

KHUẾCH ĐẠI CÔNG SUẤT

3.1. ĐỊNH NGHĨA – PHÂN LOẠI

3.1.1. Định nghĩa

Các mạch khuếch đại đã nghiên cứu ở chương trước, tín hiệu ra ở các mạch đó còn nhỏ. Để tín hiệu ra đủ lớn đáp ứng yêu cầu các phụ tải, ví dụ: cho loa (radio – casttset); cho các cuộn lái tia (tivi) v.v... ta phải dùng đến mạch khuếch đại công suất. Để tín hiệu ra có công suất lớn và chất lượng đáp ứng những yêu cầu của tải như độ méo phi tuyến, hiệu suất các mạch vì thế mạch công suất phải được nghiên cứu khác với mạch khuếch đại trước đó.

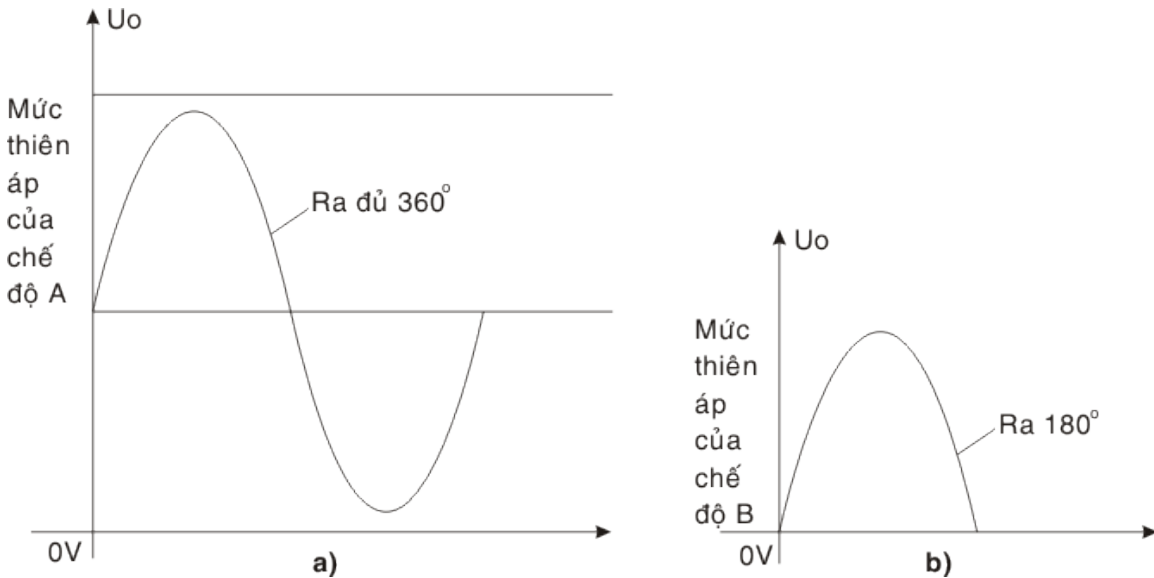
Vậy khuếch đại công suất là tầng khuếch đại cuối cùng của bộ khuếch đại, có tín hiệu vào lớn. Nó có nhiệm vụ cho ra tải một công suất lớn nhất có thể được, với độ méo cho phép và đảm bảo hiệu suất cao.

Do khuếch đại tín hiệu lớn, transistor làm việc trong miền không tuyến tính nên không thể dùng sơ đồ tương đương tín hiệu nhỏ nghiên cứu mà phải dùng đồ thị.

3.1.2. Phân loại

Tầng khuếch đại công suất có thể làm việc ở các chế độ A, B, AB và C, D tùy thuộc vào các chế độ công tác của transistor.

Chế độ A: Là chế độ khi khuếch đại cả tín hiệu hình sin vào. Chế độ này có hiệu suất thấp (với tải điện trở dưới 25%) nhưng méo phi tuyến nhỏ nhất, nên được dùng trong trường hợp đặc biệt



Hình 4.1

Chế độ B: là chế độ khuếch đại nửa hình sin vào, đây là chế độ có hiệu suất lớn ($= 78\%$), tuy méo xuyên tâm lớn nhưng có thể khắc phục bằng cách kết hợp với chế độ AB và dùng hồi tiếp âm (hình 4.1b)

Chế độ AB: Có tính chất chuyển tiếp giữa A và B. Nó có dòng tĩnh nhỏ để tham gia vào việc giảm méo lúc tín hiệu vào có biên độ nhỏ.

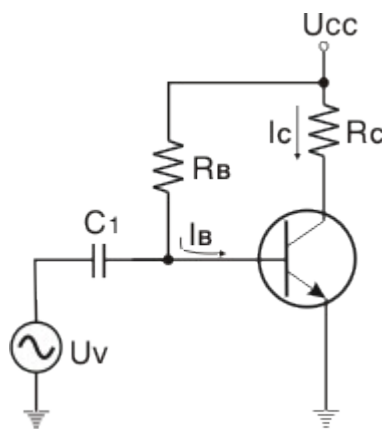
Chế độ C: Khuếch đại tín hiệu ra bé hơn nửa hình sin, có hiệu suất khá cao (> 78%) nhưng méo rất lớn. Nó được dùng trong các mạch khuếch đại cao tần có tải là khung cộng hưởng để chọn lọc sóng đài mong muốn và để có hiệu suất cao.

Chế độ Điện: Transistor làm việc như một khoá điện tử đóng mở. Dưới tác dụng của tín hiệu vào điều khiển transistor thông báo hoà là khoá đóng, Dòng IC đạt cực đại, còn khoá mở khi transistor tắt, dòng IC = 0.

3.2. KHUẾCH ĐẠI CÔNG SUẤT CHẾ ĐỘ A

3.2.1. Khuếch đại chế độ A dùng tải điện trở

Trong tầng khuếch đại chế độ A, điểm làm việc thay đổi đối xứng xung quanh điểm làm việc tĩnh. Xét tầng khuếch đại đơn mắc EC và mạch này có hệ số khuếch đại lớn và méo nhỏ. Ta chỉ xét mạch ở dạng nguồn cấp nối tiếp. Mạch điện được cho ở hình 4.2



Hình 4.2: Sơ đồ khuếch đại chế độ A dùng tải điện trở

Chế độ tĩnh

Dòng phân cực 1 chiều được tính theo U_{CC} và R_B :

$$I_B = \frac{U_{CC} - 0.7V}{R_B}$$

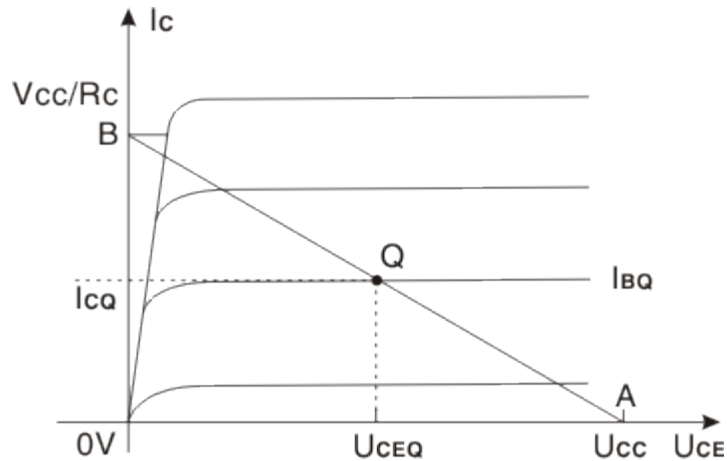
Tương ứng với dòng collector sẽ là :

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

Điện áp trên collector – emitter :

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C \cdot R_C$$

Từ giá trị U_{CC} ta vẽ được đường tải một chiều AB, từ đó sẽ xác định được điểm làm việc Q tương ứng với I_{BQ} trên đặc tuyến ra. Hạ đường chiếu từ điểm Q đến hai trục toạ độ sẽ có I_{CQ} và U_{CEQ} như hình 4.3.



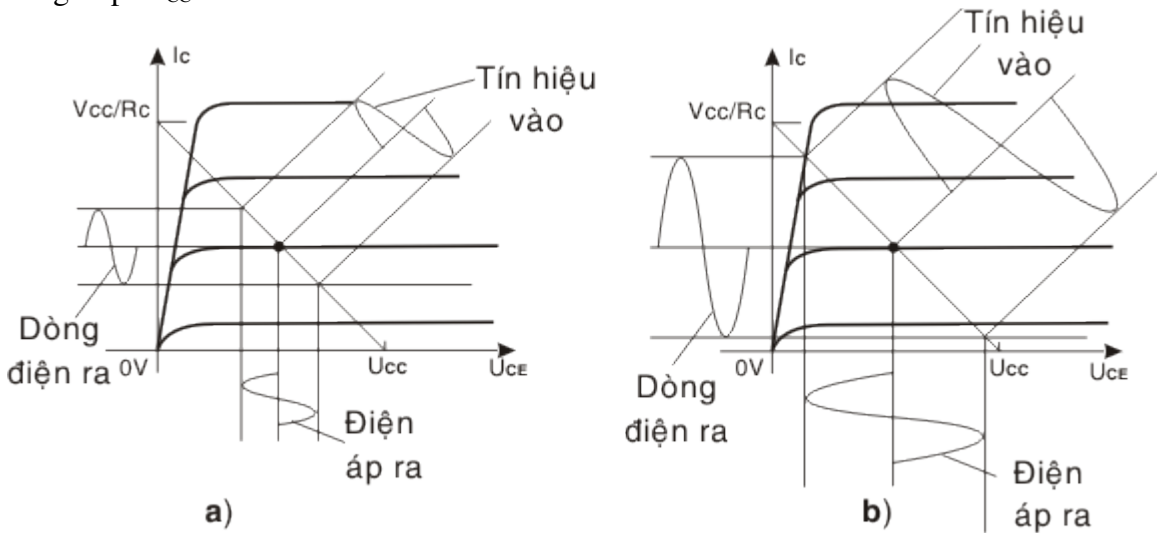
Hình 4.3

Chế độ động (khi có tín hiệu)

Khi có một tín hiệu AC được đưa tới đầu vào của bộ khuếch đại, dòng điện và điện áp ra sẽ thay đổi theo đường tải một chiều.

Một tín hiệu đầu vào nhỏ (hình 4.4a) sẽ gây ra dòng điện cực gốc thay đổi ở bên trên và bên dưới của điểm làm việc tĩnh, dòng collector và điện áp collect – emitter cũng thay đổi xung quanh điểm làm việc tĩnh này.

Khi tín hiệu đầu vào lớn hơn (hình 4.4) đầu ra sẽ biến thiên xa hơn so với điểm làm việc tĩnh đã được thiết lập từ thời điểm trước, cho tới khi cả dòng điện và điện áp đều đạt tới một giá trị giới hạn. Đối với dòng điện, giá trị giới hạn này có thể là 0 ở điểm kết thúc thấp hoặc U_{cc}/R_c ở điểm kết thúc cao của chu kỳ hoạt động của nó. Đối với điện áp Collector – emitter, giới hạn cũng có thể là 0V hay bằng giá trị nguồn cung cấp. U_{cc} .



Hình 4.4: Quan hệ giữa tín hiệu vào và tín hiệu ra

Công suất cung cấp từ nguồn một chiều

$$P_V(dc) = U_{cc} \cdot I_{CQ}$$

Công suất ra:

Tính theo giá trị hiệu dụng

$$P_r(ac) = U_{CE(ms)} \cdot I_C(ms)$$

$$Pr(ac) = I_{C(ms)}^2 \cdot R_C$$

$$Pr(ac) = \frac{U_{C ms}^2}{R_C}$$

Tính theo giá trị đỉnh

$$P_r ac = \frac{U_{CE P} \cdot I_{C P}}{2} = \frac{I_{C P}^2}{2} R_C$$

$$P_r = \frac{U_{CE P}^2}{2R_C}$$

Tính theo giá trị đỉnh – đỉnh

$$P_r ac = \frac{U_{CE P P} \cdot I_{C(P P)}}{8}$$

$$P_r(ac) = \frac{I_{C(P P)}^2}{8} R_C$$

$$P_{r(ac)} = \frac{U_{CE(P P)}^2}{8R_C}$$

Hiệu suất mạch : hiệu suất của một mạch khuếch đại phụ thuộc vào tổng công suất xoay chiều trên tải và tổng công suất cung cấp từ nguồn một chiều .hiệu suất được xác định theo công thức sau :

$$\frac{P_{r ac}}{P_{v dc}} \cdot 100\%$$

Hiệu suất cực đại :

Với mạch khuếch đại công suất chế độ A, hiệu suất cực đại có thể được xác định thông qua giá trị dòng điện cực đại và điện áp cực đại

$$U_{CEmat(P p)} = U_{CC}$$

$$I_{CE(P P)} = \frac{U_{CC}}{R_C}$$

$$P_{rmat(ac)} = \frac{U_{CC} \cdot U_{CC}}{8 R_C}$$

Công suất một chiều (dc) từ nguồn điện áp cung cấp cực đại được tính ứng với giá trị dòng thiên áp bằng một nửa giá trị cực đại :

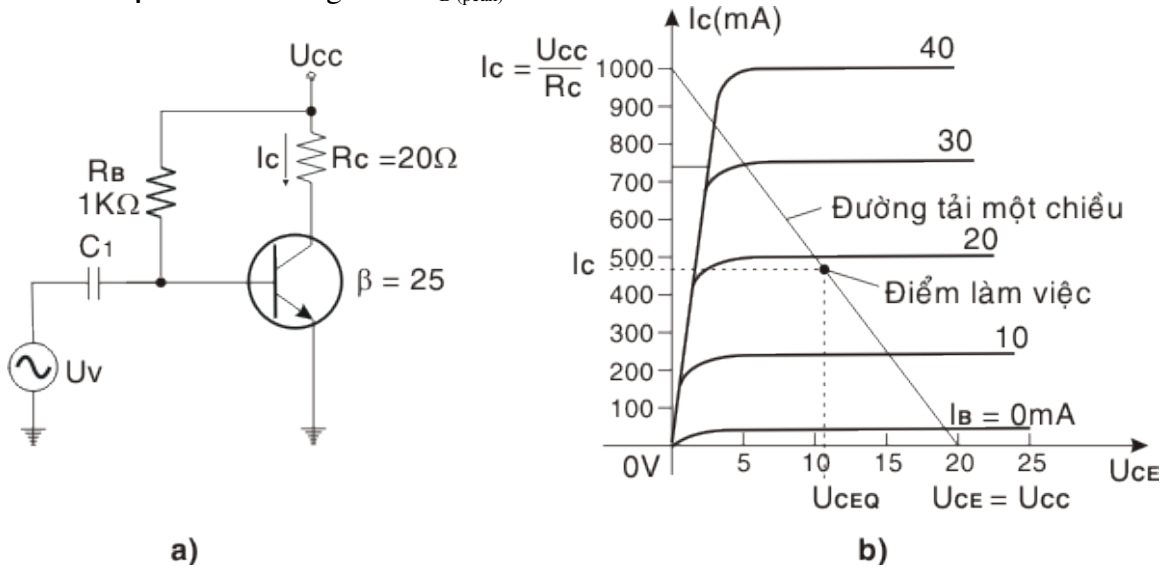
$$P_{V \max(dc)} = U_{CC} \cdot I_{Cmat} = U_{CC} \cdot \frac{U_{CC}}{2 R_C} = \frac{U_{CC}^2}{2 \cdot R_C}$$

Ta tính được hiệu suất cực đại :

$$\max \frac{P_{r\text{mat}(ac)}}{P_{V\text{mat}(dc)}} \cdot 100\% = \frac{\frac{U_{CC}^2}{8R_C}}{\frac{U_{CC}^2}{2R_C}} \cdot 100\% = 25\%$$

Hiệu suất cực đại của mạch khuếch đại chế độ A dùng tải điện trở như ta thấy là 25%. Hiệu suất này chỉ đạt được trong trường hợp đặc biệt, còn hầu hết các mạch khuếch đại chế độ A dùng tải điện trở đều có hiệu suất nhỏ hơn giá trị 25%

Ví dụ 1: Tính công suất vào, công suất ra, hiệu suất và công suất tổn hao transistor khi cho tín hiệu vào với dòng Base $I_{B(\text{peak})} = 10\text{mA}$



Hình 4.5: Sơ đồ cho ví dụ 1

Giải:

Tính các giá trị để xác định điểm Q

$$I_B = \frac{U_{CC} - 0.7(V)}{R_B} = \frac{20 - 0.7}{1(k)} = 19.3\text{mA}$$

$$I_{CQ} = \beta \cdot I_B = 25 \cdot 19.3 = 482.5\text{mA}$$

$$U_{CEQ} = U_{CC} - I_C \cdot R_C = 20 - 482.5 \cdot 20 = 10.35(V)$$

Mạch điện không có R_E , nên $U_{CE} = U_{CC} = 20(V)$ và

$$I_C = \frac{U_{CC}}{R_C} = \frac{20V}{20} = 1A = 1000mA$$

Ta vẽ được đường tải một chiều RDC (2 điểm $U_{CE} = 20V$; $I_C = 1000mA$). Với I_{CQ} và U_{CEQ} ta xác định được điểm làm việc trên đường tải.

Khi tín hiệu vào với dòng base $I_{B(P)} = 10\text{mA}$ thì biên độ dòng collector trên đặc tuyến sẽ là:

$$I_{C(P)} = \beta \cdot I_{B(P)} = 25 \cdot 10 = 250\text{mA} \text{ (giá trị đỉnh)}$$

$$P_{r(ac)} = \frac{I_{C(P)}^2 \cdot R_C}{2} = \frac{250 \cdot 10^{-3} A^2 \cdot 20}{2} = 0.625W$$

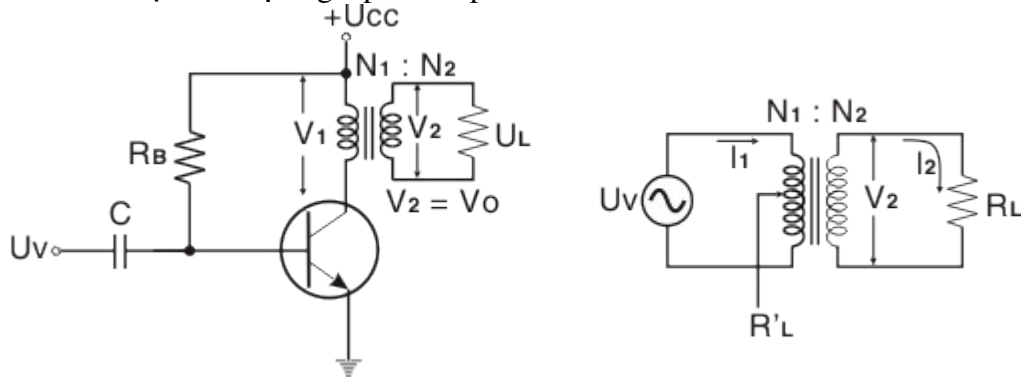
$$P_{V(DC)} = U_{CC} \cdot I_C = 20 \cdot 482.5 \cdot 10^{-3} = 9.65W$$

$$(\%) = \frac{P_{r(ac)}}{P_{V(DC)}} \cdot 100\% = \frac{0.625}{9.65} \cdot 100\% = 6.48\%$$

$$P_Q = P_V - P_r = 9.65 - 0.625 = 9.025W$$

Quá ví dụ ta thấy rõ mạch khuếch đại RC dùng chế độ A có hiệu suất thấp ,chỉ đạt 6.5% so với hiệu suất cực đại là 25%.

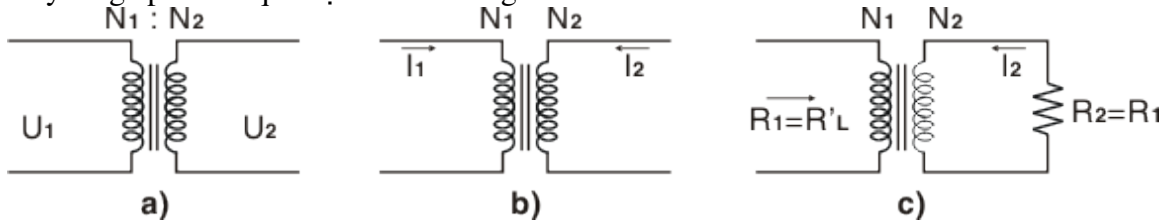
3.2.2. Khuếch đại chế độ A ghép biến áp



Hình 4.6: Mạch khuếch đại công suất âm tần ghép biến áp

Đây là một dạng khuếch đại chế độ A với hiệu suất tối đa là 50% ,sử dụng một máy biến áp để lấy tín hiệu đầu ra đến tải như hình 3.6.

Hoạt động của máy biến áp :một máy biến áp có thể tăng hay giảm giá trị điện áp và dòng điện theo tỷ lệ đã được định trước. Giả sử máy biến áp được nghiên cứu là loại máy tăng áp và bỏ qua sự tổn hao công suất.



Hình 4.7: Hoạt động của biến áp

a) Biến đổi điện áp; b) Biến đổi dòng điện; c) Trở kháng

3.2.2.1 Biến đổi điện áp

Như ta thấy hình 3.7a, máy biến áp có thể làm tăng hay giảm điện áp phụ thuộc vào những số vòng dây ở mỗi bên >

Sự biến đổi áp theo công thức $U_1/U_2 = N_1/N_2$

Điều này chỉ rõ rằng nếu số vòng dây cuộn thứ cấp lớn hơn cuộn sơ cấp thì điện áp ra thứ cấp sẽ lớn hơn điện áp vào sơ cấp .

3.2.2.2. Sự biến đổi của dòng điện

Dòng điện biến đổi sẽ tỷ lệ nghịch với số vòng dây ở hay cuộn . Tức là :

$$I_2/I_1 = N_1/N_2$$

Mối quan hệ này được thể hiện ở hình 3.7b . Nếu số vòng dây ở cuộn thứ cấp lớn hơn cuộn sơ cấp thì dòng điện chạy ở cuộn thứ cấp sẽ nhỏ hơn dòng điện ở cuộn sơ cấp .

3.2.2.3. Tải của biến áp có biến đổi trở kháng

Khi biến áp thay đổi điện áp và dòng điện thì trở kháng ở cả hai cuộn dây cũng có thể bị thay đổi , như ta thấy ở hình 3.7c.

Ta gọi R_L Là điện trở nhìn vào từ cuộn dây sơ cấp máy biến áp, trên đó đã tính đến ảnh hưởng của tải ghép từ cuộn dây thứ cấp thông qua hệ số biến áp :

$$A^2 = (N_1/N_2)^2$$

Điện trở tải ở cuộn dây thứ cấp phản ánh qua điện trở sơ cấp được tính như sau :

$$R_L/R_L = R_1/R_2 = (N_1/N_2)^2 = a^2$$

Trong đó tỷ số : $U_1/U_2 = N_2/N_1$ và $I_2/I_1 = N_1/N_2$

Hệ số phản ánh từ tải qua sơ cấp biến áp biểu thị tỷ số giữa tải phản ánh RL và tải RL qua tỷ số biến áp :

$$R_L/R_L = \frac{N_1^2}{N_2^2} a^2$$

Ví dụ 2 :

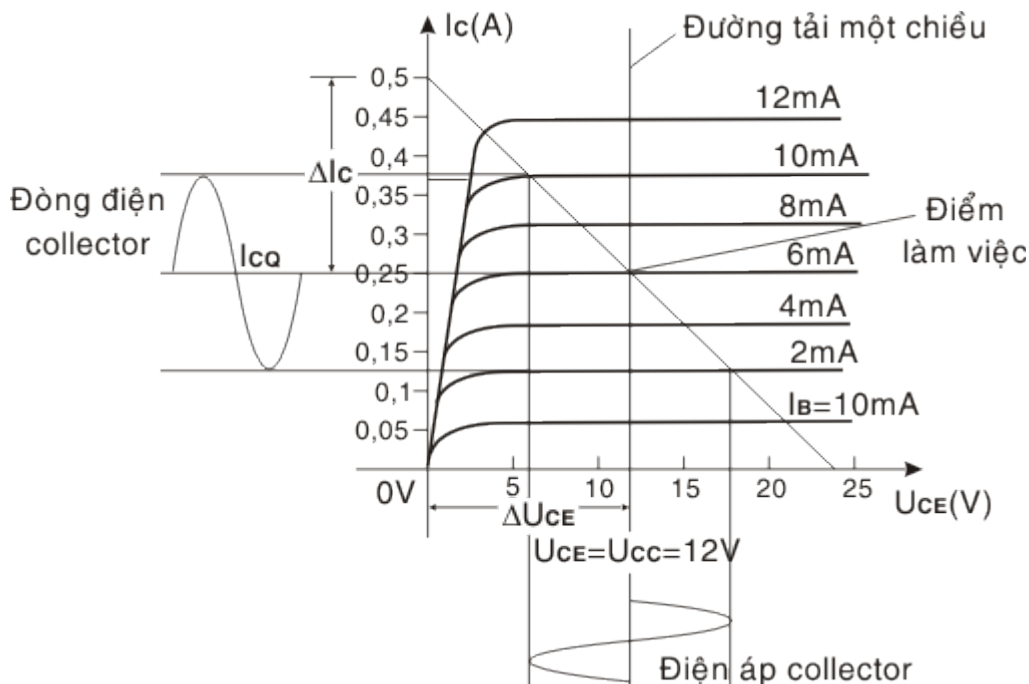
+ tính tổng RL biết $R_L = 8 \Omega$ và tỷ số vòng của biến áp $a = 15/1$

$$R_L = \frac{N_1^2}{N_2^2} \cdot R = 15^2 \cdot 8 = 1.8k \Omega$$

Tính số vòng của biến áp khi cho $R_L = 16 \Omega$, $R_L = 10 \Omega$

$$\frac{N_1}{N_2} = \sqrt{\frac{R_L}{R_L}} = \sqrt{\frac{10000}{16}} = 625, \text{ suy ra : } \frac{N_1}{N_2} = \sqrt{625} = 25/1$$

3.2.2.4. Xác định đường tải một chiều, điểm làm việc tĩnh và tải xoay chiều



Hình 4.8: Đường tải của mạch khuếch đại công suất chế độ A ghép biến áp

Vì điện trở một chiều của cuộn dây biến áp rất nhỏ lý tưởng coi như bằng 0. Như vậy đường đặc tuyến tải một chiều R_{DC} lúc này sẽ thẳng đứng song song với trục tung (I_C). Điện áp tại điểm làm việc tĩnh : $U_{CEQ} = U_{CC}$. Nếu cho biết dòng định thiên I_B thì chỉ việc kẻ một đoạn thẳng song song với trục tung I_C , cắt đặc tuyến với dòng I_B sẽ tìm được điểm làm việc Q. Cần lưu ý rằng không được tự ý chọn dòng I_B mà phải căn cứ vào đặc tuyến để xác định sao cho có độ méo là thấp nhất. Điều này có quan

hệ với biên độ điện áp và dòng tín hiệu ở ngõ ra, có nghĩa là biên độ của chúng không vượt quá đoạn cong đặc tuyến và đường cong giới hạn tổn hao cho phép của transistor.

Điểm làm việc được chọn trên giao điểm của đường tải RDC và dòng IC ứng với tham số $I_B = 6\text{mA}$. Để đảm bảo cho tín hiệu làm việc ở phần đặc tuyến thẳng thì dòng điện và có biên độ 4mA (Peak). Từ đó sẽ xác định được biên độ của điện áp và dòng ra trên tải biến áp.

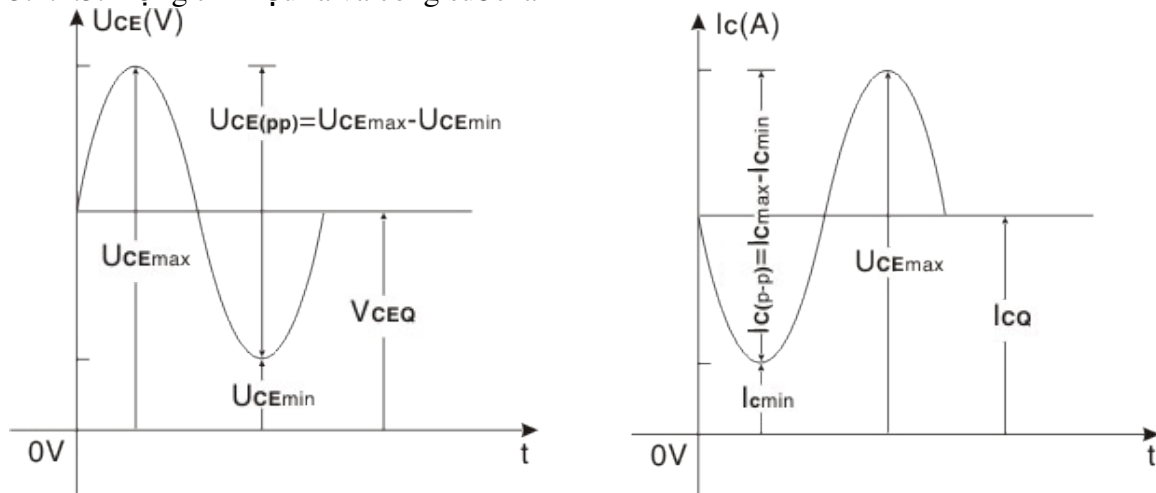
Xác định đường tải xoay chiều RAC bằng cách kẻ đoạn thẳng có độ nghiêng $(-1/R_L)$ lệch về trục IC đi qua điểm làm việc Q.

Nếu tín hiệu Bắt đầu từ điểm làm việc ở mức 0V, thì dòng collector từ điểm Q, ICQ sẽ biến đổi một lượng:

$$I_C = U_{CE}/R'_L$$

Từ giá trị I_C trên trục IC, kéo đường thẳng đến điểm Q tới trục U_{CE} sẽ có đặc tuyến tải R_{AC} .

3.2.2.5. Dạng tín hiệu ra và công suất ra



Hình 4.9: Dạng tín hiệu ra và công suất ra

Từ hình vẽ ta xác định được các giá trị sau:

Công suất xoay chiều gởi tới biến áp:

$$P_{rac} = \frac{U_{CE\max} U_{CE\min} I_{C\max} I_{C\min}}{8}$$

Phần công suất này được gởi tới cuộn sơ cấp của biến áp, nếu biến áp là lý tưởng thì công suất trên tải gần bằng giá trị này.

Công suất ra cũng có thể được tính theo điện áp rơi trên tải.

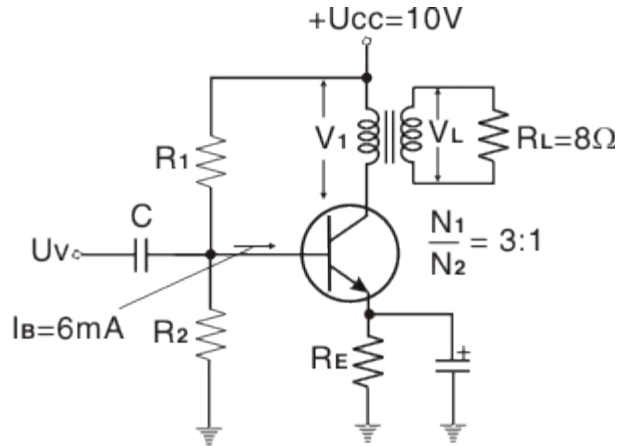
Ví dụ 3

Cho mạch điện (hình 3.1)

Xác định các thông số giá trị hiệu dụng của dòng điện, điện áp, công suất trên tải.

Cho biết: Tỷ số điện áp 3/1, dòng tĩnh $I_B = 6\text{mA}$, biên độ tín hiệu vào $I_{B(P)} = 4\text{mA}$.

Giải



Hình 4.10: Sơ đồ cho ví dụ 3

Đặc tuyến tải RR(DC) bắt đầu từ điểm .

Từ đặc tuyến tương ứng với $I_B = 6\text{mA}$, tìm được

$$U_{CEQ} = 10\text{V}$$

$$I_{CQ} = 14\text{mA}$$

Điện trở phản ánh từ tải qua sơ cấp R_L :

$$R_L = (N_1/N_2)^2 \cdot R_L = 3^2 \cdot 8 = 72$$

Xác định đường tải xoay chiều như sau :

$$I_C = U_E/R_L = 10/72 = 139\text{mA}$$

Giá trị dòng tại điểm A trên đặc tuyến I_C (trên hình 3.11b)

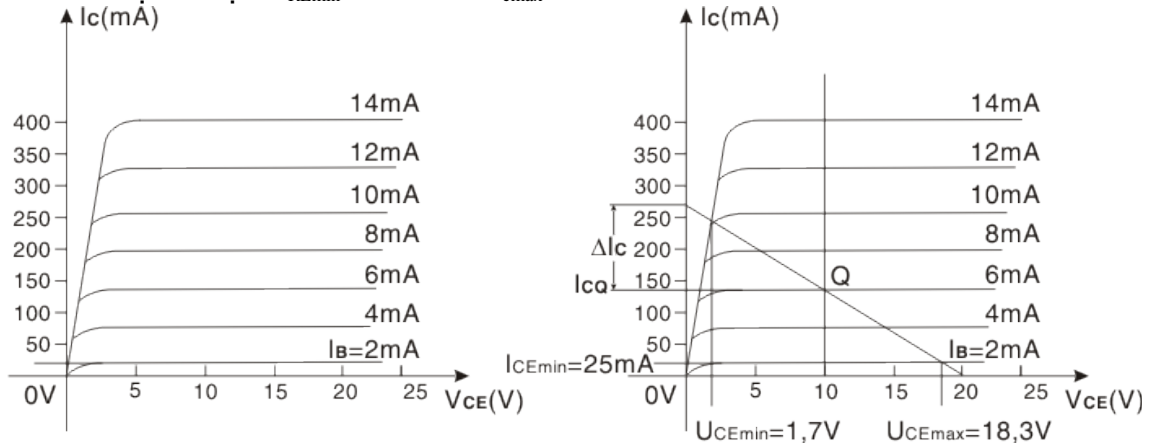
$$I_{CEQ} + I_C = 140 + 139 = 279\text{mA}$$

Nối A và Q sẽ được đặc tuyến tải R_{AC}

Xác định giá trị cực đại và cực tiểu của dòng và của áp trên collector BJT :

Đường đặc tuyến tải R_{AC} cắt đặc tuyến ra tại đường có $I_B = 2$ và đường có $I_B = 10$.

Tại đường có $B = 2$ xác định được $I_{Cmin} = 25\text{mA}$ và $U_{CEmax} = 18.3\text{V}$. Tại đường có $I_B = 1.7\text{V}$ Xác định được $U_{REmin} = 1.7\text{V}$ và $I_{Cmax} = 255\text{A}$.



Hình 4.11

$$U_{CE(min)} = 1.7\text{V}; I_{Cmin} = 25\text{mA}$$

$$U_{E(max)} = 18.3\text{V}; I_{Cmax} = 255\text{A}$$

Công suất ra trên cuộn sơ cấp biến áp :

$$P_{rac} = \frac{U_{CEmax} \cdot U_{CEmin} \cdot I_{Cmax} \cdot I_{Cmin}}{8} = \frac{18.3 \cdot 1.7 \cdot 255 \cdot 25}{8} = 0.477W$$

Giá trị điện áp hiệu dụng trên cuộn sơ cấp:

$$U_{rms} = U_{(P-P)} / 2 = (U_{CEmax} - U_{CEmin}) / 2\sqrt{2} = 16.6 / 2.828 = 5.87V$$

Giá trị điện áp hiệu dụng trên tải :

$$U_{(rms)} = (N_2/N_1) \cdot U_{(rms)} = 1/3 \cdot 5.87 = 1.96V$$

Công suất ra trên tải tính theo áp U_L

$$P_{L(AC)} = U_L^2 / R_L = 1.96^2 / 8 = 0.48W$$

Giá trị hiệu dụng của dòng tải

$$I_L(rms) = \frac{N_1}{N_2} \cdot I_{C rms} = \frac{N_1}{N_2} \cdot \frac{I_{Cmax} - I_{Cmin}}{\sqrt{2}}$$

$$= 3.230mA / 2.828 = 244mA$$

Công thức ra tính theo dòng I_L

$$P_{L(AC)} = I_L^2 \cdot R_L = (244 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 8 = 0.476W$$

3.2.2.6. Tính công suất 1 chiều và hiệu suất

Công suất của nguồn DC

$$P_{V(DC)} = U_{CC} \cdot I_{CQ}$$

Công suất tiêu tán trên transistor ở chế độ tĩnh

$$P_Q = P_{V(DC)} - P_{r(AC)}$$

Với các thông số ở ví dụ 3, ta tính được:

$$P_{V(DC)} = U_{CC} \cdot I_{CQ} = 10 \cdot (140 \cdot 10^{-3}) = 1.4W$$

$$P_Q = P_{V(DC)} - P_{r(AC)} = 1.4 - 0.48 = 0.92W$$

$$= (P_{r(AC)} / P_{V(DC)}) \cdot 100\% = (0.48 / 1.4) \cdot 100\% = 34.3\%$$

Như vậy mạch khuếch đại công suất ở chế độ A ghép biến áp đã đạt trên 25% . Hiệu suất cực đại của nó có thể đạt được tới 50%

Ta có thể tính hiệu suất cực đại theo U_{CC} và U_{CE} bằng công thức kinh nghiệm cho mạch ghép RC và biến áp :

Đối với mạch ghép RC:

$$= 25 \frac{U_{CEmax} - U_{CEmin}}{U_{CC}} \cdot \frac{U_{CEmax} + U_{CEmin}}{2} \cdot 100\%$$

Đối với mạch ghép biến áp :

$$= 50 \frac{U_{CEmax} - U_{CEmin}}{U_{CC}} \cdot \frac{U_{CEmax} + U_{CEmin}}{2} \cdot 100\%$$

Ví dụ 4

Tính hiệu suất của mạch khuếch đại công suất ghép biến áp với $U_{CC} = 12V$ trong các trường hợp :

A) $U_{peak} = 12V$ biến đổi xung quanh định thiên của điểm Q với $U_{CEQ} = 12V$

b) $U_{peak} = 6V$, $U_{CEQ} = 12V$

c) $U_{peak} = 6V$, $U_{CEQ} = 18V$

Giải:

$$U_{CEmax} = U_{CEQ} + U_P = 12 + 12 = 24V$$

$$U_{CEmin} = U_{CEQ} - U_P = 12 - 12 = 0V$$

$$= 25 \frac{U_{CEmax} - U_{CEmin}}{U_{CC}} \cdot \frac{U_{CEmax} + U_{CEmin}}{2} \cdot 100\%$$

$$= 25[(24 - 0)^2/24.(24 + 0)].\% = 25\%$$

$$U_{CEmax} = U_{CEQ} + U_P = 12 + 6 = 18V$$

$$U_{CEmin} = U_{CEQ} - U_P = 12 - 6 = 6V$$

$$= 25 \frac{U_{CEmax} - U_{CEmin}}{U_{CEmax} + U_{CEmin}} \cdot 100\%$$

$$= 25[(18 - 6)^2/18.(18 + 6)].\% = 6.25\%$$

$$U_{CEmax} = U_{CEQ} + U_P = 18 + 6 = 24V$$

$$U_{CEmin} = U_{CEQ} - U_P = 18 - 6 = 12V$$

$$= 25 \frac{U_{CEmax} - U_{CEmin}}{U_{CEmax} + U_{CEmin}} \cdot 100\%$$

$$= 25[(24 - 12)^2/24.(24 + 12)].\% = 4.17\%$$

Qua ví dụ trên ta thấy mối tương quan giữa biên độ ra U_{peak} với điện áp nguồn U_{CC} .

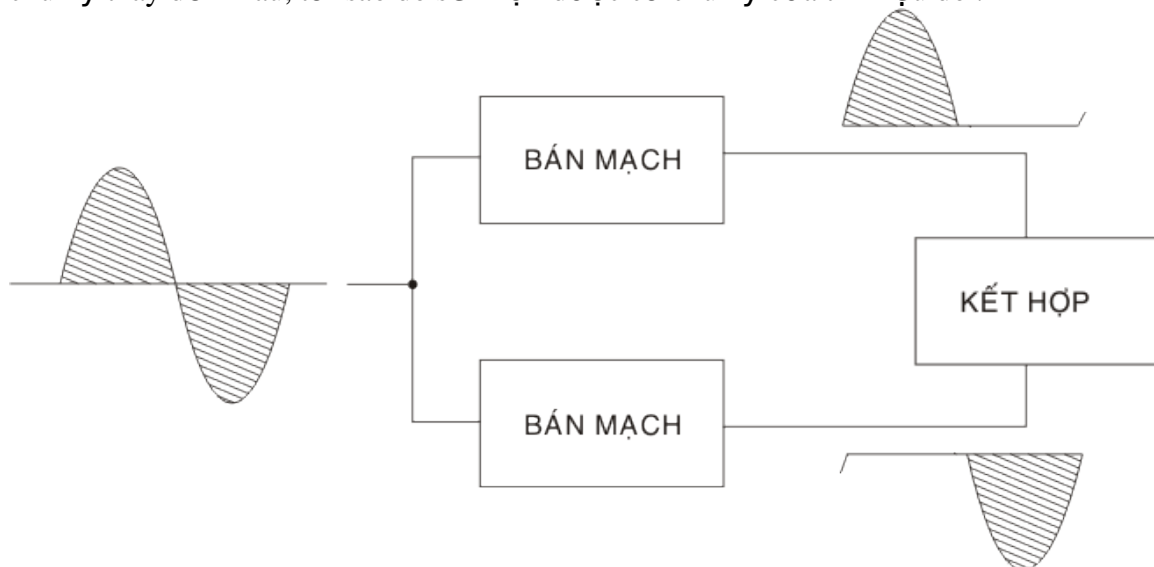
Khi $U_{peak} = U_{CC}$ thì hiệu suất đạt mức lớn nhất ($= 50\%$). Nếu $U_{peak} = 1/6 \cdot U_{CC} = 2V$ thì hiệu suất giảm rất nhanh đến giá trị nhỏ nhất ($= 1,39\%$).

Độ méo sóng hài của mạch khuếch đại chế độ A tương đối nhỏ. Trong trường hợp ghép biến áp, do có dòng một chiều chạy trong cuộn dây khá lớn làm tăng dòng từ hoá của lõi sắt biến áp dẫn đến trạng thái bão hoà. Điều này sẽ gây méo dạng tín hiệu ra. Để giảm méo do bão hoà từ, người ta tăng từ trở của lõi sắt bằng vật liệu các từ đặc ở khe hở giữa các lá sắt.

Như vậy, khuếch đại chế độ A chỉ dùng cho tín hiệu nhỏ như tầng khuếch đại mìn, tiền khuếch đại và đảo pha ...

3.3. KHUẾCH ĐẠI CÔNG SUẤT CHẾ ĐỘ

Ở chế độ B, transistor sẽ điều khiển dòng điện ở mỗi nửa của chu kỳ của tín hiệu. Để thu được cả chu kỳ tín hiệu đầu ra, thì cần sử dụng 2 transistor, mỗi transistor được sử dụng ở mỗi nửa chu kỳ khác nhau của tín hiệu, sự vận hành kết hợp sẽ cho ra chu kỳ đầy đủ của tín hiệu. Khi một bộ phận của mạch đẩy tín hiệu lên cao trong suốt nửa chu kỳ còn lại của mạch điện khi đó gọi là mạch đẩy kéo. Một tín hiệu đầu vào AC được đưa vào trong mạch điện đẩy kéo với sự hoạt động ở mỗi phần trên mỗi nửa chu kỳ thay đổi nhau, tải sao đó sẽ nhận được cả chu kỳ của tín hiệu đó.



Hình 4.12

Trasistor công suất được sử dụng trong mạch đẩy kéo có khả năng cung cấp công suất mong muốn cho tải, và sự vận hành chế độ B của những transistor này sẽ có hiệu suất lớn hơn so với việc sử dụng 1 transistor đơn trong chế độ A.

3.3.1. Công suất và hiệu suất

Công suất vào DC (công suất nguồn cung cấp)

$$P_{DC} = U_{CC} \cdot I_{DC}$$

$I_{DC} = I_{AV}$ là dòng trung bình chạy qua nguồn cung cấp,

Biên độ hay dòng đỉnh $I_{C(P)} = \sqrt{2} \cdot I_C$, nên dòng trung bình chạy qua nguồn trong toàn chu kỳ sẽ là :

$$I_{avg} = 2I_{C(P)}/\pi$$

Vì dòng trung bình $I_{avg} = i_{C1} + i_{C2}$ nên ta có :

$$I_{avg} = 2\sqrt{2}U_C/\pi, \text{ nên}$$

$$P_{DC} = U_{CC}I_{DC} = \sqrt{2}U_C \cdot 2\sqrt{2}I_C/\pi = 4U_C I_C/\pi$$

Công suất trên tải RL của 1 transistor là :

$$P'_L = U_C I_C$$

$$\text{Nên } P_{DC} = \frac{4 \cdot P'_L}{\pi}$$

Công suất trên tải RL tính theo các giá trị sau :

$$P_{r(AC)} = U_{L(p-p)}^2/8R_L = U_{L(p)}^2/2R_L = U_{L(rms)}^2/R_L$$

$$\text{Hiệu suất} = P_r/P_v \cdot 100\% = 1/4 \cdot 100\% = 25\%$$

Ví dụ 1.5:

Xác định công suất cung cấp, công suất ra và hiệu suất ở chế độ B trong trường

Cho điện áp tín hiệu ra trên tải là $20_{L(p)}$ và $U_{CC} = 30V$.

Giải

Dòng đỉnh trên tải 16 :

$$I_p = U_{L(p)}/R_L = 20/16 = 1.25A$$

Dòng chạy qua nguồn U_{CC} :

$$I_{DC} = \frac{2}{\pi} I_p = 0.796A$$

Công suất của điện áp nguồn :

$$P_{V(DC)} = U_{CC}I_{DC} = (30V)(0.796A) = 23.9W$$

Công suất ra trên tải R_L :

$$P_{r(AC)} = U_{L(p)}^2/2R_L = (20V)^2/(2 \cdot 16) = 12.5W$$

Hiệu suất :

$$= P_{r(AC)}/P_{V(DC)} \cdot 100\% = 12.5W/23.9W \cdot 100\% = 52.3\%$$

Công suất tổn hao trên 2 transistor và 1 transistor:

$$P_{2T} = P_V - P_r$$

$$P_T = P_{2T}/2$$

3.3.2. Giá trị cực đại

Ở chế độ B, khi $U_{L(p)} = U_{CC}$ thì công suất ra đạt giá trị cực đại

$$P_{r(AC) \max} = U_{CC}^2/2R_L$$

Dòng trung bình qua nguồn cung cấp

$$I_{DC} = \frac{2}{\pi} \cdot I_P = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{U_{cc}}{R_L}$$

Công suất nguồn cung cấp cực đại

$$P_{V(DC)max} = U_{cc} I_{DC} = U_{cc} \left(\frac{2}{\pi} \cdot \frac{U_{cc}}{R_L} \right) = \frac{2U_{cc}^2}{\pi R_L}$$

Hiệu suất cực đại

$$= \frac{P_{r(AC)}}{P_{V(DC)}} \cdot 100\%$$

$$= \frac{(U_{cc}^2/R_L) / \frac{2}{\pi} \cdot \frac{U_{cc}^2}{R_L}}{\frac{2U_{cc}^2}{\pi R_L}} \cdot 100\%$$

$$= \frac{\pi}{4} \cdot 100\% = 78,54\%$$

Khi điện áp ra trên tải đạt $0,636U_{cc} = \frac{2}{\pi}U_{cc}$ thì tổn hao cực đại trên 2 transistor (nằm trong đường giới hạn tổn hao cho phép) sẽ là:

$$P_{2Qmax} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{U_{cc}^2}{R_L}$$

Tải của 2 transistor trên cuộn sơ cấp biến áp :

$$R_{CC} = (2a)^2 R_L = 4a^2 R_L = 4R'_L$$

Ví dụ 6:

Xác định công suất cực đại ở chế độ B khi cho $U_{CC} = 30V$, tải $R_L = 16$

Giải

$$P_{r(AC)max} = U_{cc}^2 / 2R_L = 28,125W$$

$$P_{Vmax(DC)} = 2U_{cc}^2 / \pi R_L = 35,81W$$

$$\eta_{max} = \frac{P_{Ra}}{P_V} \cdot 100\% = 78,54\%$$

$$P_{rmax} = P_{2Tmax} / 2 = 5,7W$$

Hiệu suất cực đại ở chế độ B còn có thể xác định theo giá trị đỉnh :

$$P_{r(AC)} = \frac{U_P^2}{2R_L}$$

$$P_V = U_{cc} I_{DC} = U_{cc} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \frac{U_P}{R_L}$$

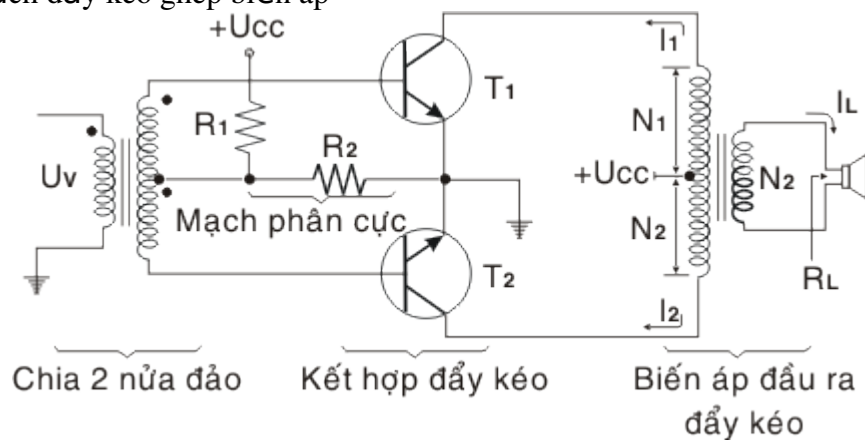
$$= \frac{P_{r(AC)}}{P_{V(DC)}} \cdot 100\% = 78,74\% \cdot \frac{U_P}{U_{cc}}$$

Qua kết quả ta thấy rằng ,hiệu suất tăng theo tỷ số giữa U_{p-p} / U_{cc} .

3.3.3. Các mạch khuếch đại chế độ B

Mạch điện khuếch đại chế độ B phải dùng ít nhất là 2 transistor có cùng cực tính hay khác cực tính (P hoặc N). Khi cần tăng công suất ra, ở mỗi tầng công suất cuối thường hai dùng 2 transistor ở mỗi vế, mắc kiểu Darlington. Nếu tổng công suất đúng 2 transistor cùng cực tính thì tầng kích phải là tầng đảo pha để cấp 2 tín hiệu ngược pha của cửa vào.

3.3.3.1 Mạch đẩy kéo ghép biến áp



Hình 4.13: Mạch đẩy kéo ghép biến áp

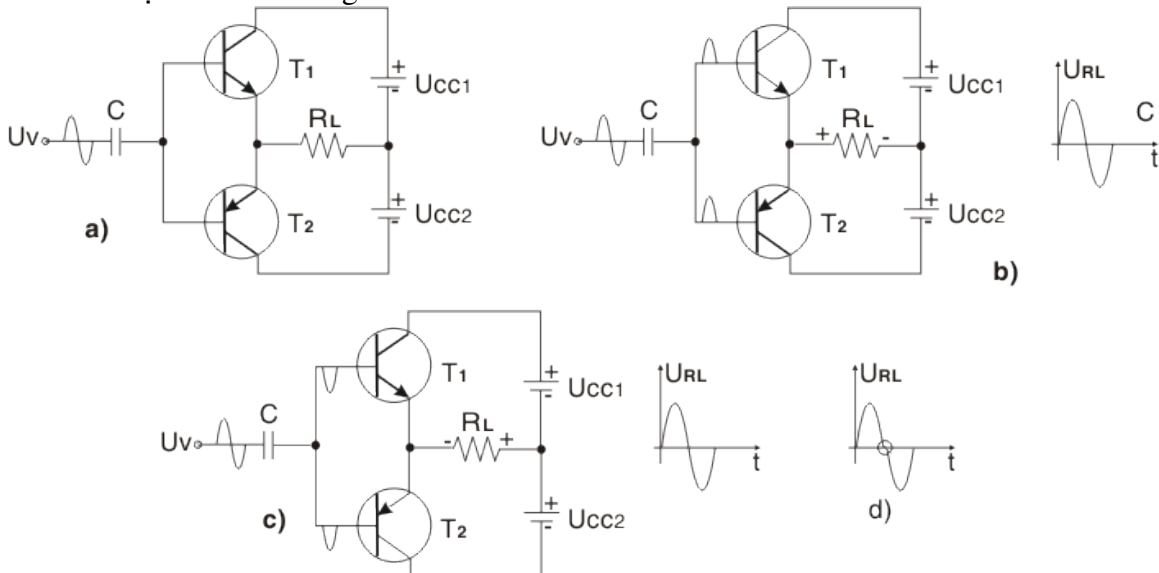
Ưu điểm của mạch này là chế độ tĩnh sẽ không tiêu thụ dòng do nguồn cung cấp nếu không có tổn hao trên transistor. Mặt khác, vì không có dòng một chiều chảy qua biến áp nên không gây méo do bão hòa từ. Hiệu suất của mạch đạt lớn nhất, khoảng 78,5%.

Nhược điểm của nó là méo xuyên tâm khi tín hiệu vào nhỏ, khi cả hai vectơ khuếch đại không được cân bằng.

Như mạch hình 3.13 đã chỉ rõ, ở nửa chu kỳ dương của tín hiệu đầu vào, T1 phân cực nghịch nên không dẫn, T2 phân cực thuận nên dẫn. Ở nửa chu kỳ âm thì quá trình xảy ra ngược lại. Lúc chưa có tín hiệu ($U_s = 0$) thì T1, T2 đều tắt, sẽ không có dòng nguồn U_{CC} chạy qua biến áp mà chỉ có dòng ngược I_{CE} rất nhỏ chảy qua.

Tại thời điểm chuyển tiếp giữa quá trình dẫn, ngắt của T1 và T2 sẽ gây nên hiện tượng méo dạng sóng, gọi là méo dạng xuyên tâm.

3.3.3.2. Mạch bù đối xứng



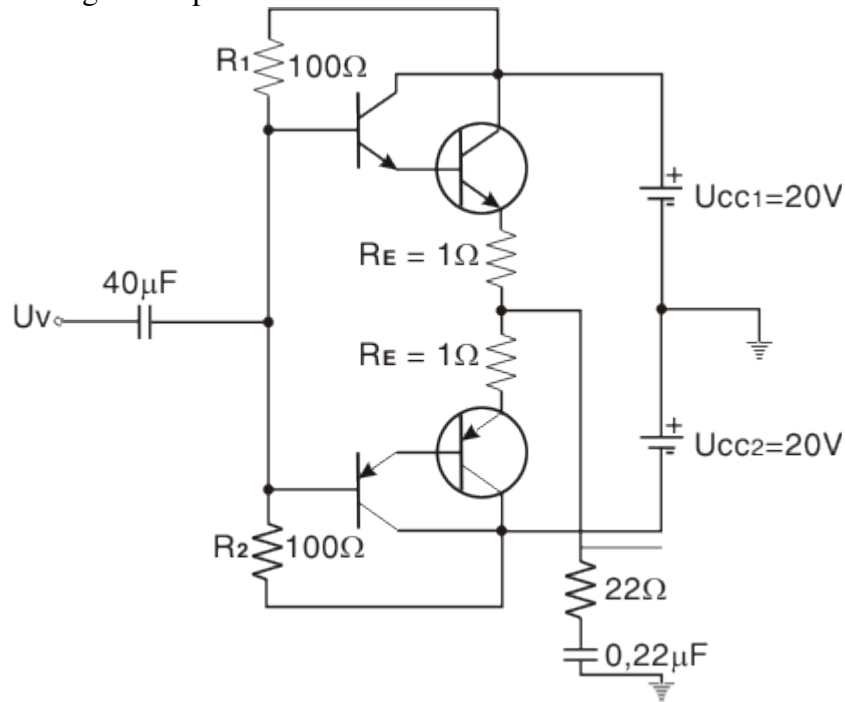
Hình 4.14

Dùng các transistor (khác cực tính) mắc như hình 4.14a, 2 transistor sẽ làm việc thay phiên trong hai nửa chu kỳ cung cấp dòng ra trên tải. Hai nửa tín hiệu ra sẽ được tổng hợp thành tín hiệu hoàn chỉnh trên tải. Ở hình 4.14b là transistor npn làm việc, PNP tắt, còn hình 4.14c mô tả bán kỳ âm của tín hiệu vào, khi này npn tắt, còn pnp mở.

Một sự bất lợi của mạch này là cần phải có hai nguồn cung cấp riêng biệt. Và hạn chế

Nửa của mạch bù là meo xuyên tâm (hình 4.14d). Đây là sự gãy khúc của tín hiệu ra trên tải ở thời điểm chuyển tiếp từ nửa chu kỳ dương sang âm. Để giảm méo xuyên tâm cho chế độ B úc tín hiệu đầu vào còn yếu, người ta sẽ dùng chế độ AB để làm tăng kích thích cho tăng công suất cuối chế độ B.

Một dạng mạch đẩy kéo dùng các transistor bù được trình bày ở hình 4.15. Mạch này ở mỗi về là một cặp transistor cùng tính đồng thời khác tính với cặp transistor cùng tính bên kia, gọi là mạch Darlington bù đối xứng. Ở mạch này thì dòng điện đầu ra sẽ cao hơn, còn trở kháng thì thấp hơn.

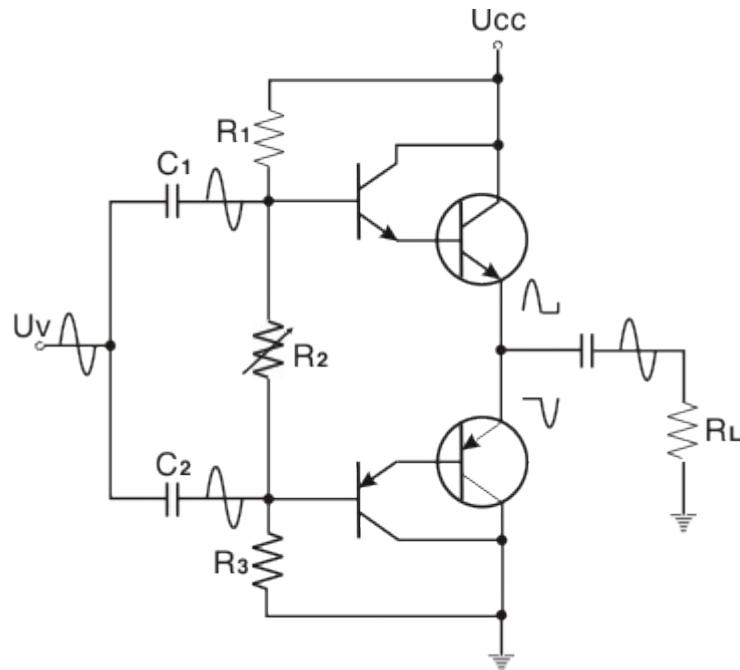


Hình 4.15

Mạch giả bù cải tiến từ mạch bù đối xứng để đơn giản bớt công nghệ chế tạo vi mạch. Mạch này dùng hai cặp transistor ở một về thì cùng tính, còn về kia thì khác tính.

Nghuyên tắc làm việc của hai mạch Darlington bù và giả bù giống nhau, chỉ khác ở điện áp phân cực để tạo dòng tuyến tính ban đầu.

C) Mạch đẩy kéo giả bù



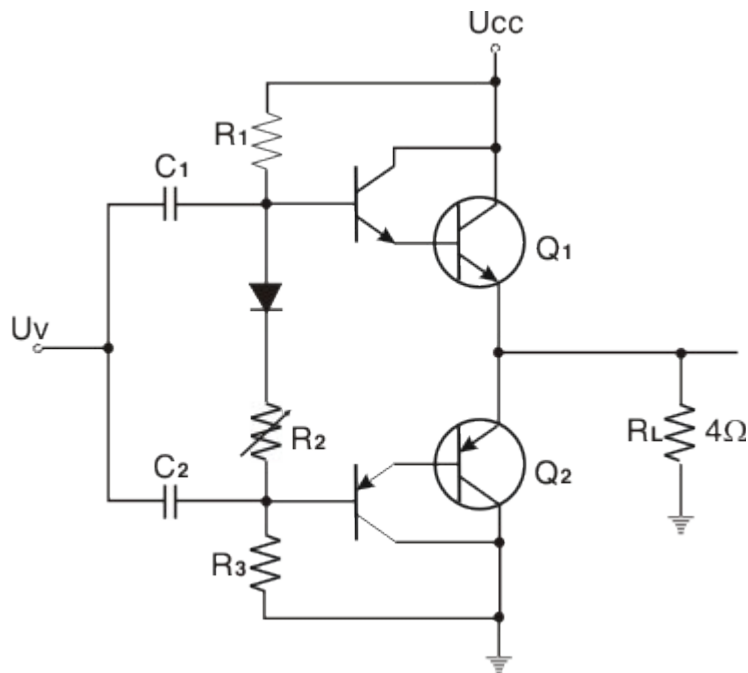
Hình 4.16: Mạch đẩy kéo giả bù

Ví dụ 7:

Từ mạch phân cực dòng tĩnh bằng diode, xác định :

- ông suất tiêu tán trên mỗi transistor khi cấp điện áp hiệu dụng ở đầu vào là $12V_{rms}$
- Nếu tín hiệu vào tăng đến giá trị cực đại mà tín hiệu ra chưa méo dạng, hãy tính giá trị cực đại của công suất vào và ra và công suất tiêu tán trên mỗi transistor.
- Xác định công suất tiêu tán cực đại cho phép của mỗi transistor.

Giải:



Hình 4.17

- Giá trị đỉnh của điện áp vào

$$U_{V(P)} = \sqrt{2} \cdot U_{V(rms)} = \sqrt{2} \cdot (12) = 16,97 \approx 17V$$

Xem biên độ của tín hiệu ra trên tải ra RL trong trường hợp lý tưởng gần bằng điện áp vào (độ lợi điện áp = 1) thì $U_{L(P)} = 17$

Công suất ra trên tải:

$$P_{r(AC)} = U_{L(P)}^2 / 2 \cdot R_L = 17^2 / 2 \cdot 4 = 36,125W$$

$$I_{L(P)} = U_{L(P)} / R_L = 17/4 = 4,25A$$

Dòng DC chạy qua nguồn lưỡng cực:

$$I_{DC} = 2 \cdot I_{L(P)} = 2 \cdot 4,25 = 8,5A$$

Công suất nguồn :

$$P_{V(DC)} = U_{CC} \cdot I_{DC} = 25 \cdot 8,5 = 212,5W$$

Hiệu suất (với $U_V = 12V_{rms}$):

$$= (P_{ra}/P_V) \cdot 100\% = (36,125/212,5) \cdot 100\% = 17,0\%$$

Công suất tiêu tán trên mỗi transistor:

$$P_T = P_{2T} / 2 = (P_V - P_{ra}) / 2 = (212,5 - 36,125) / 2 = 88,1875W$$

b) Nếu điện áp vào tăng bằng điện áp U_{CC} , $U_V = 25$. U_{peak}

($U_V = 17,68V_{rms}$) thì $U_{L(P)} = U_{CC} = 25V$

Suy ra :

$$P_{rmax} = U_{CC}^2 / 2 \cdot R_L = 25^2 / 2 \cdot 4 = 78,125W$$

$$P_{Vmax} = (2/ \sqrt{2}) \cdot (U_{CC}^2 / R_L) = (2/ \sqrt{2}) \cdot (25^2 / 4) = 156,25W$$

$$P_{max} = (P_{rmax} / P_{Vmax}) \cdot 100\% = (78,125 / 156,25) \cdot 100\% = 50,0\%$$

Với tín hiệu vào cực đại thì công suất tiêu tán mỗi transistor sẽ là:

$$P_T = P_{2T} / 2 = (P_V - P_{rmax}) / 2 = (156,25 - 78,125) / 2 = 39,0625W$$

c) Công suất tiêu tán cực đại cho phép ở mỗi transistor:

$$P_{2Tmax} = (2/ \sqrt{2}) \cdot (U_{CC}^2 / R_L) = (2/ \sqrt{2}) \cdot (25^2 / 4) = 156,25W$$

$$P_T = \frac{P_{2T}}{2} = \frac{156,25}{2} = 78,125W$$

3.4. MÉO TRONG TẦNG KHUẾCH ĐẠI

Một tín hiệu hàm số sin thuần túy có một tần số đơn ở đó điện áp thay đổi âm hay dương với số lượng bằng nhau. Bất kỳ tín hiệu nào thay đổi không đủ một chu kỳ thì được coi là bị méo. Bộ khuếch đại lý tưởng có thể khuếch đại một tín hiệu hàm sin thuần túy để đưa ra tín hiệu lớn hơn, dạng sóng trở thành tín hiệu sin tần số đơn. Khi méo xảy ra, đầu ra sẽ không còn nguyên dạng (ngoại trừ âm lượng) của tín hiệu đầu vào.

Méo có thể xuất hiện bởi vì các thiết bị có tính chất không tuyến tính, trong đó những trường hợp không tuyến tính hay méo biên độ sẽ xảy ra. Điều này có thể xuất hiện ở tất cả các chế độ khuếch đại. Méo cũng có thể xảy ra bởi vì phần tử của mạch điện và thiết bị điện áp ứng với thiết bị đầu vào một cách khác biệt ở những tầng số khác nhau, lúc đó nó đã trở thành méo tần số.

Một kỹ thuật để miêu tả méo của những dạng sóng tuần hoàn và sử dụng sự phân tích của Furiê, mô tả dạng sóng tuần hoàn bất kỳ trên phương diện thành phần tần số cơ bản và những thành phần tần số bội nguyên. Những thành phần ở bội nguyên này được gọi là thành phần sóng hài hay hàm điều hoà. Ví dụ: 1 tín hiệu cơ điện áp ứng gốc tần số là 1kHz sau khi bị méo, nó có thành phần tần số là 1kHz và thành phần

điều hoà là 2kHz ... Tầng số gốc của 1kHz được gọi là tầng số cơ bản, những tầng số ở bội nguyên là các sóng hài. Thành phần 2kHz được gọi là sóng hài bậc 2, và 3kHz là sóng hài bậc 3 ... Tầng số cơ bản không được gọi là sóng hài. Furiê đã không thừa nhận tầng số sóng hài phân số, chỉ thừa nhận bội nguyên của quy tắc cơ bản.

3.4.1. Méo hài.

Một tín hiệu được gọi là có độ méo hài khi có thành phần tần số điều hoà (không cho thành phần cơ bản). Nếu tầng số cơ bản có một biên độ A_1 và thành phần tần số n có biên độ A_n , thì độ méo hài có thể được định nghĩa như sau :

$$\%n \text{ (méo hài bậc } n) = \text{Điện}_n \% = (|A_n|/|A_1|) \cdot 100\%$$

Thành phần cơ bản thì lớn bất kỳ thành phần nào.

Ví dụ

Tính thành phần méo hài cho một tín hiệu đầu ra có biên độ gốc là 2.5V, biên độ hài bậc 2 là 0.25V biên độ hài bậc 3 là 0.1V và biên độ hài bậc 4 là 0,05V.

Giải.

$$D_2\% = (|A_2|/|A_1|) \cdot 100\% = (0,25V/2,5V) \cdot 100\% = 10\%$$

$$D_3\% = (|A_3|/|A_1|) \cdot 100\% = (0,1V/2,5V) \cdot 100\% = 4\%$$

$$D_4\% = (|A_4|/|A_1|) \cdot 100\% = (0,05V/2,5V) \cdot 100\% = 2\%$$

3.4.2. Méo hài tổng

Khi một tín hiệu đầu ra có các thành phần méo hài, tín hiệu có thể coi là méo hài tổng của những phần tử riêng biệt được kết hợp thông qua chương trình sau :

$$THD\% = \sqrt{D_2^2 + D_3^2 + D_4^2 + \dots} \cdot 100\%$$

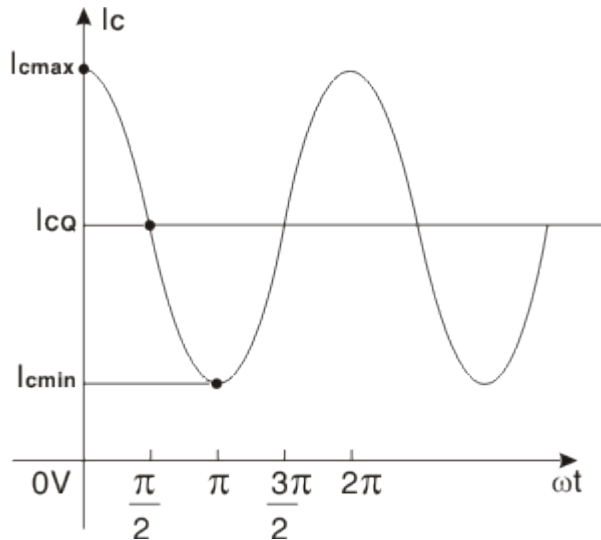
(THD là méo hài tổng)

Một công cụ như máy phân tích quang phổ thừa nhận sự đo lường của sóng hài trong tín hiệu bằng cách đưa ra thành phần cơ bản của tín hiệu và số lượng các hài của nó lên màn hình. Tương tự như vậy, 1 máy phân tích sóng cho phép thừa nhận mức đo lường chính xác hơn những thành phần hài của tín hiệu méo bằng cách lọc ra từng thành phần và đọc những thành phần đó.

Trong bất kỳ trường hợp nào, kỹ thuật coi một tín hiệu méo bất kỳ nào cũng chứa một thành phần cơ sở và các thành phần hài là tiện dụng và hữu ích, trong đó thành phần hài bậc hai là lớn nhất. Vì vậy. Vì vậy, mặc dù tín hiệu méo về lý thuyết là chứa tất cả các thành phần hài từ bậc trở lên, thành phần quang trọng nhất trên phương diện độ méo ở các chế độ ở trên chính là méo hài bậc 2.

3.4.3. Méo hài bậc 2

Hình 3.18 chỉ ra một dạng sóng sử dụng để đạt được độ méo hài bậc 2. Dạng sóng hiện thời được đưa ra ở mức độ không hoạt động, nhỏ nhất và lớn nhất khi chúng xảy ra được thể hiện trên dạng sóng. Tín hiệu còi ra vài độ méo hiện tại. Phương trình mô tả dạng sóng tín hiệu méo như sau:



Hình 4.18

$$I_C = I_{CQ} + I_0 + I_1 \cos \omega t + I_2 \cos 2\omega t$$

Dạng sóng hiện thời chứa đựng dòng điện tĩnh I_C Xuất hiện ở tín hiệu đầu vào, một dòng điện 1 chiều I_0 căn cứ vào độ trung bình nonzero của tín hiệu méo, thành phần cơ bản của tín hiệu xoay chiều cơ bản, à thành phần hài bậc hai I_2 có tần số cơ bản gấp 2 lần. Mặc dù nhưn hài khác đều suất hiện nhưng chỉ có hài bậc 2 mới được đề cập ở đây. Ta xét các thời điểm sau :

Tại thời điểm thứ nhất : $t = 0$

$$i_C = I_{Cmax} = I_{CQ} + I_0 + I_1 \cos 0 + I_2 \cos 0.$$

$$I_{Cmax} = I_{CQ} + I_0 + I_1 + I_2$$

Thời điểm thứ hai : $t = T/2$

$$i_C = I_{CQ} = I_{CQ} + I_0 + I_1 \cos T/2 + I_2 \cos 2T/2$$

$$I_{CQ} = I_{CQ} + I_0 - I_2$$

Thời điểm thứ ba : $t = T$

$$i_C = I_{Cmin} = I_{CQ} + I_0 + I_1 \cos T + I_2 \cos 2T$$

$$I_{Cmin} = I_{CQ} + I_0 - I_1 - I_2$$

Từ các phương trình trên ta có kết quả sau:

$$I_0 = I_2 = (I_{Cmax} + I_{Cmin} - 2I_{CQ})/4$$

$$I_1 = (I_{Cmax} - I_{Cmin})/2$$

Như vậy định nghĩa méo hài bậc 2 có thể được nhấn mạnh như sau :

$$D_2 = |I_2 / I_1| \cdot 100\%$$

Thay I_1, I_2 vào :

$$D_2 = 1/2 \cdot (I_{Cmax} + I_{Cmin}) - I_{CQ} / (I_{Cmax} - I_{Cmin}) \cdot 100\%$$

3.4.4. Công suất tín hiệu méo

Khi độ méo suất hiện, công suất đầu ra được tính cho tín hiệu méo không còn chính xác nữa. Khi độ méo hiện diện, công suất đầu ra được phân phối đến cho điện trở tải RC theo thành phần cơ bản của tín hiệu méo là :

$$P_1 = I_1^2 \cdot R_C / 2$$

Công suất tổng :

$$P = (I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots) \cdot R.C/2$$

Công suất tổng cũng có thể được biểu diễn với dạng méo hài tổng:

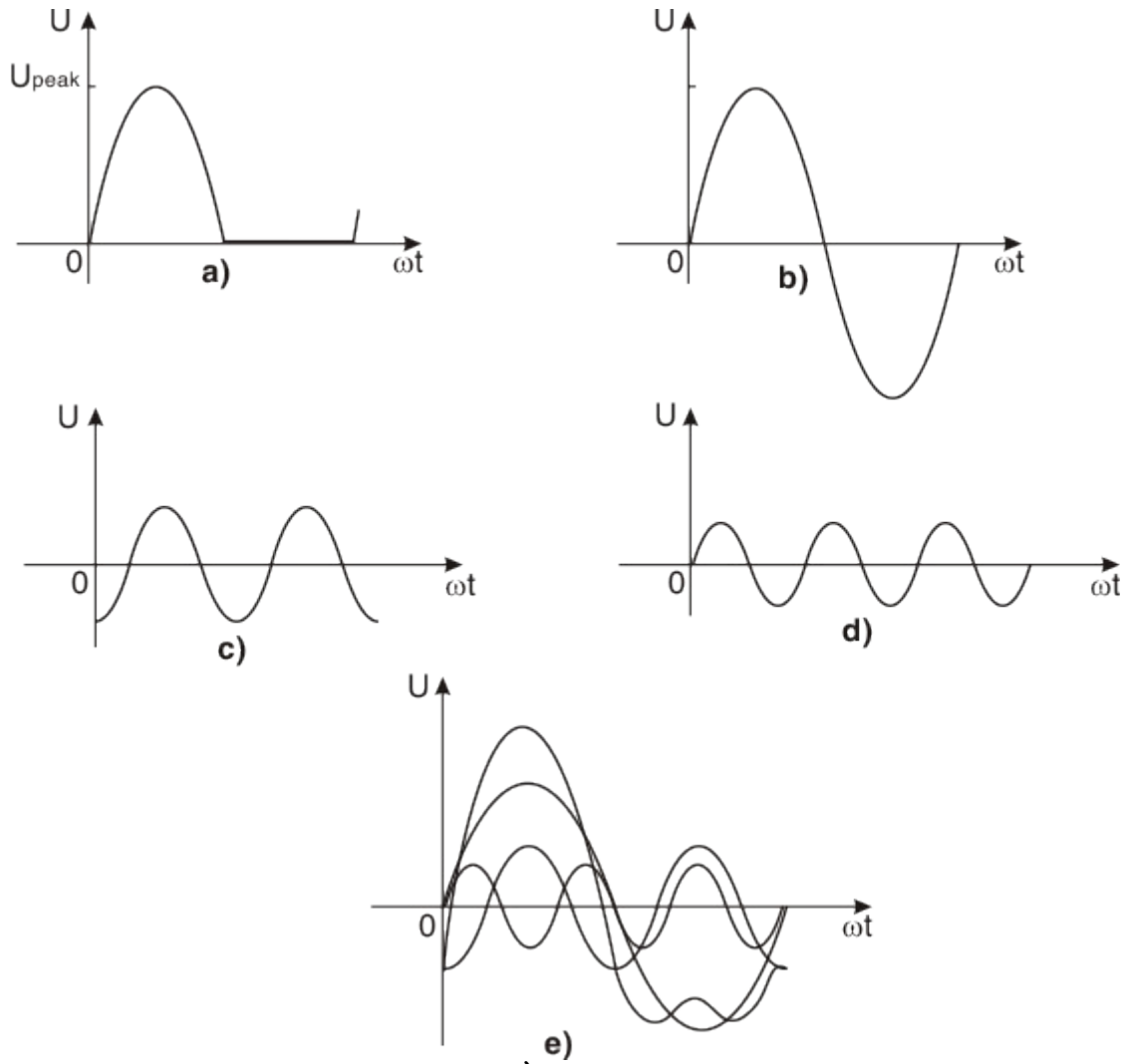
$$P = (1 + D_2^2 + D_3^2 + \dots) \cdot I_1^2 \cdot R.C/2 = (1 + THD^2) \cdot P_1$$

Một dạng sóng méo như xuất hiện ở chế độ B có thể được thể hiện bằng cách sử dụng phân tích của Furiê như một nguyên tắc cơ bản với các thành phần hài. Hình 4.19a chỉ ra nửa chu kỳ dương của tầng khuếch đại chế độ B. Thành phần cơ bản của tín hiệu méo có thể đạt được như ở hình 4.19b.

Thành phần hài bậc 2 và 3 được chỉ ra ở hình 4.19c và d. Sử dụng kỹ thuật Furiê, dạng sóng méo có thể được tạo ra bằng cách thêm vào những thành phần hài và cơ bản như hình 4.19e. Nói chung, bất kỳ dạng sóng tuần hoàn nào cũng có thể được biểu diễn bằng cách thêm thành phần cơ bản và tất cả các thành phần hài, mỗi biên độ khác nhau ở mỗi góc pha khác nhau.

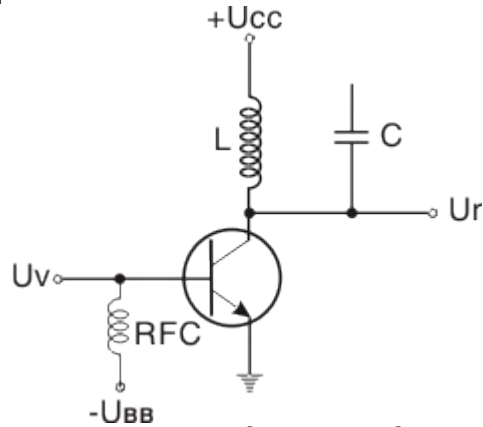
3.5. KHUẾCH ĐẠI CHẾ ĐỘ C VÀ D

Mặc dù chế độ khuếch đại chế độ A, AB và B thường được dùng trong khuếch đại công suất, khuếch đại chế độ D cũng được ứng dụng khá phổ biến vì có hiệu suất cao. Các mạch khuếch đại chế độ C lại ít được sử dụng trong khuếch đại âm thanh mà chỉ dùng trong khuếch đại âm thanh mà chỉ dùng trong các mạch khuếch đại cao tần để chọn lọc sóng hài mong muốn.



Hình 4.19

3.5.1. Khuếch đại chế độ C



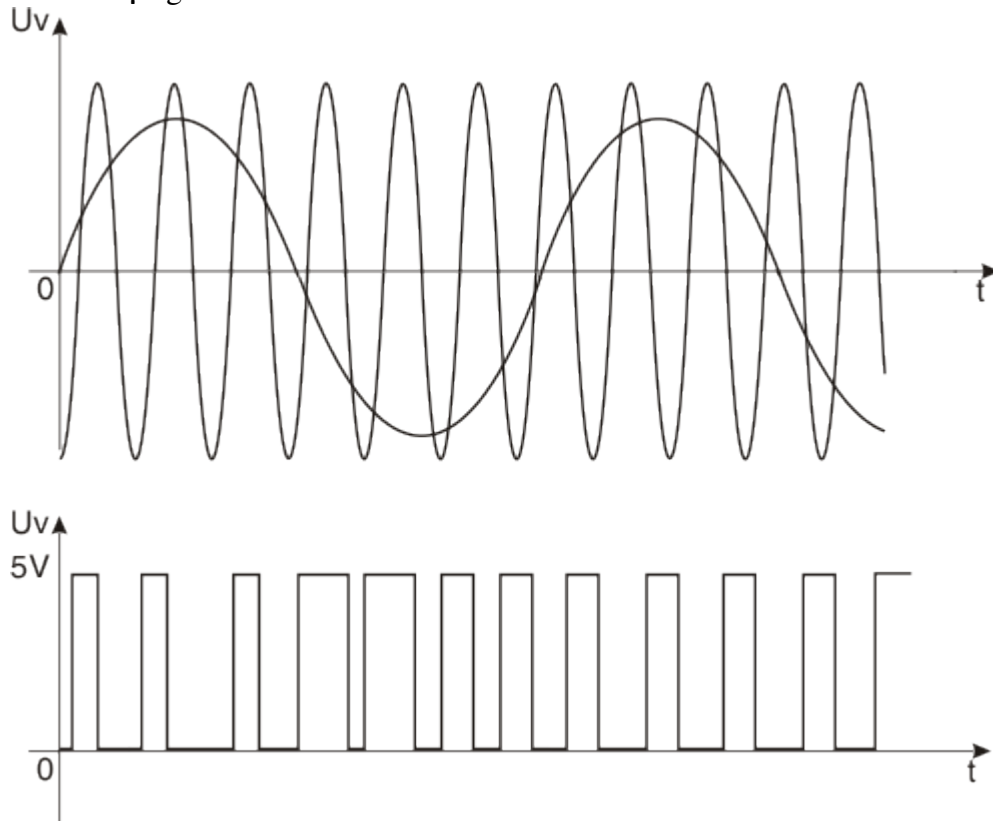
Hình 4.20: Khuếch đại chế độ C

Một mạch khuếch đại chế độ C như hình 3.20, hoạt động trong khoảng dưới $\frac{1}{2}$ chu kỳ tín hiệu vào. Dạng tín hiệu ở cửa ra cũng biểu diễn được đầy đủ chu kỳ của tín

hiệu cơ sở hoạt của mạch cộng hưởng (mạch LC chẳng hạn) ở cửa ra. Hoạt động của mạch khuếch đại này đầu sao cũng chỉ có giới hạn, như ở tầng trộn tần chẳng hạn.

3.5.2. Khuếch đại chế độ D

Khuếch đại chế độ D được thiết kế để làm việc với tín hiệu xung hoạt số. Với hiệu suất trên 90% của nó sẽ làm tăng thêm hiệu quả trong khuếch đại công suất. Người ta thường chuyển tín hiệu đầu vào bất kỳ thành dạng xung trước khi sử dụng nó để truyền một lượng tải công suất lớn và sẽ truyền ngược lại thành dạng tín hiệu sin để phục hồi tín hiệu gốc.

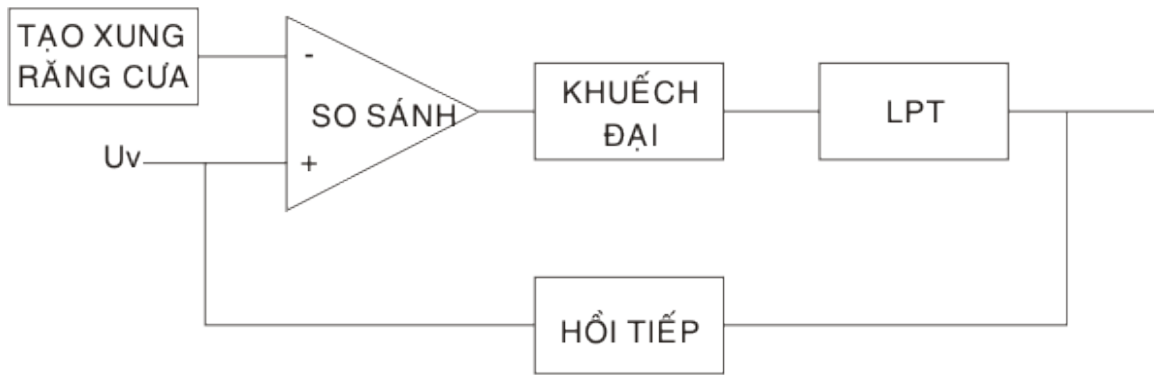


Hình 4.21

Hình 3.21 chỉ ra các cách để tín hiệu hình sin được chuyển dạng răng cưa hay dạng sóng cật để đưa đến đầu vào của mạch khuếch đại (loại máy so mẫu). Do đó một tín hiệu xung đặc trưng sẽ được tạo ra .

Trong khi chữ D được sử dụng để miêu tả thứ tự của một loại chế độ, sau chữ C, Thì người ta cũng có thể xem D là chữ viết tắt của "Digital", đây là bản chất của tín hiệu được tạo ra cho khuếch đại chế độ D.

Hình 3.21 chỉ ra sơ đồ khối của mạch khuếch đại chế độ D và biến đổi lại thành dạng sin thông qua một mạch lọc thông thấp (LPF). Transistor của bộ khuếch đại được sử dụng để tạo ra tín hiệu cơ bản khi chúng tắc hoạt mở, tạo ra dòng điện chỉ khi chúng được bật lên với một tổn hao công suất ít .



Hình 4.22