệ số điều chế m phải thỏa mãn điều kiện: m ≤ 1. Khi m > 1 thì mạch có hiện tượng quá điều chế và tín hiệu bị méo trầm trọng.

Biến đổi lượng giác, ta có:

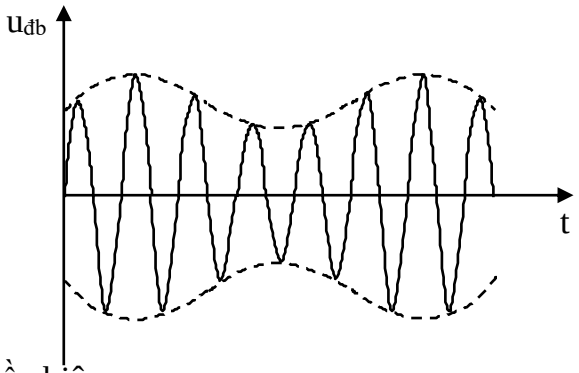
$$u_{db} = \hat{U}_t \cos \omega_t t + m\hat{U}_t \cos \omega_t t \cdot \cos \omega_t t$$

$$= \hat{U}_t \cos \omega_t t + \frac{m}{2}\hat{U}_t \cos\left(\omega_t + \omega_s\right)t + \frac{m}{2}\hat{U}_t \cos\left(\omega_t - \omega_s\right)t$$

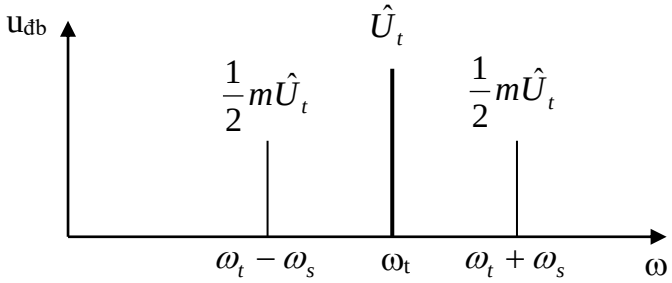
Vậy ngoài thành phần tải tin, tín hiệu điều biên còn có hai biên tần:

- Biên tần trên có tần số từ $(\omega_t + \omega_{s\min}) \div (\omega_t + \omega_{s\max})$.
- Biên tần dưới có tần số từ $(\omega_t - \omega_{s\max}) \div (\omega_t - \omega_{s\min})$.

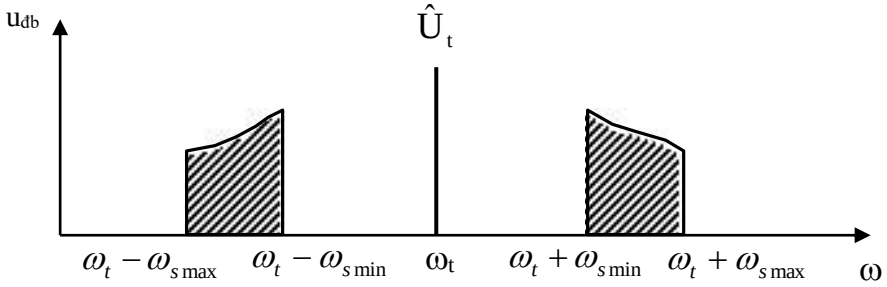
Đồ thị thời gian của tín hiệu điều biên:



Phổ của tín hiệu điều biên:



Khi tín hiệu điều chế có phổ biến thiên từ $\omega_{s\min} \div \omega_{s\max}$ thì phổ của tín hiệu điều biên có dạng:



Trong tín hiệu đã điều biên, các biên tần chứa tin tức, còn tải tin không mang tin tức. Do đó cần xét xem năng lượng được phân bố như thế nào đối với các thành phần phổ của tín hiệu đã điều biên.

Công suất tải tin là công suất bình quân trong một chu kỳ tải tin:

$$P_{\sim t} \sim \frac{1}{2}\hat{U}_t^2$$

Công suất biên tần:

$$P_{\sim bt} \sim \frac{\left(\frac{m\hat{U}_t}{2}\right)^2}{2}$$

Công suất của tín hiệu đã điều biên là công suất bình quân trong một chu kỳ của tín hiệu điều chế:

$$P_{\sim đb} = P_{\sim t} + 2P_{\sim bt} = P_{\sim t}\left(1+\frac{m^2}{2}\right)$$

Ta thấy rằng, công suất của tín hiệu đã điều biên phụ thuộc vào hệ số điều chế *m*. Hệ số điều chế *m* càng lớn thì công suất tín hiệu đã điều biên càng lớn. Khi *m* = 1 thì ta có quan hệ giữa công suất hai biên tần và tải tần như sau:

$$2P_{\sim bt} = \frac{P_{\sim t}}{2}$$

Để giảm méo, hệ số điều chế *m* thường chọn nhỏ hơn 1, do đó công suất các biên tần thực tế chỉ bằng khoảng 1/3 công suất tải tần. Nghĩa là phần lớn công suất phát xạ được phân bố cho thành phần phổ không mang tin tức (tải tin), còn thành phần phổ chứa tin tức (các biên tần) chỉ chiếm phần nhỏ công suất điều biên. Đó là một nhược điểm của tín hiệu điều biên so với tín hiệu đơn biên.

Ví dụ 1:

Cho tín hiệu điều biên với hệ số điều chế $m = 50\%$, tần số điều chế $f_s = 10\,kHz$, tải tin có biên độ 5 mV và tần số $f_t = 10\ MHz$.

a. Viết phương trình biểu diễn tín hiệu đã điều biên đó.

b. Tính phổ của tín hiệu đó.

Giải:

a. Tín hiệu đã điều biên có phương trình:

$$u_{đb} = \hat{U}_t(1 + m\cos\omega_s t)\cos\omega_t t$$

$$= 5\cdot 10^{-3}\left(1 + 0{,}5\cos 2\pi\cdot 10^4 t\right)\cdot\cos 2\pi\cdot 10^7 t$$

b. Ta có:

$$u_{đb} = \hat{U}_t \cos\omega_t t + \frac{m}{2}\hat{U}_t \cos(\omega_t + \omega_s)t + \frac{m}{2}\hat{U}_t \cos(\omega_t - \omega_s)t$$

$$= 5\cdot 10^{-3}\cos 2\pi\cdot 10^7 t + \frac{0{,}5}{2}\cdot 5\cdot 10^{-3}\cos 2\pi\left(10^7 + 10^4\right)t +$$

$$+ \frac{0{,}5}{2}\cdot 5\cdot 10^{-3}\cos 2\pi\left(10^7 - 10^4\right)t$$

$$\Rightarrow u_{đb} \approx 5\cdot 10^{-3}\cos 2\pi\cdot 10^7 t + 1{,}25\cdot 10^{-3}\cos 2\pi\cdot 1001\cdot 10^4 t +$$

$$+ 1{,}25\cdot 10^{-3}\cos 2\pi\cdot 999\cdot 10^4 t$$

Vậy phổ của tín hiệu điều biên gồm có:

+ Tải tin $f_t = 10\ MHz$ với biên độ $A_t = 5\ mV$.

+ Biên tần trên $f_{tr} = 1001\cdot 10^4\ Hz$ với biên độ $A_{tr} = 1{,}25\ mV$.

+ Biên tần dưới $f_d = 999\cdot 10^4\ Hz$ với biên độ $A_d = 1{,}25\ mV$.

Ví dụ 2:

Một mạch điều biên có điện trở tải $R_t = 50\Omega$. Biết rằng có thể lấy ra trên tải một điện áp với độ suy giảm 60 dB. Dùng thiết bị phân tích phổ có thể đo được tại đầu ra:

- Điện áp đối với tải tin: $U_{ft} = 223mV$.
- Điện áp các biên tần: $U_{f_t+f_s} = U_{f_t-f_s} = 67\,mV$.

Tính:

a. Hệ số điều chế m.

b. Giá trị đỉnh của điện áp điều biên.

c. Công suất mạch điều biên đưa ra tải.

d. Trị hiệu dụng của dòng điện điều biên.

Giải:

a. Ta có:

$$U_{f_t+f_s} = U_{f_t-f_s} = \frac{mU_{ft}}{2} = 67\,mV$$

Do đó, hệ số điều chế m:

$$m = \frac{2 \cdot 67}{U_{ft}} = \frac{2 \cdot 67}{223} \approx 0,6$$

b. Giá trị đỉnh của điện áp điều biên được xác định:

$$\hat{U}_{đb\max} = \hat{U}_t (1 + m)$$

Trong đó: $\hat{U}_t = \sqrt{2} U_{ft} = \sqrt{2} \cdot 223 \approx 315,4\ (mV)$

$$\Rightarrow \hat{U}_{đb\max} \approx 315,4(1 + 0,6) \approx 504,64\ (mV)$$

c. Công suất mạch điều biên đưa ra tải:

$$P_{\sim đb} = P_{\sim t}\left(1 + \frac{m^2}{2}\right)$$

Trong đó:

$$P_{\sim t} = \frac{U_t^2}{R_t}$$

Với: $\frac{U_t}{U_{ft}} = 60\,dB = 10^3 \Rightarrow U_t = 10^3 U_{ft} = 10^3 \cdot 223\,(mV) = 223\,V$

$$\Rightarrow P_{\sim t} = \frac{223^2}{50} = 994,58\ W$$

Do đó: $P_{\sim đb} = 994,58\left(1 + \frac{0,6^2}{2}\right) \approx 1173,6\ \ W$

d. Ta có:

$$P_{\sim đb} = P_{\sim t}\left(1 + \frac{m^2}{2}\right)$$

$$\Rightarrow \frac{P_{\sim đb}}{P_{\sim t}} = 1 + \frac{m^2}{2} = \left(\frac{I_{\sim đb}}{I_{\sim t}}\right)^2$$

$$\Rightarrow I_{\sim đb} = I_{\sim t}\sqrt{1 + \frac{m^2}{2}}$$

Với: $I_{\sim t} = \frac{P_{\sim t}}{U_{ft}} = \frac{994,58}{223} = 4,46\ A$

Do đó, trị hiệu dụng của dòng điện điều biên là:

$$I_{\sim đb} = 4,46\sqrt{1+\frac{0,6^2}{2}} \approx 4,84\ A$$

2. Các mạch điều biên.

Các mạch điều biên được xây dựng dựa vào 2 nguyên tắc sau:

- Dùng phần tử phi tuyến: cộng tải tin và tín hiệu điều chế trên đặc tuyến của phần tử phi tuyến đó.
- Dùng phần tử tuyến tính có tham số điều khiển được: nhân tải tin và tín hiệu điều chế nhờ phần tử tuyến tính đó.

2.1. Mạch điều biên đơn:

Là mạch chỉ dùng một phần tử tích cực để điều chế.

a. Điều biên dùng phần tử phi tuyến:

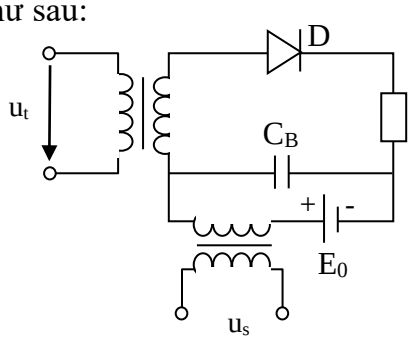
Các phần tử phi tuyến được dùng để điều biên có thể là đèn điện tử, bán dẫn, các đèn có khí, cuộn cảm có lõi sắt hoặc điện trở có trị số biến đổi theo điện áp đặt vào.

Tùy thuộc vào điểm làm việc được chọn trên đặc tuyến phi tuyến, hàm số đặc trưng cho phần tử phi tuyến có thể biểu diễn gần đúng theo chuỗi Taylor khi chế độ làm việc của mạch là chế độ A ($\theta = 180^0$) hoặc phân tích theo chuỗi Furier khi mạch làm việc ở chế độ mà góc $\theta < 180^0$ (chế độ AB, B, C).

Phương pháp tính toán cho hai trường hợp như sau:

- *Trường hợp:* $\theta = 180^0$

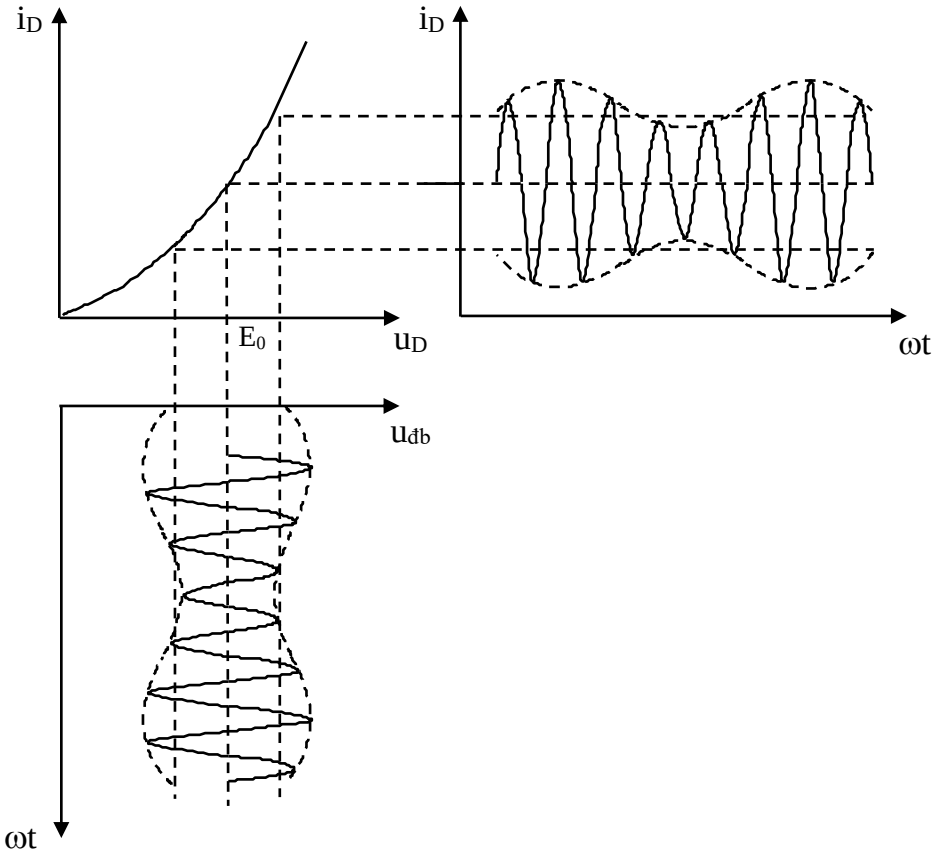
  Sơ đồ mạch điều biên dùng diode:



Nếu mạch làm việc ở chế độ A ($\theta = 180^0$) thì các tín hiệu vào thỏa mãn điều kiện:

$$\left|\hat{U}_t\right| + \left|\hat{U}_s\right| < \left|E_0\right| \qquad (5.1)$$

Đặc tuyến của diode, đồ thị thời gian của tín hiệu vào và tín hiệu ra:



Hàm số đặc trưng cho phần tử phi tuyến (diode) xung quanh điểm làm việc được biểu diễn theo chuỗi Taylor:

$$i_D = a_1 u_D + a_2 u_D^2 + a_3 u_D^3 + ... \qquad (5.2)$$

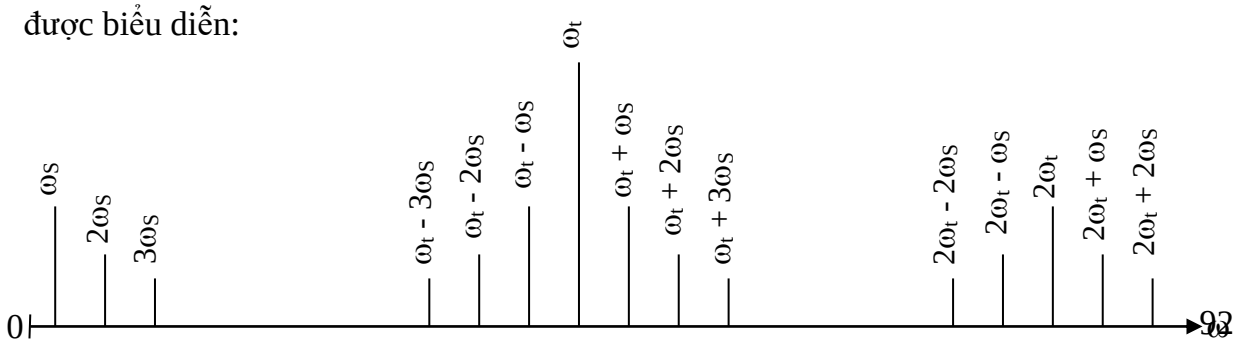
Với: $u_D = E_0 + \hat{U}_t \cos\omega_t t + \hat{U}_s \cos\omega_s t$

Thay u_D vào (4.2) ta có:

$$i_D = a_1\left(E_0 + \hat{U}_t \cos\omega_t t + \hat{U}_s \cos\omega_s t\right) + a_2\left(E_0 + \hat{U}_t \cos\omega_t t + \hat{U}_s \cos\omega_s t\right)^2 +$$

$$+ a_3\left(E_0 + \hat{U}_t \cos\omega_t t + \hat{U}_s \cos\omega_s t\right)^3 + ... \qquad (5.3)$$

Khai triển (4.3) và bỏ qua các số hạng bậc cao n ≥ 4, sẽ có kết quả mà phổ của nó được biểu diễn:



Phổ tín hiệu ra trong trường hợp này gồm thành phần phổ mong muốn $(\omega_t \pm \omega_s)$ và các thành phần phụ không mong muốn. Các thành phần phụ bằng không khi:

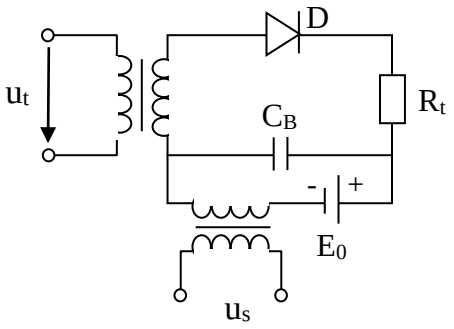
$$a_3 = a_4 = ... = a_{2n+1} = 0 \qquad (n = 1,2,3,.....)$$

Nghĩa là nếu đường đặc tính của phần tử phi tuyến là một đường cong bậc hai thì tín hiệu đã điều biên không có méo phi tuyến.

Để thỏa mãn điều kiện (5.1), tải tin và tín hiệu điều chế phải có biên độ bé, nghĩa là phải hạn chế độ sâu điều chế m và hạn chế công suất ra. Do đó, rất ít khi dùng điều biên chế độ A.

- *Trường hợp:* $\theta < 180^0$.

Sơ đồ mạch điều biên dùng diode:



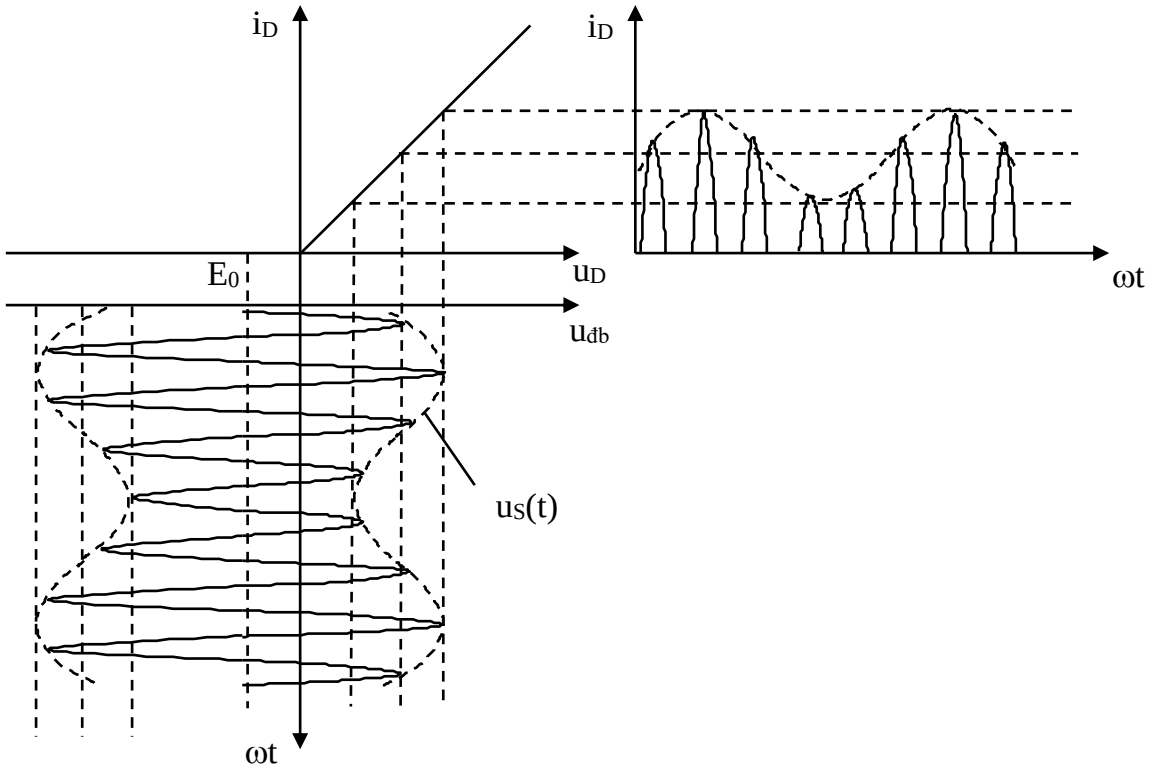
Phương trình biểu diễn đặc tuyến của diode:

$$i_D = \begin{cases} 0 & khi \quad u_D \le 0 \\ Su_D & khi \quad u_D > 0 \end{cases} \qquad (5.4)$$

S: Hỗ dẫn của đặc tuyến diode.

Chọn điểm làm việc ban đầu trong khu vực tắt của diode (ứng với chế độ C).

Nếu biên độ điện áp đặt vào diode đủ lớn thì có thể coi đặc tuyến của nó là một đường gấp khúc:



Vì dòng qua diode là một dãy xung hình sin, nên có thể biểu diễn i_D theo chuỗi Furier như sau:

$$i_D = I_0 + i_1 + i_2 + ... + i_n + ...$$

$$= I_0 + \hat{I}_1 \cos \omega_t t + \hat{I}_2 \cos 2\omega_t t + ... + \hat{I}_n \cos n\omega_t t \qquad (5.5)$$

Trong đó:

I_0 - thành phần dòng điện một chiều.

$\hat{I}_1$ - biên độ thành phần dòng điện cơ bản đối với tải tin.

$\hat{I}_2, \hat{I}_3, ..., \hat{I}_n$ - biên độ thành phần dòng điện bặc cao (hài bậc cao) đối với tải tin.

$I_0, \hat{I}_1, \hat{I}_2, ..., \hat{I}_n$ được tính toán theo các biểu thức xác định hệ số của chuỗi Furier:

$$\left.\begin{aligned} I_0 &= \frac{1}{\pi}\int_0^{\theta} i_D d\omega t \\ \hat{I}_1 &= \frac{2}{\pi}\int_0^{\theta} i_D \cos \omega_t t d\omega_t t \\ &..... \\ \hat{I}_n &= \frac{2}{\pi}\int_0^{\theta} i_D \cos n\omega_t t d\omega_t t \end{aligned}\right\} \qquad (5.6)$$

Theo biểu thức (5.4):

$$i_D = S u_D = S\left(-E_0 + \hat{U}_s \cos \omega_s t + \hat{U}_t \cos \omega_t t\right) \qquad (5.7)$$

Khi $\omega_t t = \theta$ thì $i_D = 0$. Do đó:

$$0 = S\left(-E_0 + \hat{U}_s \cos \omega_s t + \hat{U}_t \cos \theta\right) \qquad (5.8)$$

Lấy (5.7) trừ (5.8), ta có:

$$i_D = S\hat{U}_t\left(\cos \omega_t t - \cos \theta\right) \qquad (5.9)$$

Biểu thức (5.9) là một dạng khác của (5.7). Nó biểu diễn sự phụ thuộc của i_D vào chế độ công tác (góc cắt θ).

Thay (5.9) vào (5.6) để xác định các dòng điện $I_0, \hat{I}_1, \hat{I}_2, ..., \hat{I}_n$.

Ta lưu ý đến biên độ thành phần cơ bản I_1 (thành phần hữu ích):

$$\hat{I}_1 = \frac{2}{\pi}\int_0^{\theta} S\hat{U}_t\left(\cos\omega_t t - \cos\theta\right)\cos\omega_t t d\omega_t t$$

$$= \frac{2S\hat{U}_t}{\pi}\int_0^{\theta}\left(\frac{1+\cos 2\omega_t t}{2} - \cos\theta\cdot\cos\omega_t t\right)d\omega_t t$$

$$= \frac{S\hat{U}_t}{\pi}\left(\theta - \frac{1}{2}\sin 2\theta\right) \qquad (5.10)$$

Do đó, giá trị tức thời của thành phần cơ bản:

$$i_1 = \frac{S\hat{U}_t}{\pi}\left(\theta - \frac{1}{2}\sin 2\theta\right)\cos\omega_t t \qquad (5.11)$$

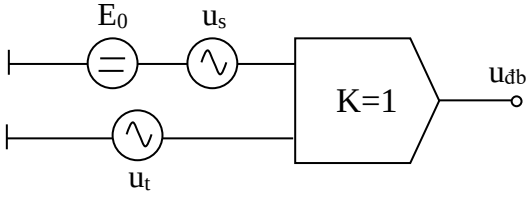
Trong đó: $\cos\theta = \dfrac{E_0 - \hat{U}_s\cos\omega_s t}{\hat{U}_t}$ (5.12)

Ta thấy, biên độ của thành phần dòng điện cơ bản biến thiên theo tín hiệu điều chế u_s.

b. Điều biên dùng phần tử tuyến tính có tham số thay đổi:

Thực chất quá trình điều biên này là quá trình nhân tín hiệu.

Sơ đồ mạch điều biên dùng bộ nhân tương tự:



Căn cứ vào tính chất của mạch nhân, ta có:

$$u_{db} = \left(E_0 + \hat{U}_s\cos\omega_s t\right)\hat{U}_t\cos\omega_t t$$

$$\Rightarrow u_{db} = E_0\hat{U}_t\cos\omega_t t + \frac{\hat{U}_t\hat{U}_s}{2}\cos\left(\omega_t + \omega_s\right)t + \frac{\hat{U}_t\hat{U}_s}{2}\cos\left(\omega_t - \omega_s\right)t \qquad (5.13)$$

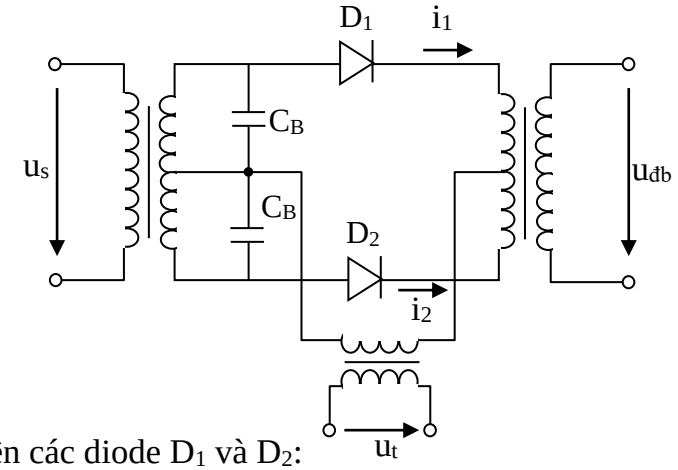
Ta thấy, phổ tín hiệu ra có tải tin và hai biên tần mong muốn.

Vậy đặc điểm cơ bản của mạch điều biên đơn là dòng điện ra tải ngoài các thành phần hữu ích (các biên tần) còn có đủ mọi thành phần không mong muốn khác (tải tần và các hài bậc cao).

2.2. Mạch điều biên cân bằng.

Để giảm méo phi tuyến, dùng mạch điều biên cân bằng.

- Mạch điều biên cân bằng dùng diode:



Điện áp đặt lên các diode D_1 và D_2:

$$\left.\begin{aligned} u_1 &= \hat{U}_s \cos\omega_s t + \hat{U}_t \cos\omega_t t \\ u_2 &= -\hat{U}_s \cos\omega_s t + \hat{U}_t \cos\omega_t t \end{aligned}\right\} \qquad (5.14)$$

Dòng điện qua các diode được biểu diễn theo chuỗi Taylor:

$$\left.\begin{aligned} i_1 &= a_0 + a_1 u_1 + a_2 u_1^2 + a_3 u_1^3 + ... \\ i_2 &= a_0 + a_1 u_2 + a_2 u_2^2 + a_3 u_2^3 + ... \end{aligned}\right\} \qquad (5.15)$$

Dòng điện ra:

$$i = i_1 - i_2 \qquad (5.16)$$

Thay các biểu thức (5.14), (5.15) vào (5.16) và chỉ lấy 4 vế đầu ta nhận được biểu thức dòng điện ra:

$$i = A\cos\omega_s t + B\cos 3\omega_s t + C\left[\cos(\omega_t + \omega_s)t + \cos(\omega_t - \omega_s)t\right] +$$
$$+ D\left[\cos(2\omega_t + \omega_s)t + \cos(2\omega_t - \omega_s)t\right] \qquad (5.17)$$

Trong đó:

$$A = \hat{U}_s\left(2a_1 + 3a_3\hat{U}_t^2 + \frac{1}{2}a_3\hat{U}_s^2\right)$$

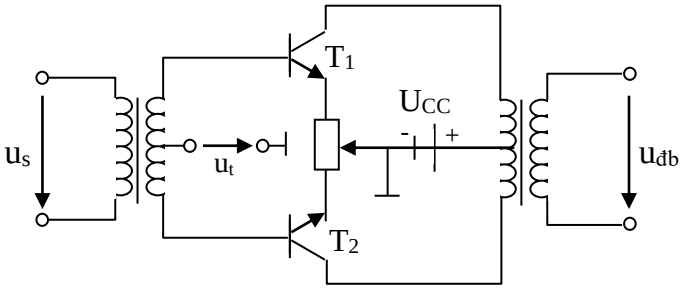
$$B = \frac{1}{2}a_3\hat{U}_s^3 \qquad (5.18)$$

$$C = 2a_2\hat{U}_s\hat{U}_t$$

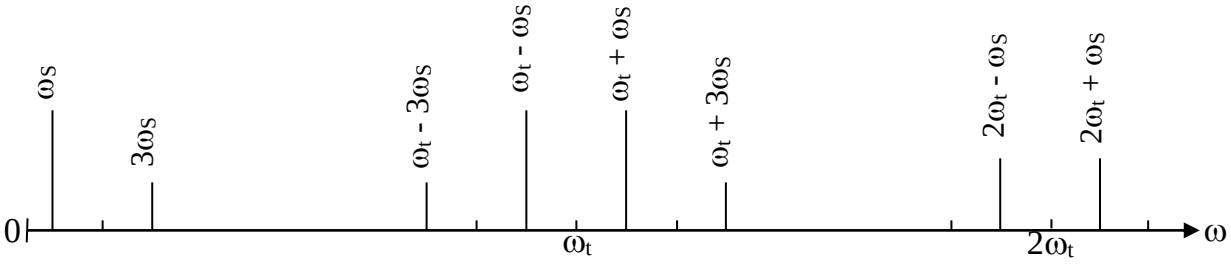
$$D = \frac{3}{2}a_3\hat{U}_s\hat{U}_t$$

- Mạch điều biên cân bằng dùng transistor:

Tương tự, ta cũng có kết quả đó cho mạch điện. Trong trường hợp cần có tải tin ở đầu ra, sau khi điều chế có thể đưa thêm tải tin vào.



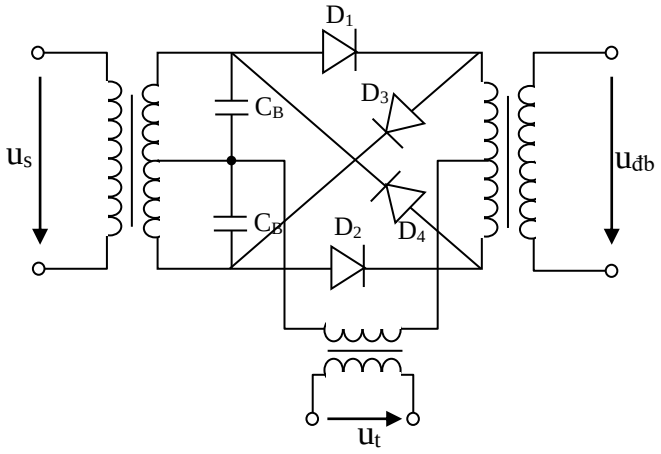
Phổ tín hiệu ra của mạch:



2.3. Mạch điều biên vòng.

Thực chất là hai mạch điều chế cân bằng có chung tải.

Sơ đồ mạch:



Gọi dòng điện ra của mạch điều chế cân bằng gồm D_1, D_2 là i_I.

Dòng điện ra của mạch điều chế cân bằng gồm D_3, D_4 là i_{II}.

Theo công thức (5.14):

$$i_I = A\cos\omega_s t + B\cos 3\omega_s t + C\left[\cos(\omega_t + \omega_s)t + \cos(\omega_t - \omega_s)t\right] + \\ + D\left[\cos(2\omega_t + \omega_s)t + \cos(2\omega_t - \omega_s)t\right] \quad (5.19)$$

$$i_{II} = i_{D3} - i_{D4} \quad (5.20)$$

Trong đó:

$$\left.\begin{aligned} i_{D3} &= a_0 + a_1 u_3 + a_2 u_3^2 + a_3 u_3^3 + \ldots\ldots \\ i_{D4} &= a_0 + a_1 u_4 + a_2 u_4^2 + a_3 u_4^3 + \ldots\ldots \end{aligned}\right\} \quad (5.21)$$

Với u_3 và u_4 là điện áp đặt lên D_3 và D_4, được xác định:

$$\left.\begin{aligned} u_3 &= -\hat{U}_s \cos\omega_s t - \hat{U}_t \cos\omega_t t \\ u_4 &= \hat{U}_s \cos\omega_s t - \hat{U}_t \cos\omega_t t \end{aligned}\right\} \quad (5.22)$$

Thay (5.21) và (5.22) vào (5.20) và lấy 4 vế đầu của (5.21), ta có:

$$i_{II} = -A\cos\omega_s t - B\cos 3\omega_s t + C\left[\cos(\omega_t + \omega_s)t + \cos(\omega_t - \omega_s)t\right] - \\ - D\left[\cos(2\omega_t + \omega_s)t + \cos(2\omega_t - \omega_s)t\right] \quad (5.23)$$

Trong đó:

$$A = \hat{U}_s\left(2a_1 + 3a_3\hat{U}_t^2 + \frac{1}{2}a_3\hat{U}_s^2\right)$$

$$B = \frac{1}{2}a_3\hat{U}_s^3$$

$$C = 2a_2\hat{U}_s\hat{U}_t$$

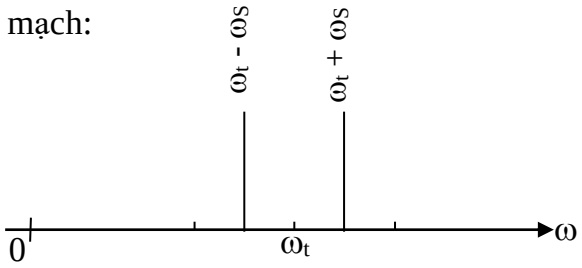
$$D = \frac{3}{2}a_3\hat{U}_s\hat{U}_t$$

Do đó, dòng điện ra:

$$i_{db} = i_I + i_{II} = 2C\left[\cos(\omega_t + \omega_s)t + \cos(\omega_t - \omega_s)t\right] \quad (5.24)$$

Vậy dùng mạch điều chế vòng còn có thể khử được các hài bậc lẻ của ω_s và các biên tần của $2\omega_t$. Do đó, méo phi tuyến rất nhỏ.

Phổ tín hiệu ra của mạch:



II. ĐIỀU TẦN – ĐIỀU PHA.

1. Định nghĩa.

Điều tần là quá trình ghi tin tức vào tải tin, làm cho tần số của tải tin thay đổi theo dạng của tín hiệu điều chế.

Điều pha là quá trình ghi tin tức vào tải tin, làm cho pha của tải tin thay đổi theo dạng của tín hiệu điều chế.

2. Các công thức cơ bản và quan hệ giữa điều tần - điều pha.

Vì giữa tần số và góc pha của một dao động có liên quan nên dễ dàng chuyển đổi sự biến thiên tần số thành biến thiên về pha và ngược lại.

$$\omega = \frac{d\psi}{dt} \tag{5.25}$$

Điều tần và điều pha là quá trình ghi tin tức vào tải tin, làm cho tần số hoặc pha tức thời của tải tin biến thiên theo dạng của tín hiệu điều chế.

Với tải tin là dao động điều hòa:

$$u_t(t) = \hat{U}_t \cos(\omega_t t + \varphi_0) = \hat{U}_t \cos\psi(t) \tag{5.26}$$

Ta có:

$$\psi(t) = \int_0^t \omega(t)dt + \varphi(t) \tag{5.27}$$

Thay (5.27) vào (5.26) ta nhận được biểu thức:

$$u_t(t) = \hat{U}_t \cos\left[\int_0^t \omega(t)dt + \varphi(t)\right] \tag{5.28}$$

Giả thiết tín hiệu điều chế là tín hiệu đơn âm:

$$u_s = \hat{U}_s \cos\omega_s t \tag{5.29}$$

Khi điều chế tần số hoặc điều chế pha thì tần số hoặc góc pha của dao động cao tần biến thiên tỷ lệ với tín hiệu điều chế và chúng được xác định:

$$\omega(t) = \omega_t + k_{đt}\hat{U}_s \cos\omega_s t \qquad (5.30)$$

$$\varphi(t) = \varphi_0 + k_{đf}\hat{U}_s \cos\omega_s t \qquad (5.31)$$

ω_t : gọi là tần số trung tâm của tín hiệu điều tần.

Đặt: $k_{đt}\hat{U}_s = \Delta\omega_m$: gọi là lượng di tần cực đại.

$k_{đf}\hat{U}_s = \Delta\varphi_m$: gọi là lượng di pha cực đại.

Do đó: $$\omega(t) = \omega_t + \Delta\omega_m \cos\omega_s t \qquad (5.32)$$

$$\varphi(t) = \varphi_0 + \Delta\varphi_m \cos\omega_s t \qquad (5.33)$$

Khi điều chế tần số thì góc pha đầu không đổi, do đó: $\varphi(t) = \varphi_0$.

Thay (5.32) và (5.33) vào (5.28), ta nhận được biểu thức của dao động đã điều tần:

$$u_{đt}(t) = \hat{U}_t \cos\left(\omega_t t + \frac{\Delta\omega_m}{\omega_s}\sin\omega_s t + \varphi_0\right) \qquad (5.34)$$

Tương tự như vậy, biểu thức của dao động đã điều pha tìm được bằng cách thay $\varphi(t)$ trong (5.28) bởi (5.33) và cho $\omega = \omega_t = const$, ta có:

$$u_{đf}(t) = \hat{U}_t \cos(\omega_t t + \Delta\varphi_m \cos\omega_s t + \varphi_0) \qquad (5.35)$$

Vậy lượng di pha đạt được khi điều pha:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_m \cos\omega_s t$$

Tương ứng với lượng di pha này sẽ có một lượng di tần:

$$\Delta\omega = \frac{d\Delta\varphi}{dt} = \Delta\varphi_m \omega_s \sin\omega_s t$$

Và lượng di tần cực đại đạt được khi điều pha:

$$\Delta\omega_m = \omega_s \cdot \Delta\varphi_m = \omega_s k_{đf}\hat{U}_s \qquad (5.36)$$

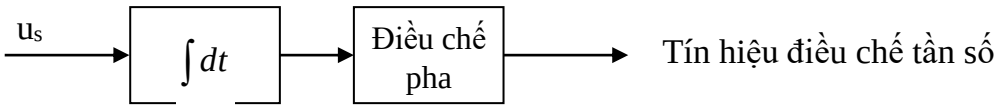
Theo (5.30), lượng di tần cực đại đạt được khi điều tần:

$$\Delta\omega_m = k_{đt}\hat{U}_s \qquad (5.37)$$

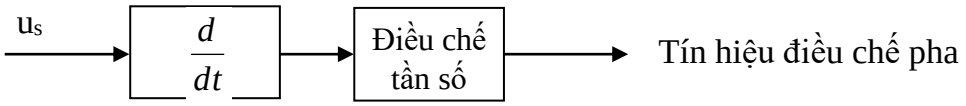
So sánh (5.36) và (5.37) ta thấy rằng: Điểm khác nhau cơ bản giữa điều tần và điều pha là lượng di tần khi điều pha tỷ lệ với biên độ điện áp điều chế và tần số điều chế, còn lượng di tần khi điều tần chỉ tỷ lệ với biên độ điện áp điều chế.

Vì vậy, từ một mạch điều chế pha có thể lấy ra tín hiệu điều chế tần số, nếu trước khi đưa vào điều chế, tín hiệu điều chế được đưa qua một mạch tích phân. Ngược lại, có thể lấy ra tín hiệu điều chế pha từ một mạch điều chế tần số, nếu tín hiệu điều chế được đưa qua một mạch vi phân trước khi đưa vào bộ điều chế.

Sơ đồ khối mạch điều chế tần số thông qua điều chế pha:



Sơ đồ khối mạch điều chế pha thông qua điều chế tần số:



3. Mạch điều tần và điều pha.

Về nguyên tắc có thể phân biệt mạch điều tần gián tiếp và mạch điều tần trực tiếp, cũng như mạch điều pha gián tiếp và điều pha trực tiếp. Trong đó điều tần gián tiếp là điều tần thông qua điều pha và ngược lại, điều pha gián tiếp là điều pha thông qua điều tần.

Trên cơ sở đó, chỉ cần nghiên cứu các mạch điều tần trực tiếp và điều pha trực tiếp, rồi dựa vào sơ đồ khối ta có thể suy ra mạch điều tần gián tiếp và điều pha gián tiếp.

3.1. Mạch điều tần.

Khi điều tần trực tiếp, tần số dao động riêng của mạch tạo dao động được điều khiển theo tín hiệu điều chế.

Mạch điều tần trực tiếp thường được thực hiện bởi các mạch tạo dao động mà tần số dao động riêng của nó được điều khiển bởi dòng hoặc áp (VCO: Voltage Controlled Oscillator và CCO: Circuit Controlled Oscillator) hoặc bởi các mạch biến đổi điện áp – tần số.

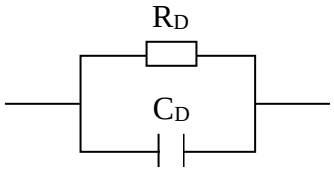
Các mạch tạo dao động có tần số biến đổi theo điện áp đặt vào có thể là các mạch tạo dao động xung hoặc là các mạch tạo dao động điều hòa LC. Các mạch tạo dao động LC cho khả năng biến đổi tần số khá rộng và có tần số trung tâm cao.

Nguyên tắc thực hiện điều tần trong các bộ tạo dao động là làm biến đổi trị số điện kháng của bộ tạo dao động theo điện áp đặt vào.

Phương pháp phổ biến nhất là dùng diode biến dung (Varicap) và transistor điện kháng.

- *Điều tần trực tiếp dùng diode biến dung:*

Diode biến dung có điện dung mặt ghép biến đổi theo điện áp đặt vào, có sơ đồ tương đương:



Trị số của R_D và C_D phụ thuộc vào điện áp đặt lên diode. Trường hợp diode phân cực ngược: $R_D = \infty$ còn C_D được xác định:

$$C_D = \frac{k}{(u_D + \varphi_k)^{\gamma}}$$

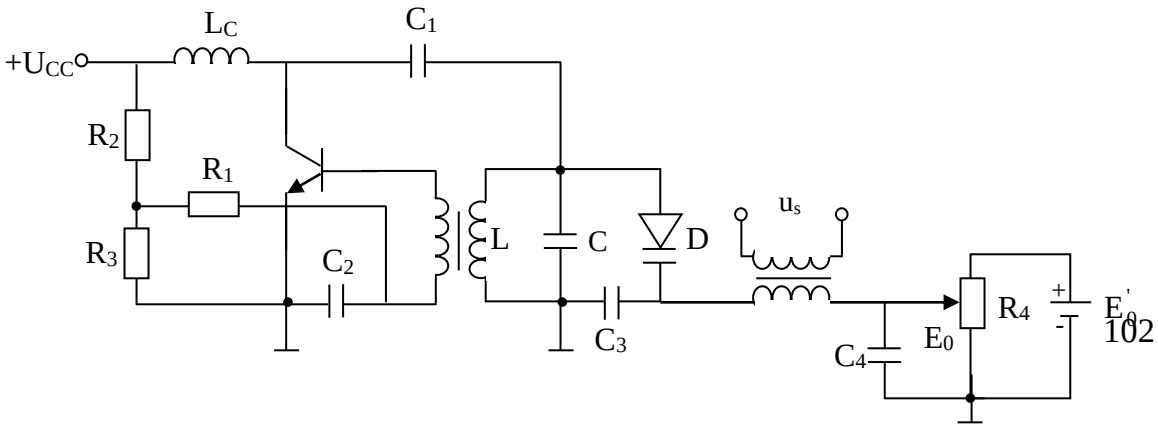
Trong đó: k – Hệ số tỷ lệ.

φ_k - Hiệu điện thế tiếp xúc của mặt ghép, với diode Silic $\varphi_k = 0{,}7\,\text{V}$.

γ - Hệ số phụ thuộc vật liệu, $\gamma = \frac{1}{3} \cdots\cdots \frac{1}{2}$

Mắc diode song song với hệ dao động của bộ tạo dao động, đồng thời đặt điện áp điều chế lên diode thì C_D thay đổi theo điện áp điều chế. Do đó, tần số cộng hưởng riêng của bộ tạo dao động cũng biến đổi theo.

Sơ đồ mạch điện bộ tạo dao động điều tần bằng diode biến dung:



Diode phân cực ngược nhờ nguồn E_0.

Tần số dao động của mạch gần bằng tần số cộng hưởng riêng của hệ dao động và được xác định:

$$f_{dd} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C + C_D)}}$$

Điện áp đặt lên diode:

$$u_D = u_t - u_s - E_0 = \hat{U}_t \cos\omega_t t - \hat{U}_s \cos\omega_s t - E_0$$

Để cho diode luôn luôn được phân cực ngược, phải đảm bảo điều kiện:

$$u_D = u_{D\max} = \hat{U}_t + \hat{U}_s - E_0 \le 0$$

Nhưng điện áp được đặt lên diode cũng không được vượt quá trị số cho phép, nó phải đồng thời thỏa mãn biểu thức:

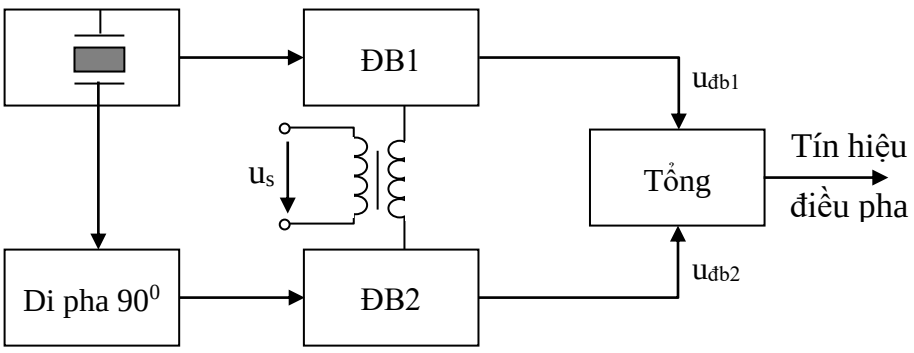
$$u_D = u_{D\min} = \left| -\hat{U}_t - \hat{U}_s - E_0 \right| \le U_{ngcf}$$

Khi điều tần bằng diode biến dung phải chú ý những đặc điểm sau:

+ Chỉ phân cực ngược cho diode để tránh ảnh hưởng của R_D đến phẩm chất của hệ dao động, nghĩa là đến độ ổn định tần số của mạch.
+ Phải hạn chế khu vực làm việc trong đoạn tuyến tính của đặc tuyến C_D (u_D) của diode biến dung để giảm méo phi tuyến.
+ Ở tần số siêu cao tần, yêu cầu độ ổn định thấp có thể dùng diode thường thay diode biến dung.

3.2. Mạch điều pha.

Sơ đồ khối mạch điều pha theo Armstrong:



Mạch điều pha Armstrong được thực hiện theo nguyên lý sau: tải tin từ bộ tạo dao động thạch anh được đưa đến bộ điều biên 1 (ĐB1) và điều biên 2 (ĐB2) lệch pha nhau 90^0, còn tín hiệu điều chế u_s đưa đến 2 mạch điều biên ngược pha.

Điện áp ra trên hai bộ điều biên:

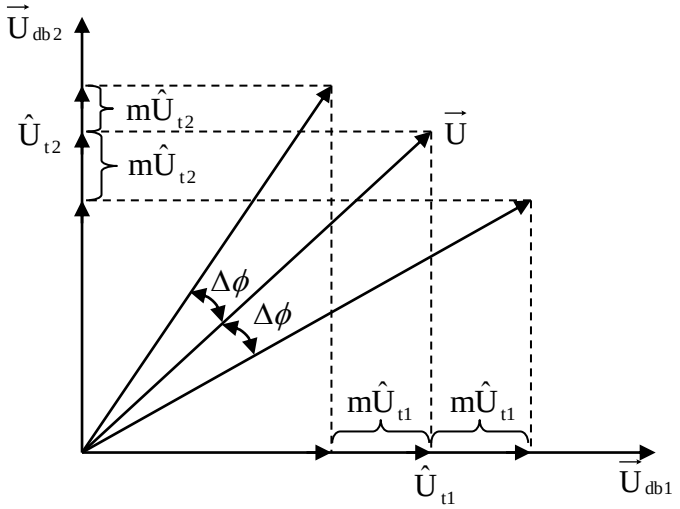
$$u_{đb1} = \hat{U}_{t1}(1 + m\cos\omega_s t)\cos\omega_t t$$

$$= \hat{U}_{t1}\cos\omega_t t + \frac{m\hat{U}_{t1}}{2}\left[\cos(\omega_t + \omega_s)t + \cos(\omega_t - \omega_s)t\right]$$

$$u_{đb2} = \hat{U}_{t2}(1 - m\cos\omega_s t)\sin\omega_t t$$

$$= \hat{U}_{t2}\sin\omega_t t - \frac{m\hat{U}_{t2}}{2}\left[\sin(\omega_t + \omega_s)t + \sin(\omega_t - \omega_s)t\right]$$

Đồ thị véc tơ của $u_{đb1}$, $u_{đb2}$ và véc tơ tổng:



Từ đồ thị, ta thấy rằng: tổng các dao động đã điều biên $u = u_{đb1} + u_{đb2}$ là một dao động được điều chế về pha và về biên độ.

Điều biên ở đây là điều biên ký sinh. Mạch có nhược điểm là lượng di pha nhỏ. Để hạn chế mức điều biên ký sinh, chọn Δφ nhỏ. Để có điều biên ký sinh nhỏ hơn 1% thì $\Delta\phi < 0{,}35$.

III. MẠCH TÁCH SÓNG.

Tách sóng là quá trình tìm lại tín hiệu điều chế. Tín hiệu sau khi tách sóng phải giống dạng tín hiệu điều chế ban đầu.

Thực tế, tín hiệu điều chế u_s sau khi qua điều chế và qua kênh truyền đưa đến bộ tách sóng đã bị méo dạng thành $u_s^{'}$. Do méo phi tuyến trong bộ tách sóng, nên sau khi tách sóng ta lại nhận được $u_s^{''}$ khác dạng với $u_s^{'}$. Như vậy, tín hiệu thu được sau tách sóng thường khác với dạng tín hiệu nguyên thủy (tin tức) u_s. Vì vậy, một trong những yêu cầu cơ bản đối với quá trình tách sóng là yêu cầu về méo phi tuyến.

Tương ứng với các loại điều chế, người ta cũng phân biệt các loại tách sóng:

- Tách sóng biên độ.
- Tách sóng tần số.

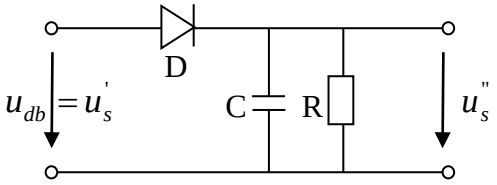
1. Mạch tách sóng biên độ.

Tách sóng biên độ được thực hiện nhờ các mạch chỉnh lưu (dùng phần tử phi tuyến) hoặc các mạch dùng phần tử tuyến tính tham số.

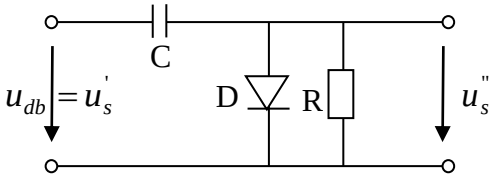
1.1. Mạch tách sóng biên độ bằng mạch chỉnh lưu.

Thường dùng phần tử phi tuyến như diode để tách sóng. Tùy theo cách mắc diode với tải, mà ta có các loại mạch tách sóng khác nhau:

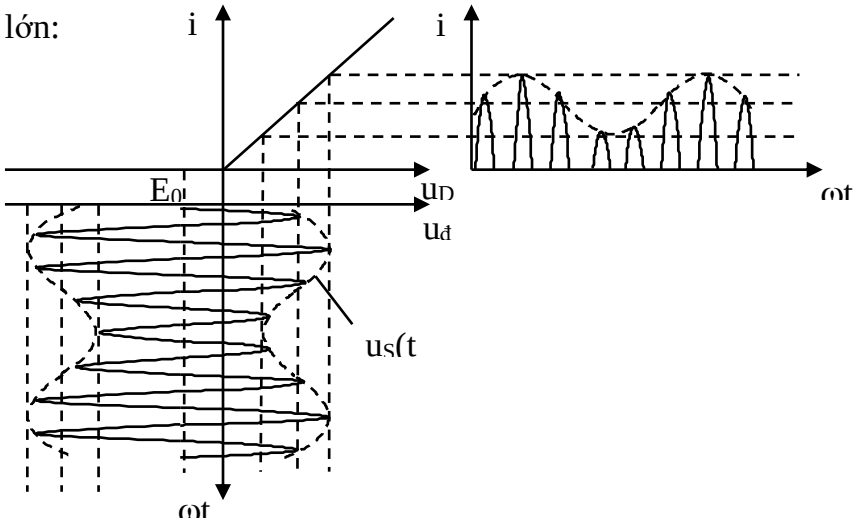
+ Tách sóng nối tiếp: diode tách sóng mắc nối tiếp với tải.



+ Tách sóng song song: diode tách sóng mắc song song với tải.



Nếu tín hiệu vào đủ lớn sao cho diode làm việc trong đoạn tương đối thẳng của đặc tuyến và đặc tuyến của diode có thể coi là một đường gấp khúc thì ta có quá trình tách sóng tín hiệu lớn:



Lúc đó, quan hệ Volt – Ampe của diode được biểu diễn:

$$i_D = \begin{cases} Su_D & khi \;\; u_D \geq 0 \\ 0 & \text{khi} \;\; u_D < 0 \end{cases}$$

Diode chỉ thông đối với nửa chu kỳ dương của dao động cao tần ở đầu vào. Hình bao của dao động cao tần nhận được nhờ sự phóng nạp của tụ C.

Ta phân tích và tính toán sơ đồ tách sóng nối tiếp rồi từ đó suy rộng ra cho sơ đồ tách sóng song song.

Dòng điện qua diode:

$$i_D = S\left(u_{đb} - u_C\right)$$

Với: $u_{đb} = \hat{U}_t\left(1 + m\cos\omega_s t\right)\cos\omega_t t = \hat{U}_{đb}\cos\omega_t t$

Trong đó: $\hat{U}_{đb} = \hat{U}_t\left(1 + m\cos\omega_s t\right)$

Ta có:

$$i_D = S\left(\hat{U}_{đb}\cos\omega_t t - u_C\right)$$

Biết rằng, khi $\omega_t t = \theta$ thì $i_D = 0$, ta có:

$$0 = S\left(\hat{U}_{đb}\cos\theta - u_C\right) \qquad \Rightarrow \cos\theta = \frac{u_C}{\hat{U}_{đb}}$$

Vậy ta có:

$$i_D = S\hat{U}_{đb}\left(\cos\omega_t t - \cos\theta\right) \qquad (5.38)$$

Mặt khác, vì dòng qua diode là một dãy xung hình sin, nên có thể khai triển i_D theo chuỗi Furier như sau:

$$i_D = I_0 + \hat{I}_1\cos\omega_t t + \hat{I}_2\cos 2\omega_t t + ... + \hat{I}_n\cos n\omega_t t + ...$$

Trong đó, theo chuỗi Furier, ta tính được:

$$\left.\begin{aligned} I_0 &= \frac{1}{\pi}\int_0^{\theta} i_D d\omega_t t \\ I_n &= \frac{2}{\pi}\int_0^{\theta} i_D\cos n\omega_t t d\omega_t t \end{aligned}\right\} \qquad (5.39)$$

Với: n = 1, 2, 3, ...

Thay (5.38) vào (5.39) rồi lấy tích phân, nhận được các kết quả sau:

$$I_0 = \frac{S\hat{U}_{db}}{\pi}(\sin\theta - \theta\cos\theta)$$

$$I_1 = \frac{S\hat{U}_{db}}{\pi}(\theta - \sin\theta\cos\theta)$$

.....

I_0 xác định có chứa thành phần 1 chiều thuần túy: $\frac{S\hat{U}_t}{\pi}(\sin\theta - \theta\cos\theta)$ và thành phần biến thiên chậm: $\frac{S\hat{U}_t}{\pi}m(\sin\theta - \theta\cos\theta)\cos\omega_s t$, chính là thành phần hữu ích.

Từ dòng một chiều I_0 xác định điện áp ra trên tải:

$$u_C = RI_0 = \frac{RS}{\pi}\hat{U}_{db}(\sin\theta - \theta\cos\theta)$$

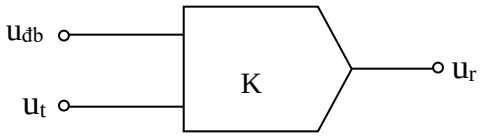
Vậy ta có:

$$\cos\theta = \frac{RS}{\pi}(\sin\theta - \theta\cos\theta) \qquad \Rightarrow tg\theta - \theta = \frac{\pi}{RC}$$

Góc dẫn điện θ chỉ phụ thuộc vào tham số của mạch điện (S,R) mà không phụ thuộc tín hiệu vào. Do đó, ta có kết luận là tách sóng tín hiệu lớn là tách sóng không gây méo phi tuyến.

1.2. Mạch tách sóng biên độ dùng phần tử tuyến tính tham số.

Bộ tách sóng biên độ dùng mạch nhân tương tự:



Tín hiệu cần tách sóng:

$$u_{đb} = \hat{U}_t(1 + m\cos\omega_s t)\cos\omega_t t$$

Tín hiệu tải tin:

$$u_t = \hat{U}_t \cos(\omega_t t + \varphi)$$

Trên đầu ra sẽ có tín hiệu:

$u_r = u_{db} \cdot u_t \cdot K$ K là hệ số nhân của mạch tương tự.

$$\Rightarrow u_r = \frac{KU_t^2}{2}(1 + m\cos\omega_s t)\cos\varphi + KU_t^2\left(\frac{1 + m\cos\omega_s t}{2}\right)\cos(2\omega_t t + \varphi)$$

Dùng mạch lọc thông thấp có thể tách ra thành phần hữu ích:

$$u_s^{"} = \frac{KU_t^2}{2}(1 + m\cos\omega_s t)\cos\varphi$$

Có thể rút ra những nhận xét sau:

+ Trong phổ điện áp ra không có thành phần tải tin. Thực tế, do mạch nhân không hoàn toàn đối xứng nên phổ điện áp ra có chứa tải tin với biên độ nhỏ.
+ Muốn tách sóng được, điện áp u_t đặt ở đầu vào thứ hai của mạch nhân phải có tần số bằng tần số tải tin của tín hiệu đã điều biên.
+ Biên độ điện áp đầu ra bộ tách sóng phụ thuộc vào góc pha φ, với φ là góc lệch pha giữa tín hiệu cần tách sóng và tải tin phụ.

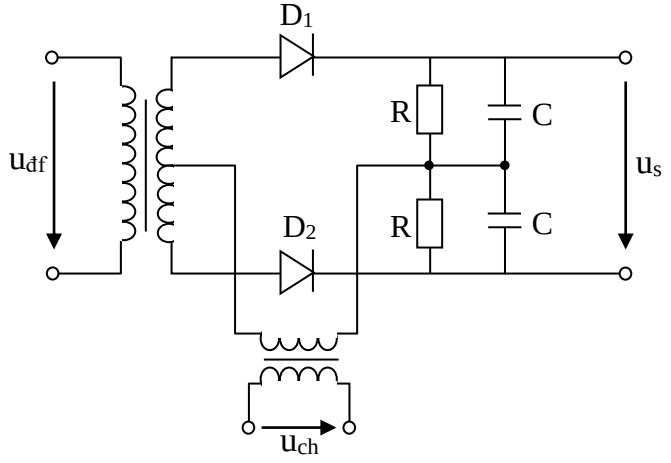
  Khi φ = 0; π thì biên độ cực đại.

  Khi $\varphi = \pm\frac{\pi}{2}$ thì biên độ = 0.

2. Mạch tách sóng tần số.

2.1. Mạch tách sóng pha dùng diode.

Mạch tách sóng pha cân bằng là hai mạch tách sóng biên độ dùng diode ghép với nhau:



Tín hiệu cần tách sóng chính là tín hiệu đã điều pha $u_{đf}$ được so sánh về pha với một dao động chuẩn u_{ch} như sau:

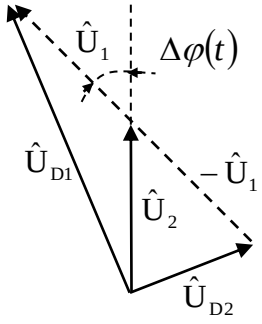
$$u_{đf} = \hat{U}_1 \cos\left[\omega_{01}t + \varphi(t) + \varphi_{01}\right] = \hat{U}_1 \cos\varphi_1(t)$$

$$u_{ch} = \hat{U}_2 \cos\left(\omega_{02}t + \varphi_{02}\right) = \hat{U}_2 \cos\varphi_2(t)$$

Điện áp đặt lên hai bộ tách sóng biên độ (diode D_1, D_2) tương ứng là:

$$u_{D1} = \hat{U}_1 \cos\left[\omega_{01}t + \varphi(t) + \varphi_{01}\right] + \hat{U}_2 \cos\left(\omega_{02}t + \varphi_{02}\right)$$
$$u_{D2} = -\hat{U}_2 \cos\left[\omega_{01}t + \varphi(t) + \varphi_{01}\right] + \hat{U}_2 \cos\left(\omega_{02}t + \varphi_{02}\right)$$

Điện áp ra tương ứng trên hai bộ tách sóng biên độ xác định theo đồ thị véc tơ:



$$\hat{U}_I(t) = u_{s1} = K_{TS}\hat{U}_{D1} = K_{TS}\sqrt{\hat{U}_1^2 + \hat{U}_2^2 + 2\hat{U}_1\hat{U}_2\cos\Delta\varphi(t)}$$
$$\hat{U}_{II}(t) = u_{s2} = K_{TS}\hat{U}_{D2} = K_{TS}\sqrt{\hat{U}_1^2 + \hat{U}_2^2 - 2\hat{U}_1\hat{U}_2\cos\Delta\varphi(t)}$$

Trong đó:

K_{TS} là hệ số truyền đạt của bộ tách sóng biên độ, được xác định:

$$K_{TS} = \frac{u_s}{mU_t}$$

$\Delta\varphi(t)$ là hiệu pha của hai điện áp vào:

$$\Delta\varphi(t) = (\omega_{01} - \omega_{02})t + \varphi(t) + \varphi_{01} - \varphi_{02}$$

Điện áp ra trên bộ tách sóng:

$$u_s = u_{s1} - u_{s2}$$
$$= K_{TS}\left(\sqrt{\hat{U}_1^2 + \hat{U}_2^2 + 2\hat{U}_1\hat{U}_2\cos\Delta\varphi(t)} - \sqrt{\hat{U}_1^2 + \hat{U}_2^2 - 2\hat{U}_1\hat{U}_2\cos\Delta\varphi(t)}\right)$$

Vậy trị tức thời của điện áp ra trên bộ tách sóng phụ thuộc vào hiệu pha của tín hiệu điều pha và tín hiệu chuẩn.

Trường hợp $\omega_{01} = \omega_{02}$ và $\varphi_{01} = \varphi_{02}$ thì điện áp ra chỉ còn phụ thuộc vào pha của tín hiệu vào $\varphi(t)$.

Nếu $\omega_{01} = \omega_{02}$ và tín hiệu vào không phải là tín hiệu điều chế pha, nghĩa là $\varphi(t) = 0$ thì điện áp ra có biểu thức sau:

$$u_s = K_{TS}\left(\sqrt{\hat{U}_1^2 + \hat{U}_2^2 + 2\hat{U}_1\hat{U}_2\cos\Delta\varphi_0} - \sqrt{\hat{U}_1^2 + \hat{U}_2^2 - 2\hat{U}_1\hat{U}_2\cos\Delta\varphi_0}\right)$$

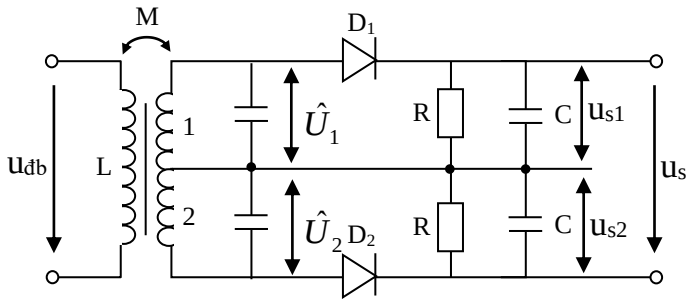
Đặc tuyến truyền đạt của bộ tách sóng pha cân bằng $u_s = f(\Delta\phi)$ là một hàm số tuần hoàn theo hiệu pha:

- Đạt cực đại khi: $\Delta\varphi_0 = 0; 2\pi; 4\pi; .....$
- Đạt cực tiểu khi: $\Delta\varphi_0 = \pi; 3\pi; 5\pi; .....$
- Bằng không khi: $\Delta\varphi_0 = (2n+1)\frac{\pi}{2}$ Với: n = 0, 1, 2, …

Nguyên lý làm việc của mạch này dựa vào sự so pha của hai dao động giống như trong mạch tách sóng đồng bộ. Vì vậy, có thể dùng mọi sơ đồ tách sóng đồng bộ để tách sóng pha.

2.2. Mạch tách sóng tần số dùng mạch lệch cộng hưởng.

Sơ đồ mạch:



Đầu vào hai bộ tách sóng biên độ (D_1, D_2) là hai mạch cộng hưởng được điều chỉnh cộng hưởng tại các tần số ω_1 và ω_2.

Nếu gọi tần số trung tâm của tín hiệu điều tần đầu vào là $\omega_0 = \omega_t$ thì:

$$\omega_1 = \omega_0 + \Delta\omega_0$$
$$\omega_2 = \omega_0 - \Delta\omega_0$$

Điều chỉnh mạch cộng hưởng lệch khỏi tần số trung bình của tín hiệu vào làm biên độ điện áp vào của hai bộ tách sóng biên độ (U_1, U_2) thay đổi phụ thuộc vào tần số điện áp vào.

Ta có:

$$\hat{U}_1 = m\hat{U}_{dt}Z_1$$
$$\hat{U}_2 = m\hat{U}_{dt}Z_2$$

Trong đó: m là hệ số ghép của biến áp vào: $m = \frac{M}{L}$.

Z_1 và Z_2 là trở kháng của hai mạch cộng hưởng 1 và 2. Tương tự như mạch điều chế pha dùng mạch lọc, ta có:

$$Z = \frac{R_{td}}{1 + jQ\frac{2\Delta\omega}{\omega_t}}$$

$$\Rightarrow \; Z_1 = \frac{R_{td1}}{\sqrt{1 + \left[2Q_1\frac{(\omega - \omega_1)}{\omega_1}\right]^2}} = \frac{R_{td1}}{\sqrt{1 + (\xi - \xi_0)^2}}$$

$$Z_2 = \frac{R_{td2}}{\sqrt{1 + \left[2Q_2\frac{(\omega - \omega_2)}{\omega_2}\right]^2}} = \frac{R_{td2}}{\sqrt{1 + (\xi + \xi_0)^2}}$$

R_{td1}, R_{td2} lần lượt là trở kháng của hai mạch cộng hưởng tại tần số cộng hưởng ω_1, ω_2.

Q_1, Q_2 là phẩm chất của các mạch cộng hưởng tương ứng.

Chọn hai mạch cộng hưởng như nhau, ta có:

$$R_{td1} = R_{td2} = R_{td}$$
$$Q_1 = Q_2 = Q$$

$\xi_0 = 2Q\frac{|\omega_0 - \omega_{1,2}|}{\omega_0}$ là độ lệch tần số tương đối giữa tần số cộng hưởng riêng của mạch dao động so với tần số trung bình của tín hiệu vào.

$\xi = 2Q\dfrac{|\omega - \omega_0|}{\omega_0}$ là độ lệch tần số tương đối giữa tần số tín hiệu vào và tần số trung bình.

Khi tần số tín hiệu vào ω thay đổi thì Z_1, Z_2 thay đổi, kéo theo sự thay đổi của biên độ điện áp vào $\hat{U}_1$ và $\hat{U}_2$, nghĩa là quá trình biến đổi tín hiệu điều tần thành tín hiệu điều biên đã được thực hiện.

Qua bộ tách sóng biên độ, ta nhận được tín hiệu ra:

$$u_{s1} = K_{TS}\hat{U}_1 = K_{TS}m\hat{U}_{dt}\frac{R_{td1}}{\sqrt{1+(\xi_0 - \xi)^2}}$$

$$u_{s2} = K_{TS}\hat{U}_2 = K_{TS}m\hat{U}_{dt}\frac{R_{td2}}{\sqrt{1+(\xi_0 + \xi)^2}}$$

Điện áp ra tổng:

$$u_s = u_{s1} - u_{s2} = K_{TS}mR_{td}\hat{U}_{dt}\Psi(\xi, \xi_0)$$

Trong đó: $\Psi(\xi, \xi_0) = \dfrac{1}{\sqrt{1+(\xi_0 - \xi)^2}} - \dfrac{1}{\sqrt{1+(\xi_0 + \xi)^2}}$

$$\Psi = \Psi_{\max} \quad \text{khi}: \ \xi = \pm\xi_0$$

Tách sóng dùng mạch lệch cộng hưởng có nhược điểm là khó điều chỉnh cho hai mạch cộng hưởng hoàn toàn đối xứng nên ít được dùng.

Ví dụ 3:

Cho tín hiệu điều biên với hệ số điều chế $m = 50\%$, tần số điều chế $f_s = 10\,kHz$, tải tin có biên độ 5 mV và tần số $f_t = 10\ MHz$.

a. Viết phương trình biểu diễn tín hiệu đã điều biên đó.

b. Tính phổ của tín hiệu đó.

c. Sau khi khuếch đại, ta thực hiện đổi tần số. Đầu ra bộ đổi tần là tín hiệu có biên độ lớn hơn biên độ tín hiệu vào 1000 lần và tần số 1 MHz.

- Viết biểu thức tín hiệu ra sau bộ đổi tần.

- Vẽ sơ đồ tách sóng cho tín hiệu đó.

- Vẽ đồ thị thời gian của tín hiệu ra sau diode và tín hiệu ra tải và viết biểu thức tính hằng số thời gian phóng và nạp của sơ đồ.

- Dùng diode tách sóng có điện trở trong 60Ω. Cho góc cắt dòng $2\theta_0 = 12^0$, tính điện trở tải của bộ tách sóng.

Giải:

a. Tín hiệu đã điều biên có phương trình:

$$u_{đb} = \hat{U}_t(1 + m\cos\omega_s t)\cos\omega_t t = 5\cdot 10^{-3}\left(1 + 0{,}5\cos 2\pi\cdot 10^4 t\right)\cdot\cos 2\pi\cdot 10^7 t$$

b. Ta có:

$$u_{đb} = \hat{U}_t\cos\omega_t t + \frac{m}{2}\hat{U}_t\cos(\omega_t + \omega_s)t + \frac{m}{2}\hat{U}_t\cos(\omega_t - \omega_s)t$$

$$= 5\cdot 10^{-3}\cos 2\pi\cdot 10^7 t + \frac{0{,}5}{2}\cdot 5\cdot 10^{-3}\cos 2\pi\left(10^7 + 10^4\right)t +$$

$$+\frac{0{,}5}{2}\cdot 5\cdot 10^{-3}\cos 2\pi\left(10^7 - 10^4\right)t$$

$$\Rightarrow u_{đb} \approx 5\cdot 10^{-3}\cos 2\pi\cdot 10^7 t + 1{,}25\cdot 10^{-3}\cos 2\pi\cdot 1001\cdot 10^4 t +$$

$$+1{,}25\cdot 10^{-3}\cos 2\pi\cdot 999\cdot 10^4 t$$

Vậy phổ của tín hiệu điều biên gồm có:

+ Tải tin $f_t = 10\ MHz$ với biên độ $A_t = 5\ mV$.

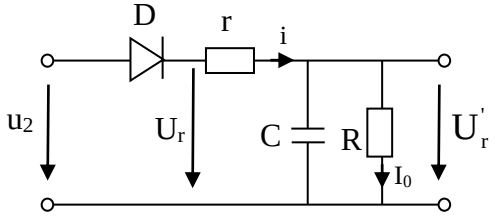
+ Biên tần trên $f_{tr} = 1001\cdot 10^4\ Hz$ với biên độ $A_{tr} = 1{,}25\ mV$.

+ Biên tần dưới $f_d = 999\cdot 10^4\ Hz$ với biên độ $A_d = 1{,}25\ mV$.

c. Tín hiệu ra sau bộ đổi tần:

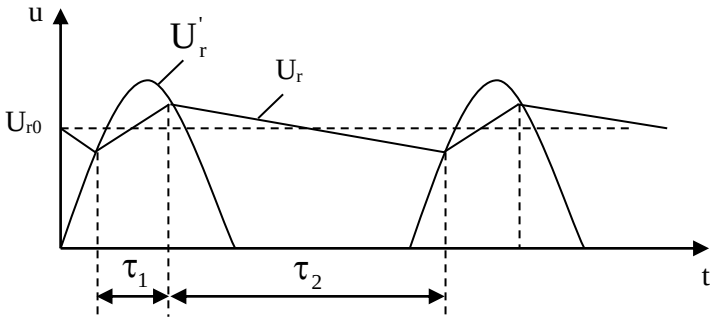
$$u_2 = 5\left(1 + 0{,}5\cos 2\pi\cdot 10^4 t\right)\cdot\cos 2\pi\cdot 10^6 t$$

Sơ đồ tách sóng:



r là điện trở trong của diode.

Đồ thị thời gian của tín hiệu ra sau diode và tín hiệu ra tải:



Thời gian nạp của mạch: $\tau_1 = \dfrac{rR}{r+R}C$

Thời gian phóng của mạch: $\tau_2 = RC$

Ta có:

$$u_r^{'} = u_{r0} + ri \Rightarrow i = \frac{u_r^{'} - u_{r0}}{r} = \frac{U_1 \cos \omega t - u_{r0}}{r}$$

Khi $i = 0$ thì $\omega t = \theta_0$ nên $U_1 \cos\theta = u_{r0} \Rightarrow \cos\theta = \dfrac{u_{r0}}{U_1}$

Vậy: $i = \dfrac{U_1 \cos \omega t - u_{r0}}{r} = \dfrac{U_1}{r}\cos \omega t - \dfrac{U_1}{r}\cos\theta_0$

Dòng điện chạy qua điện trở tải R:

$$I_0 = \frac{1}{T}\int_0^T i dt = \frac{1}{2\pi}\int_{-\theta}^{\theta}\frac{U_1}{r}\left(\cos\omega t - \cos\theta_0\right)d\omega t$$

$$= \frac{U_1}{\pi r}\left(\sin\theta_0 - \theta_0\cos\theta_0\right)$$

Mà: $I_0 = \dfrac{u_{r0}}{R} = \dfrac{U_1\cos\theta_0}{R}$

$$\Rightarrow \frac{U_1}{\pi r}\left(\sin\theta_0 - \theta_0\cos\theta_0\right) = \frac{U_1\cos\theta_0}{R} \Rightarrow tg\theta_0 - \theta_0 = \frac{\pi r}{R}$$

Vì $\theta_0 = 6^0$ nên $tg\theta_0 \approx 0{,}101$

Ta có:

$$R = \frac{\pi r}{tg\theta_0 - \theta_0} = \frac{60\pi}{0{,}101 - \frac{6\pi}{180}} \approx 200\ k\Omega$$

Ví dụ 4:

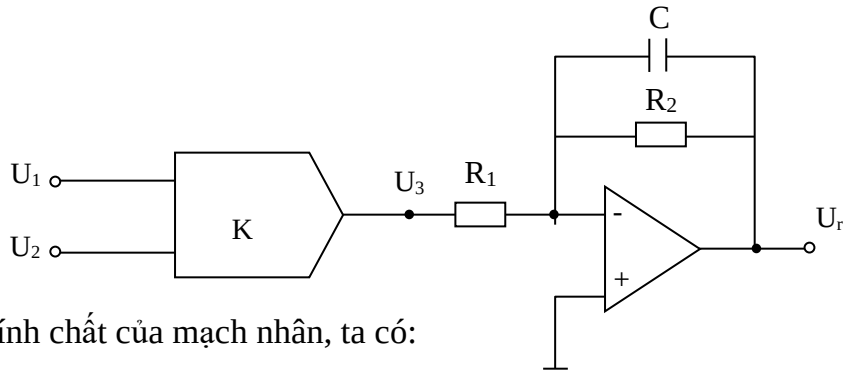
Cho tín hiệu $u_1 = U_1 \cos(\omega t + \varphi)$.

Vẽ sơ đồ bộ tách sóng pha dùng bộ nhân và mạch lọc tích cực để tách sóng tín hiệu này. Tính giá trị tương đối của các phần tử của mạch lọc tích cực sao cho $u_r = 9\cos\varphi$ *(V)*. Biết hệ số nhân của bộ nhân: *K = 1*, biên độ điện áp vào: *U1 = 3V* và tần số giới hạn của bộ lọc bậc 1: f_g *= 1000 Hz.*

Giải:

Để tách sóng dùng bộ nhân phải dùng tách sóng đồng bộ. Ở đầu vào bộ nhân ngoài tín hiệu vào u_1 phải có thêm tín hiệu đồng bộ $u_2 = U_2 \cos\omega t = 1\cos\omega t$.

Sơ đồ tách sóng được biểu diễn như sau:



Theo tính chất của mạch nhân, ta có:

$$u_3 = Ku_1u_2 = \frac{KU_1U_2}{2}\left[\cos\varphi + \cos(2\omega t + \varphi)\right]$$

Trong tín hiệu ra mạch nhân theo biểu thức trên có thành phần 2ω. Thành phần này được lọc bỏ nhờ khâu lọc tích cực bậc 1 gồm bộ khuếch đại thuật toán và các linh kiện R_1, R_2, C.

Theo tính chất của khâu lọc, ta có hệ số truyền đạt ở tần số thấp:

$$K_{d0} = \frac{U_r}{U_3} = \frac{R_2}{R_1}$$

Với: $U_r = 9\ V$

$$U_3 = \frac{KU_1U_2}{2} = \frac{3}{2} = 1{,}5\,V$$

$$\Rightarrow K_{d0} = \frac{9}{1{,}5} = \frac{R_2}{R_1} \Rightarrow R_2 = 6R_1$$

Ta có:

$$f_g = \frac{1}{2\pi R_2 C} \Rightarrow C = \frac{1}{2\pi f_g R_2} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^3 \cdot 6R_1} \approx \frac{0{,}026 \cdot 10^{-3}}{R_1} = \frac{26}{R_1}\,\mu F$$

Ví dụ 5:

Bộ tách sóng tần số dùng mạch lệch cộng hưởng có tín hiệu điều tần ở đầu vào. Cho biết:

- Lượng di tần cực đại của tín hiệu vào: $\Delta f_{đt} = \pm 15\,kHz$.

- Tần số trung tâm: $f_0 = 6\,MHz$.

Tính:

a. Các tham số của mạch dao động đầu vào cho trường hợp hệ số truyền đạt của bộ tách sóng là lớn nhất. Biết:

$$L_1 = L_2 = 10\,\mu H, \quad Q_1 = Q_2 = Q$$

Lượng di tần tương đối cực đại: $\xi_{\max} = \frac{1}{2}\xi_0$

Các tham số cần tính gồm có:

+ Hệ số phẩm chất Q.

+ Điện trở tương đương của mạch cộng hưởng $R_{tđ}$.

+ Tần số cộng hưởng của mạch cộng hưởng 1, 2 là f_1, f_2.

+ Điện dung các tụ C_1, C_2 của hai mạch cộng hưởng.

b. Khi tín hiệu điều tần ở đầu vào có lượng di tần $\Delta f_{đt} = \pm 50\,kHz$ thì phải thay đổi tham số nào của mạch dao động để tín hiệu tách sóng không bị méo dạng. Thay đổi thông số đó có ảnh hưởng gì đến tính tách sóng của mạch?

Giải:

a. Biết rằng: $\xi_{\max} = \frac{1}{2}\xi_0$, do đó:

$$\Delta\omega_{đt} = \frac{1}{2}\Delta\omega_0 \Rightarrow \Delta f_0 = 2\Delta f_{đt} = 2 \cdot 15\,kHz = 30\,kHz$$

Vậy: $f_1 = f_0 + \Delta f_0 = 6{,}03\,MHz$

$$f_2 = f_0 - \Delta f_0 = 5{,}97\,MHz$$

Để có hệ số truyền đạt của bộ tách sóng lớn nhất phải đảm bảo điều kiện $\xi_0 = \frac{1}{\sqrt{2}}$. Do đó:

$$\xi_0 = 2Q\frac{\Delta\omega_0}{\omega_0} = \frac{1}{2\sqrt{2}} \Rightarrow Q = \frac{1}{2\sqrt{2}}\frac{\omega_0}{\Delta\omega_0} = \frac{1}{2\sqrt{2}}\frac{6 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^4} \approx 71$$

$$C_1 = \frac{1}{4\pi^2 f_1^2 L} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 6{,}03^2 \cdot 10^{12} \cdot 10^{-5}} \approx 70\ pF$$

$$C_1 = \frac{1}{4\pi^2 f_2^2 L} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 5{,}97^2 \cdot 10^{12} \cdot 10^{-5}} \approx 71\ pF$$

$$R_{tđ1} = \omega_1 LQ = 2\pi \cdot 6{,}03 \cdot 10^6 \cdot 10^{-5} \cdot 71 \approx 26{,}8\ k\Omega$$

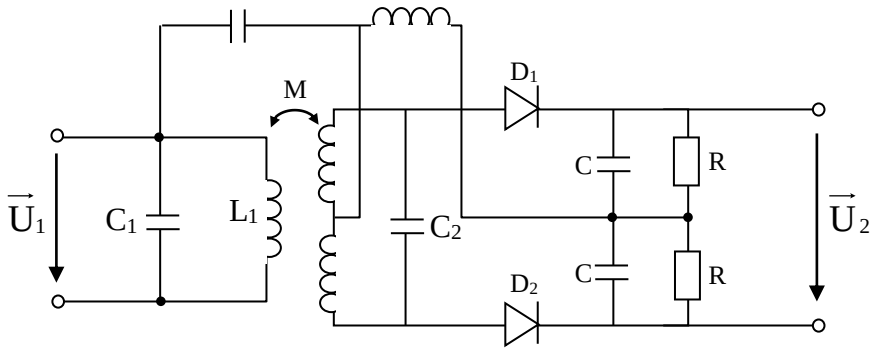
$$R_{tđ2} = \omega_2 LQ = 2\pi \cdot 5{,}97 \cdot 10^6 \cdot 10^{-5} \cdot 71 \approx 26{,}6\ k\Omega$$

b. Khi $\Delta f_{đt} = \pm 50\,kHz$; vì $\xi_{\max} = \frac{1}{2}\xi_0$ nên $\Delta f_0 = \pm 100\ kHz$

Nếu giữ ξ_0 không đổi mà tăng Δf_0 thì buộc phải giảm hệ số phẩm chất *Q*, do đó tính chọn lọc ở đầu vào giảm.

Ví dụ 6:

Cho sơ đồ bộ tách sóng tần số dùng mạch cộng hưởng ghép như hình vẽ:



Cho biết:

- Tần số trung tâm của tín hiệu điều tần $f_0 = 10\ MHz$.
- Lượng di tần cực đại $\Delta f_{\max} = 50\ kHz$.
- $L_1 = L_2 = 2{,}56\ \mu H$.

Giả thiết phẩm chất của hai mạch cộng hưởng như nhau.

Tính:

a. Hệ số hỗ cảm M tối thiểu để mạch tách sóng ít méo.

b. Khi hệ số hỗ cảm M tăng thì chất lượng tách sóng như thế nào?

Giải:

a. Để mạch tách sóng ít méo, phải đảm bảo điều kiện: $\xi_{\max} \le \frac{1}{2}\beta$, thay vào ta có:

$$2Q\frac{\Delta f_{\max}}{f_0} \le \frac{1}{2}\beta = \frac{1}{2}kQ = \frac{1}{2}\frac{M}{L}Q$$

$$\Rightarrow M \ge 4\frac{\Delta f_{\max}}{f_0}$$

$$\Rightarrow M_{\min} = 4\frac{\Delta f_{\max}}{f_0} \approx 51{,}2\ nH$$

b. Khi M tăng thì méo giảm, nhưng hệ số tách sóng S_t cũng giảm, do đó độ nhạy của bộ tách sóng giảm.

IV. TRỘN TẦN.

1. Lý thuyết chung về trộn tần.

1.1. Định nghĩa.

Trộn tần là quá trình tác động lên hai tín hiệu sao cho trên đầu ra bộ trộn tần nhận được các thành phần tần số tổng và hiệu của hai tín hiệu đó.

Thông thường một trong hai tín hiệu vào là tín hiệu đơn âm (có 1 vạch phổ), tín hiệu đó gọi là tín hiệu ngoại sai và có tần số là f_{ns}. Tín hiệu còn lại là tín hiệu hữu ích với tần số f_{th} cố định hoặc biến thiên trong một phạm vi nào đó. Tín hiệu có tần số mong muốn được tách ra nhờ một bộ lọc, gọi là tần số trung gian f_{tg}.

Cũng giống như trong điều biên, để trộn tần có thể dùng các phần tử phi tuyến hoặc các phần tử tuyến tính tham số.

1.2. Nguyên lý trộn tần.

Giả thiết đặc tuyến của phần tử phi tuyến được biểu diễn theo chuỗi Taylor sau:

$$i = a_0 + a_1 u + a_2 u^2 + ... + a_n u^n + ...$$

Trong đó: u là điện áp đặt lên phần tử phi tuyến được dùng để trộn tần.

Trong trường hợp này: $u = u_{ns} + u_{th}$.

Giả thiết: $u_{ns} = \hat{U}_{ns} \cos \omega_{ns} t$

$$u_{th} = \hat{U}_{th} \cos \omega_{th} t$$

Ta có:

$$i = a_0 + a_1 \left(\hat{U}_{ns} \cos \omega_{ns} t + \hat{U}_{th} \cos \omega_{th} t \right) + \frac{a_2}{2} \left(\hat{U}_{ns}^2 + \hat{U}_{th}^2 \right) +$$

$$+ \frac{a_2}{2} \left(\hat{U}_{ns}^2 \cos 2\omega_{ns} t + + \hat{U}_{th}^2 \cos 2\omega_{th} t \right) +$$

$$+ a_2 \hat{U}_{ns} \hat{U}_{th} \left[\cos(\omega_{ns} + \omega_{th}) t + \cos(\omega_{ns} - \omega_{th}) t \right] + ...$$

Vậy tín hiệu ra gồm có:

- Thành phần một chiều, thành phần cơ bản: $\omega_{ns}, \omega_{\text{th}}$.
- Thành phần tần số tổng và hiệu: $\omega_{ns} \pm \omega_{\text{th}}$.
- Thành phần bậc cao: $2\omega_{ns}, 2\omega_{th}$.
- Còn có các thành phần bậc cao: $\omega = \left| \pm n\omega_{ns} \pm m\omega_{\text{th}} \right|$

Nếu trên đầu ra bộ trộn tần tín hiệu có $\omega = \omega_{ns} \pm \omega_{\text{th}}$, nghĩa là chọn *m = n =1* thì ta có *trộn tần đơn giản*. Trường hợp chọn *m, n > 1* thì có *trộn tần tổ hợp*.

Thông thường người ta hay dùng trộn tần đơn giản. Trong đoạn sóng mét và desimet, để nâng cao độ ổn định tần số ngoại sai và giảm ảnh hưởng tương hỗ giữa mạch ngoại sai và mạch tín hiệu, người ta có thể dùng trộn tần tổ hợp với tần số tín hiệu ra:

$$\omega = n\omega_{ns} - \omega_{th} \qquad (\text{n} \geq 2)$$

1.3. Phân loại.

Có thể phân loại mạch trộn tần theo nhiều cách:

- Phân loại theo phần tử tích cực:
  - + Trộn tần dùng phần tử tuyến tính tham số (mạch nhân).
  - + Trộn tần dùng phần tử phi tuyến (diode, BJT, FET,.....).
- Phân loại theo sơ đồ trộn tần:
  - + Trộn tần diode.
  - + Trộn tần transistor.....

1.4. Ứng dụng.

Trộn tần được dùng trong máy thu đổi tần. Nhờ bộ trộn tần, mạch cộng hưởng của các tầng trung gian của máy thu đều được điều chỉnh cộng hưởng tại một tần số cố định (tần số trung gian f_{tg}). Tần số ngoại sai được đồng chuẩn với tần số tín hiệu vào sao cho:

$$f_{tg} = f_{ns} - f_{th} = const.$$

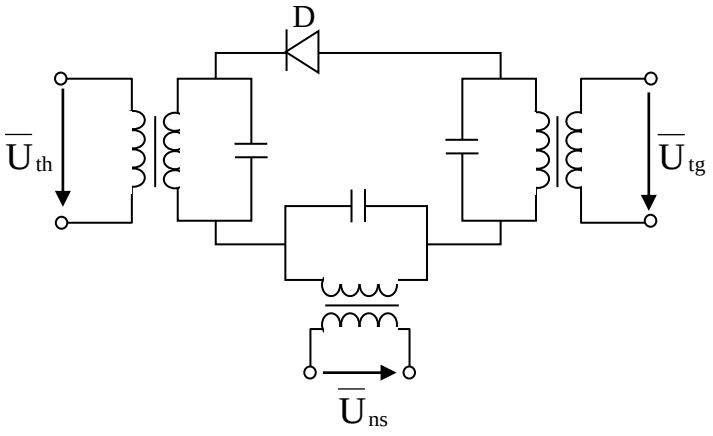
Ngoài ra, trộn tần còn được dùng trong các hệ thống thông tin định hướng, trong các bộ tổng hợp tần số, ...

2. Mạch trộn tần dùng diode.

Các mạch trộn tần dùng diode được ứng dụng rộng rãi ở mọi tần số, đặc biệt ở phạm vi tần số cao (trên 1 GHz). Mạch trộn tần dùng diode có nhược điểm là làm suy giảm tín hiệu.

2.1. Mạch trộn tần đơn.

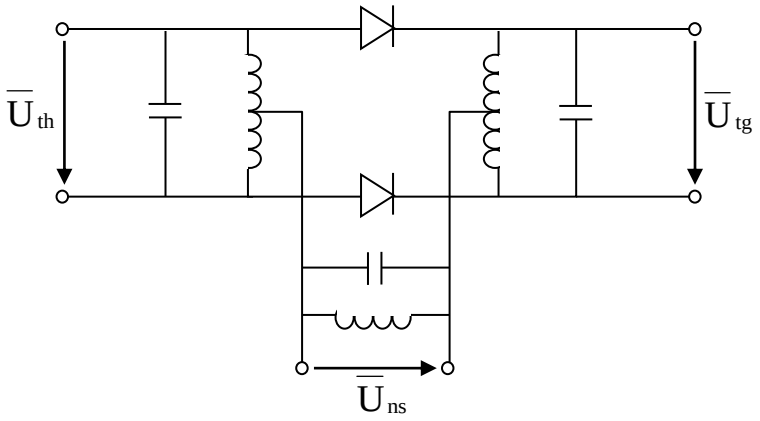
Sơ đồ mạch:



Diode, mạch tín hiệu, mạch ngoại sai và mạch trung gian được mắc nối tiếp với nhau. Mạch trung gian và mạch tín hiệu đối xứng với nhau, do đó có thể đổi lẫn cho nhau, nghĩa là trong mạch có hiện tượng trộn tần ngược.

2.2. Mạch trộn tần cân bằng.

Sơ đồ mạch:



Trong bộ trộn tần cân bằng điện áp tín hiệu đặt lên hai diode ngược pha, còn điện áp ngoại sai đặt lên hai diode đồng pha, nghĩa là:

$$\begin{cases} u_{thD1} = \hat{U}_{th}\cos\omega_{th}t \\ u_{thD2} = \hat{U}_{th}\cos(\omega_{th}t + \pi) \end{cases}$$

Và: $u_{nsD1} = u_{nsD1} = u_{ns}$

Do đó, dòng điện tần số trung gian qua các diode (do u_{th} tạo ra):

$$i_{tg1} = \hat{I}_{tg1}\cos(\omega_{ns} - \omega_{th})t$$
$$i_{tg2} = -\hat{I}_{tg2}\cos[(\omega_{ns} - \omega_{th})t + \pi] = \hat{I}_{tg2}\cos(\omega_{ns} - \omega_{th})t$$

Trên mạch cộng hưởng ra, ta nhận được:

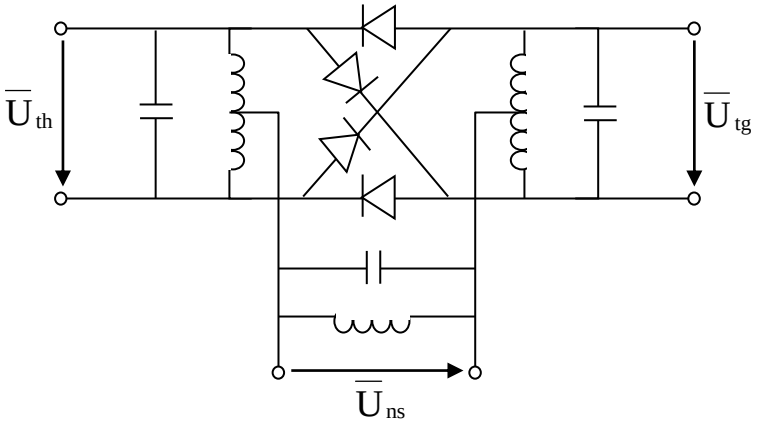
$$i_{tg} = i_{tg1} + i_{tg2} = 2\hat{I}_{tg}\cos\omega_{tg}t$$

Vậy, mạch trộn tần cân bằng làm tăng dòng điện trung gian ở đầu ra và có khả năng khử tạp âm tần số trung gian do nguồn ngoại sai mang đến.

Ngoài ra, cũng giống như trong mạch điều chế cân bằng trên, đầu ra mạch trộn tần cân bằng không có các thành phần tổ hợp ứng với hài bậc chẵn của tín hiệu $(\omega_{ns} \pm 2\omega_{th},\ \omega_{ns} \pm 4\omega_{th}, ...)$.

2.3. Mạch trộn tần vòng.

Gồm hai mạch trộn tần cân bằng mắc nối tiếp.



Ở đầu ra chỉ có thành phần tần số $\omega_{ns} \pm \omega_{th}$, các thành phần khác bị khử. Do đó, dễ tách được thành phần tần số trung gian mong muốn.