كلية العلوم

القسم : الفيزياء

السنة : الثالثة

المادة : الكترونيات٢

المحاضرة :الخامسة/نظري/

{{ مكتبة A to Z }}

Facebook Group : مكتبة A to Z

2025

كلية العلوم ، كلية الصيدلة ، الهندسة التقنية

يمكنكم طلب المحاضرات برسالة نصية (SMS) أو عبر(What's app-Telegram)على الرقم 0931497960

مضخمات الترانزستور ثنائي القطبية
Bipolar Junction Transistor Amplifiers

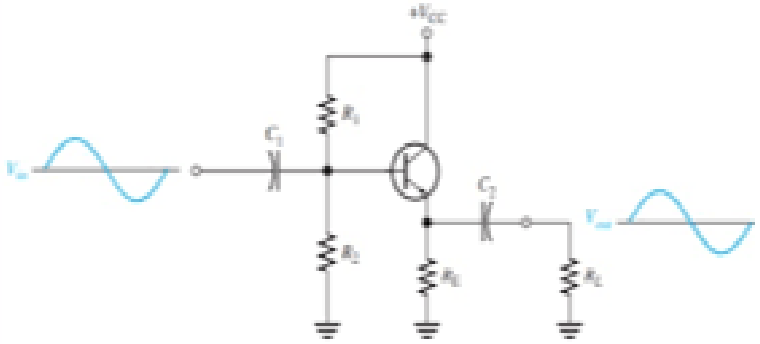
المضخم الترانزستوري ذو المجمع المشترك The Common Collector Transistor Amplifier:

يسمى عادة هذا المضخم بالباعث المرادف أو الباعث التابعي Emmitter–Follower (EF).

يبين الشكل (14) دارة الباعث المرادف (دارة المضخم ذو المجمع المشترك) في حالة انحياز بمقسم جهد حيث تطبق إشارة الدخل على قاعدة الترانزستور من خلال مكثفة اقتران مرتبطة سعوياً مع القاعدة وإشارة المخرج مقترنة سعوياً من جهة الباعث ويقع المجمع عند الأرضي الديناميكي.

تتميز دارة المضخم ذو المجمع المشترك بأن الربح بالجهد للمضخم يساوي إلى الواحد وهنا لا يوجد انقلاباً بالجهد كما أن سعة (مطال) إشارة الخرج مطابق تقريباً لمطال إشارة الدخل، ويتميز بمقاومة مدخله العالية والربح بالتيار العالي.

Common Collector Amplifier



الشكل (14): دارة المضخم ذو الباعث المرادف

حساب الربح بالجهد A_v:

من المعلوم أن الربح بالجهد كما ذكرنا سابقاً يعطى بالعلاقة $\boldsymbol{A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}}}$

نرسم الدارة المكافئة لدارة الباعث المرادف كما هو موضح في الشكل (15) ومنه نحسب كلٍ من جهد الخرج V_{out} وجهد الدخل V_{in} وفق مايلي:

جهد الخرج ويساوي إلى:

$$V_{out} = I_e R_e \qquad (1-11)$$

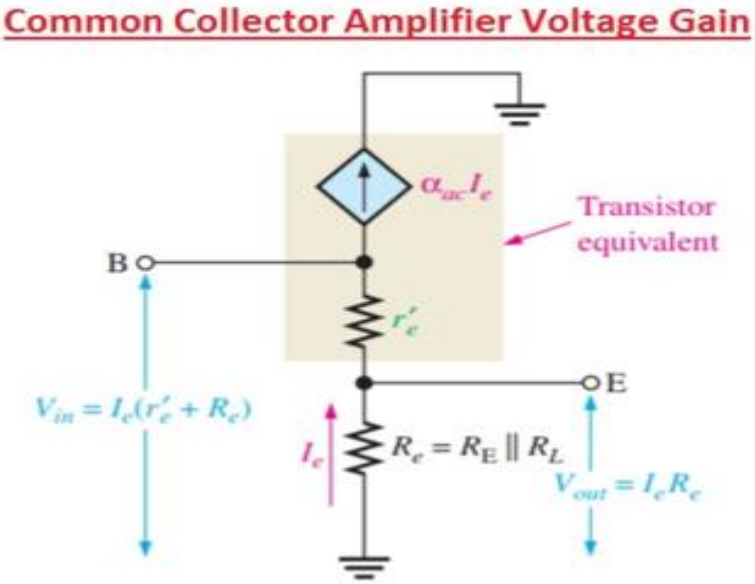
ويعطى جهد الدخل بالعلاقة (1–12):

$$V_{in} = I_e(r'_e + R_e) \qquad (1-12)$$

وبالتعويض في علاقة الربح بالجهد نجد:

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{I_e R_e}{I_e(r'_e + R_e)} = \frac{R_e}{(r'_e + R_e)} \qquad (1-13)$$

تمثل المعادلة (1–13) علاقة الربح بالجهد عند القاعدة – مجمع، حيث تمثل R_e المقاومة الناتجة من تركيب المقاومتين الموصولتين على التوازي مقاومة الباعث R_E ومقاومة الحمولة R_L.



الشكل (15): الدارة المتناوبة المكافئة للباعث المرادف

$$R_e = R_E \parallel R_L$$

وفقاً للعلاقة (13−1) فإن الربح بالجهد أقل من الواحد دوماً، أما في حالة عدم وجود الحمولة فإن $R_e = R_E$ وبتحقق الشرط $R_e \gg r'_e$ يصبح الربح بالجهد تقريباً مساوياً للواحد ($A_v \cong 1$).

سبب تسمية المضخم ذو المجمع المشترك بالباعث المرادف (الباعث التابعي):

بما أن جهد الخرج يقع عند الباعث فإن الباعث يكون متوافقاً بالطور مع جهد القاعدة، ولهذا السبب لا يوجد انقلاباً بالطور وعامل الربح بالجهد يساوي تقريباً الواحد فإن جهد الخرج يردف أو يتبع تماماً جهد الدخل بالطور والسعة معاً لذا سمي بالباعث المرادف.

حساب مقاومة الدخل لدارة المضخم:

يتميز الباعث المرادف بمقاومة دخل عالية مما يجعل منه دارة مفيدة تستخدم كدارة دارئة لتخفيض آثار الحمولة عند تشغيل دارة ما بحمولة مقاومتها منخفضة.

من دارة المضخم ذو المجمع المشترك نلاحظ أن إشارة الخرج تكون بين طرفي مقاومة الباعث R_e وبالتالي لا يمكن للباعث أن يكون مقترن بمكثفة تمرير عند مقاومة الباعث R_E على الاطلاق.

تعطى علاقة مقاومة الدخل للمضخم ذو المجمع المشترك كما هو الحال للمضخم ذو الباعث المشترك وفق العلاقة:

$$R_{IN(Base)} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{V_b}{I_b}$$

يعطى جهد الدخل بالعلاقة:

$$V_b = I_e(r'_e + R_e)$$

وبما أن $I_e = I_c + I_b$ وباعتبار أن $I_e \cong I_c$ يمكننا كتابة العلاقة التالية

$I_e \cong I_c = \beta_{ac} I_b$ وبالتعويض في علاقة المقاومة الداخلية للمضخم نحصل على العلاقة (14−1):

$$R_{IN(Base)} = \frac{V_b}{I_b} = \frac{I_e(r'_e + R_e)}{I_b} = \frac{\beta_{ac} I_b(r'_e + R_e)}{I_b}$$

$$R_{IN(Base)} \cong \beta_{ac}(r'_e + R_e) \qquad (1-14)$$

وإذا تحقق الشرط $R_e \gg r'_e$ تؤول العلاقة (14-1) إلى الشكل:

$$R_{IN(Base)} \cong \beta_{ac}\, R_e$$

ومن الشكل (14) نلاحظ أن أن مقاومتي الانحياز R_1 و R_2 مرتبطان على التوازي مع مقاومة الدخل التي تبرز من مدخل المنبع عند قاعدة المضخم $R_{IN(Base)}$ ومنه تصبح مقاومة الدخل الكلية مساوية إلى:

$$R_{IN(total)} = R_1 \parallel R_2 \parallel R_{IN(Base)} \qquad (1-15)$$

تحسب مقاومة المخرج لدارة المضخم ذو المجمع المشترك وفق مايلي:

باعتبار أن مقاومة الحمولة معدومة عندها تعطى مقاومة المخرج بالعلاقة (16-1):

$$R_{out} = \frac{R_s}{\beta_{ac}} \parallel R_E \qquad (1-16)$$

وقيمتها صغيرة جداً وهذا ما يجعل دارة المضخم ذو المجمع المشترك (دارة الباعث المرادف) مفيداً عند تشغيل حمولات بمقاومات منخفضة.

حساب الربح بالتيار:

تعطى علاقة الربح بالتيار من أجل الباعث المرادف بالشكل:

$$A_i = \frac{I_e}{I_{in}} \qquad (1-17)$$

تحسب I_{in} من العلاقة:

$$I_{in} = \frac{V_{in}}{R_{IN(total)}}$$

في حال كانت المقاومة الناتجة من مقاومتي الانحياز بمقسم الجهد R_1 و R_2 المرتبطان على التوازي أكبر بكثير من مقاومة الدخل $R_{IN(Base)}$ ففي هذه الحالة فإن معظم تيار الدخل يذهب إلى القاعدة وهكذا يقترب ربح المضخم بالتيار من ربح الترانزستور بالتيار والذي يساوي إلى $\beta_{ac} = I_c/I_b$ وهذا بسبب أن جزء صغير من التيار يذهب إلى مقاومتي الانحياز أي يتحقق الشرط $R_1 \parallel R_2 \gg R_{IN(Base)}$

ومنه

$$A_i \cong \beta_{ac}$$

الربح بالاستطاعة:

تعطى علاقة الربح بالاستطاعة بالشكل:

$$A_p = A_v A_i \qquad (1-18)$$

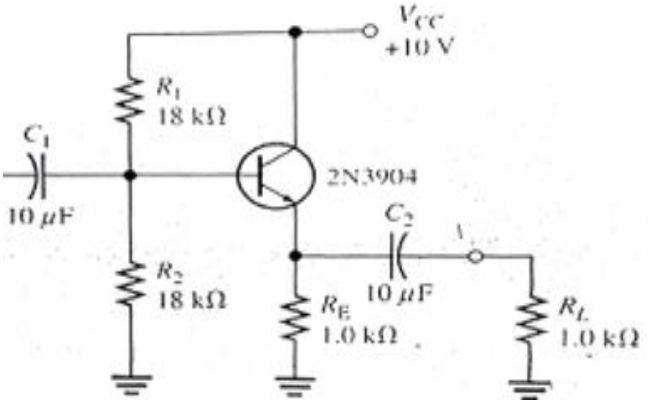
ولكن في دارة الباعث المرادف $A_v \cong 1$ ومنه $A_p \cong A_i$

مثال: لتكن الدارة المبينة في الشكل المجاور والمطلوب:

إيجاد مقاومة الدخل الكلية للباعث المرادف.

إيجاد كل من الربح بالجهد، والربح بالتيار، والربح بالاستطاعة بدلالة الطاقة المتشتتة في الحمولة R_L.

علماً أن $\beta_{ac} = 175$ و $V_b = 1V$ والممانعات الردية للمكثفات مهملة من أجل التردد العامل للباعث المرادف.



الحل: تحسب المقاومة الديناميكية للباعث أي المقاومة الديناميكية لمخرج الترانزستور بالعلاقة:

$$R_e = R_E \parallel R_L = \frac{R_E R_L}{R_E + R_L} = 1k\Omega \parallel 1k\Omega$$
$$= 500\Omega$$

ونحسب المقاومة التقريبية التي تظهر عند القاعدة بالعلاقة:

$$R_{IN(Base)} \cong \beta_{ac}\, R_e \cong 175(500\Omega) = 87.5\ k\Omega$$

ومنه تحسب مقاومة الدخل الكلية وفق العلاقة (15−1):

$$R_{IN(total)} = R_1 \parallel R_2 \parallel R_{IN(Base)} = 18k\Omega \parallel 18k\Omega \parallel 87.5k\Omega = 8.16k\Omega$$

من المعلوم أن الربح بالجهد في دارة المضخم ذو المجمع المشترك (الباعث المرادف) $A_v \cong 1$

ولكن في حال طلب حسابه بشكلٍ دقيق باستخدام المقاومة الديناميكية الداخلية للباعث r_e' عندها نطبق علاقة الربح بالجهد (13−1) ونحسب r_e' من العلاقة التالية:

$$r_e' = \frac{25mV}{I_E}$$

نحسب I_E من العلاقة:

$$I_E = \frac{V_E}{R_E}$$
$$V_E = V_B - V_{BE}$$
$$V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = 5V$$
$$V_E = 5 - 0.7 = 4.3V$$

نعوض قيمة V_E في علاقة تيار الباعث I_E فنجد:

$$I_E = 4.3mA$$

وبالتالي:

$$r_e' = 5.8\Omega$$

وبالتعويض كلٍ من r_e' و R_e نحصل على قيمة الربح بالجهد للمضخم المدروس وفق مايلي:

$$A_v = \frac{500}{5.8 + 500} = 0.989$$

تمثل هذه القيمة 0.989 القيمة الدقيقة للربح بالجهد بعد الأخذ بالحسبان r_e'.

يحسب الربح بالتيار وفق العلاقة (1−17):

$$A_i = \frac{I_e}{I_{in}}$$

تحسب I_e من العلاقة:

$$I_e = \frac{V_e}{R_e} = \frac{A_v V_b}{R_e} = \frac{1}{500} = 2mA$$

وتحسب I_{in} من العلاقة:

$$I_{in} = \frac{V_{in}}{R_{IN(total)}} = \frac{1}{8.16k\Omega} = 123\mu A$$

وبالتعويض في علاقة الربح بالتيار نجد:

$$A_i = 16.3$$

وتحسب علاقة الربح بالاستطاعة وفق العلاقة (1−18) ومنه:

$$A_p = A_v A_i$$

لكن في دارة الباعث المرادف $A_v \cong 1$ ومنه $A_p \cong A_i = 16.3$

بما أن $R_E = R_L$ فإن نصف الاستطاعة الكلية تتشتت في R_L ولهذا السبب يساوي الربح بالاستطاعة المتشتتة في الحمولة إلى نصف الربح الكلي بالاستطاعة:

$$A_{p(load)} = \frac{A_p}{2} = 8.15$$

دارة دارلغنتون:

أصبح من المعلوم لنا أن تعيين مقاومة دخل المضخم مرتبطة بشكل أساسي بعامل الربح الديناميكي β_{ac}، كما ويقيد مقاومة الدخل الأعظمية الممكن الحصول عليها من دارة الباعث المرادف، وأحد الأمثلة ل زيادة مقاومة الدخل هو تشكيل زوج دارلغنتون الذي يتكون من ترانزستورين يتصل المجمعان مع بعضهما البعض وباعث الترانزستور الأول يشغل قاعدة الثاني ووجدنا أن تشكيلات الترانزستورين هذه تساهم في زيادة الربح الديناميكي للتيار β_{ac} كما هو موضح في الشكل (15) ومنه نحصل على علاقة تيار الباعث للترانزستور الأول الموضحة بالعلاقة (1−19):

$$I_{e1} \cong \beta_{ac1} I_{b1} \qquad (1-19)$$

وبما أن باعث الأول متصل مع قاعدة الثاني نكتب العلاقة (1−20) المعبرة عن تيار الباعث الثاني:

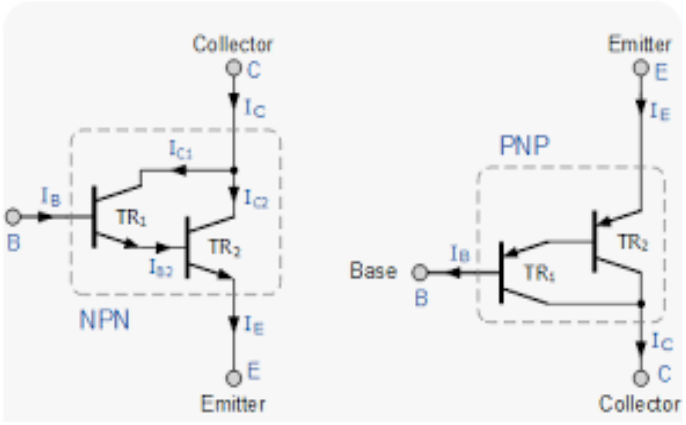
$$I_{e2} \cong \beta_{ac2} I_{e1} \cong \beta_{ac1}\beta_{ac2} I_{b1} \qquad (1-20)$$

ومنه نجد علاقة الربح الفعال بالتيار لزوج دارلغنتون:

$$\beta_{ac} = \beta_{ac1}\beta_{ac2}$$

بتعويض علاقة الربح الديناميكية لدارة دارلغنتون في علاقة مقاومة الدخل ل مضخم الترانزستور نحصل على العلاقة (1−21):

$$R_{IN(Base)} \cong \beta_{ac1}\ \beta_{ac2}\ \ R_E \ (1-21)$$



الشكل (15): دارة دارلنغتون

كما ذكرنا سابقاً يستخدم عادة الباعث المرادف كصلة وصل بين دارة مقاومة خرجها عالية وحمولة مقاومتها منخفضة يسمى الباعث المرادف في مثل هذا التطبيق بالمصد (الذي يساهم في تخفيف التناقص في قيمة الربح بالجهد).

تطبيق: لتكن الدارة المبينة في الشكل (16) والممثلة ل ترانزستور ذو باعث مشترك مرتبط مع باعث دارلغنتون التابعي ومتصل مع حمولة حيث يتصف المضخم ذو الباعث المشترك بالمقادير التالية:

$V_{cc} = 12V$ و $R_C = 1k\Omega$ و $r'_e = 5\Omega$.

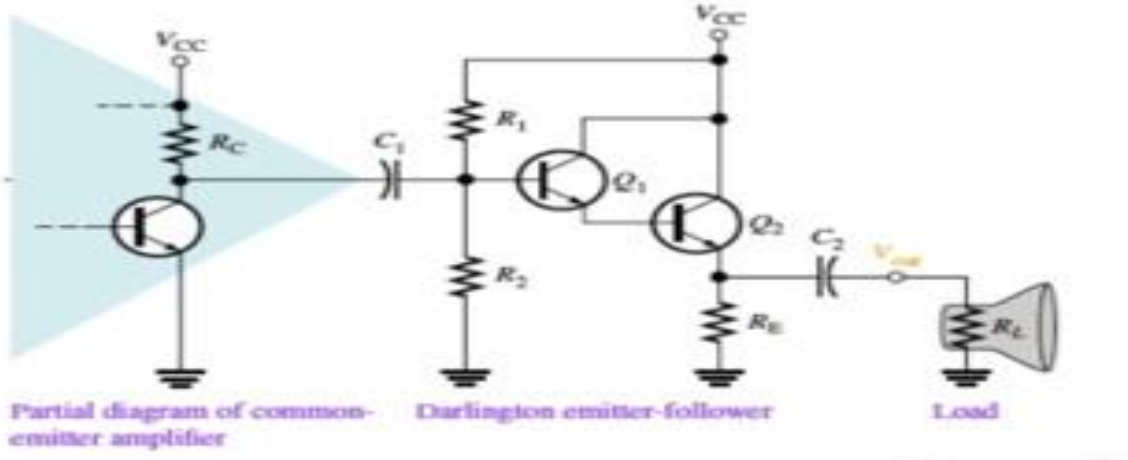
ويتصف الباعث المرادف بالمقادير التالية:

$V_{cc} = 12V$ و $R_1 = 10k\Omega$ و $R_2 = 22k\Omega$ و $R_E = 22\Omega$ و $R_L = 8\Omega$ و $\beta_{DC} = \beta_{ac} = 100$ من أجل كل ترانزستور. والمطلوب:

تعيين الربح بالجهد للمضخم ذو الباعث المشترك.

تعيين الربح بالجهد لباعث دارلغنتون المرادف.

تعيين الربح الكلي بالجهد ومقارنته بربح المضخم ذو الباعث المشترك الذي يشغل مكبر الصوت مباشرة بدون باعث دارلغنتون المرادف.



الشكل (16)

الحل: لتعيين A_v من أجل دارة المضخم ذو الباعث المشترك نطبق العلاقة:

$$A_v = \frac{R_c}{r_e'}$$

تحسب R_c لدارة المضخم ذو الباعث المشترك من العلاقة:

$$R_c = R_C \parallel R_{IN(total)}$$
$$R_{IN(total)} = R_1 \parallel R_2 \parallel R_{IN(Base)}$$
$$R_{IN(Base)} \cong \beta_{ac1}\ \beta_{ac2}\ R_E = 100 * 100 * 22\Omega = 220k\Omega$$
$$R_{IN(total)} = 10k\Omega \parallel 22k\Omega \parallel 220k\Omega$$

ومنه:

$$R_{IN(total)} = 6.67k\Omega$$

وبالتعويض نجد

$$R_c = 1k\Omega \parallel 6.67k\Omega = 870\Omega$$

بالتعويض في علاقة الربح بالجهد للباعث المشترك نجد:

$$A_v = \frac{R_c}{r_e'} = \frac{870\Omega}{5\Omega} = 174$$

لتعيين الربح بالجهد لدارة دارلغنتون للباعث المرادف نطبق العلاقة:

$$A_v = \frac{R_e}{(r_e' + R_e)}$$

$$r_e' = \frac{25mV}{I_E}$$

$$V_E = \frac{R_2 \parallel \beta_{DC}^2 R_E}{R_1 + R_2 \parallel \beta_{DC}^2 R_E} V_{CC} - 1.4 = \frac{20k\Omega}{(10+20)k\Omega} 12V - 1.4$$

$$V_E = 8 - 1.4 = 6.6V$$
$$I_E = \frac{V_E}{R_E} = \frac{6.6V}{22\Omega} = 300mA$$

ومنه

$$r_e' = \frac{25mV}{300mA} = 0.083\Omega$$

تحسب R_e من العلاقة:

$$R_e = R_E \parallel R_L = 22\Omega \parallel 8\Omega = 5.86\Omega$$

بالتعويض في علاقة الربح بالجهد نجد:

$$A_v = \frac{5.87\Omega}{0.083\Omega + 5.87\Omega} = 0.99$$

الربح الكلي بالجهد يعطى بالعلاقة:

$$A_v' = A_{v1}A_{v2} = 0.99(174) = 172.26$$

تمثل القيمة 172.26 قيمة الربح بالجهد بوجود مضخم باعث دارلغنتون المردف

في حال تم التكبير بواسطة المضخم ذو الباعث المشترك بدون وجود باعث دارلغنتون المردف عندها تعطى علاقة الربح بالجهد بالعلاقة:

$$A_v = \frac{R_c}{r_e'}$$

و R_c تساوي إلى:

$$R_c = R_C \parallel R_L = 1k\Omega \parallel 8\Omega = 7.94\Omega$$

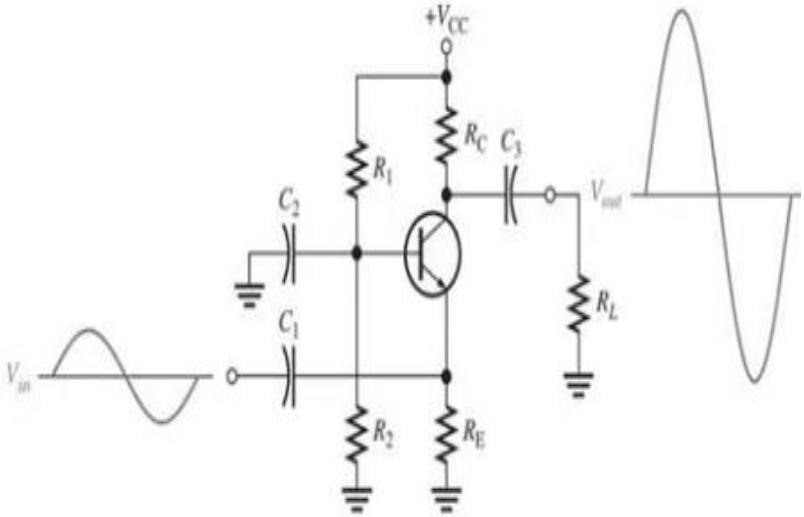
$$A_v = \frac{7.94\Omega}{5\Omega} = 1.59$$

المضخم الترانزستوري ذو القاعدة المشترك The Common Base Transistor Amplifier:

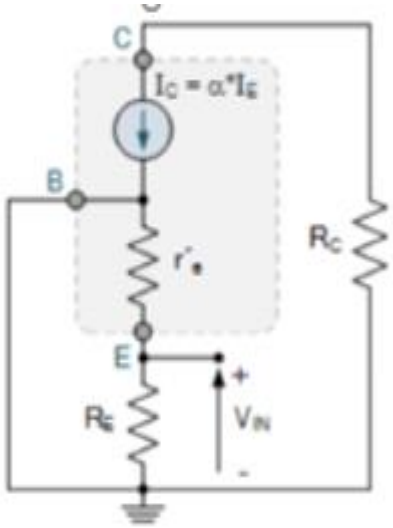
يتميز المضخم ذو القاعدة المشترك بالربح العالٍ بالجهد، كما ويبدي ربحاً أعظمياً بالتيار مساوياً للواحد، ومقاومة دخل منخفضة لذا يعد من أكثر أنواع المضخمات استخداماً في التطبيقات العملية حيث تسعى منابع التغذية أن تمتلك إشارات خرج بمقاومة منخفضة جداً، ومقاومة خرج عالية.

يبين الشكل (17) دارة مضخم ذو قاعدة مشتركة حيث تقع القاعدة عن الأرضي الديناميكي وترتبط معه سعوياً بالمكثفة C_2، وتقترن إشارة الدخل مع الباعث سعوياً ويقترن الخرج بالمجمع ومقاومة الحمولة سعوياً.

باتباع نفس الخطوات المتبعة في التحليل المستمر للترانزستور ندرس المميزات الساكنة له.



الشكل (17): دارة المضخم ذو القاعدة المشتركة



الشكل (18): الدارة المكافئة المتناوبة

من ثم لدراسة الإشارة المتناوبة المطبقة على دارة المضخم أولاً نرسم الدارة المكافئة لدارة المتناوبة والمعبر عنها بالشكل (18) ومن ثم نجد علاقة الربح بالجهج من الباعث للمجمع كمايلي:

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

يمثل جهد الخرج الجهد الديناميكي للمجمع V_c أما جهد الدخل فيتمثل بجهد الباعث الديناميكي V_e

حيث نجد من الدارة الموضحة في الشكل (18) أن:

$$V_c = I_c R_c$$

والجهد الديناميكي للباعث يعطى بالعلاقة:

$$V_e = I_e(r'_e \parallel R_E)$$

و $I_e \cong I_c$

وبالتعويض في علاقة الربح بالجهد نحصل على العلاقة (1−22):

$$A_v = \frac{V_c}{V_e} = \frac{I_c R_c}{I_e(r'_e \parallel R_E)} \cong \frac{I_e R_c}{I_e(r'_e \parallel R_E)} \qquad (1-22)$$

وفي حال تحققت المتراجحة $R_E \gg r'_e$ تؤول العلاقة (1−22) إلى الشكل (1−23):

$$A_v \cong \frac{R_c}{r'_e} \qquad (1-23)$$

و

$$R_c = R_C \parallel R_L = \frac{R_C R_L}{R_C + R_L}$$

نلاحظ أن العلاقة (1−23) هي نفسها علاقة الربح للمضخم ذو الباعث المشترك ولكن لايوجد اختلاف في الطور من الباعث للمجمع.

إيجاد علاقة مقاومة الدخل:

تعطى علاقة المقاومة التي تظهر عند الباعث بالعلاقة (1−24):

$$R_{in(emitter)} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{V_e}{I_e} = \frac{I_e(r'_e \parallel R_E)}{I_e}$$

$$R_{in(emitter)} = I_e(r'_e \parallel R_E) \qquad (1-24)$$

في الحالة العملية النموذجية تتحقق المتراجحة $R_E \gg r'_e$ ومنه تؤول العلاقة (1−24) إلى الشكل:

$$R_{in(emitter)} \cong r'_e$$

إيجاد علاقة مقاومة الخرج:

تعطى مقاومة الخرج لدارة المضخم بالعلاقة:

$$R_{out} = r'_c \parallel R_C$$

توصل مقاومة المجمع الديناميكية r'_c على التوازي مع المقاومة الساكنة للمجمع R_C ولكن من المعلوم أن مقاومة الخرج الديناميكية للمجمع أكبر بكثير من R_C ومنه تصبح مقاومة الخرج للمضخم وفق العلاقة (1−25):

$$R_{out} \cong R_C \qquad (1-25)$$

علاقة الربح بالتيار:

يعرف الربح بالتيار بأنه نسبة تيار الخرج إلى تيار الدخل ويعطى بالعلاقة (1−26):

$$A_i = \frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{I_c}{I_e} = \frac{I_c \cong I_e}{I_e} \qquad (1-26)$$

$$A_i \cong 1$$

علاقة الربح بالاستطاعة:

تعطى علاقة الربح بالاستطاعة بالعلاقة:

$$A_p = A_v A_i$$

ومن المعلوم أنه في دارة المضخم ذو القاعدة المشتركة الربح بالتيار يساوي الواحد تقريباً فتؤول علاقة الربح بالاستطاعة إلى الشكل (27−1):

$$A_p \cong A_v \qquad (1-27)$$

تطبيق: أوجد كل من مقاومة الدخل والربح بالجهد والربح بالتيار والربح بالاستطاعة من أجل دارة المضخم الموضحة في الشكل (17) التي تتصف بالمقادير التالية: $V_{CC} = 10V$ و $R_1 = 56k\Omega$ و $R_2 = 12k\Omega$ و $R_E = 1k\Omega$ و $R_C = 2.2k\Omega$ و $R_L = 10k\Omega$

علماً أن $\beta_{DC} = 250$.

الحل:

تعطى المقاومة الداخلية للمضخم بالعلاقة

$$R_{in(emitter)} \cong r'_e$$

لإيجاد مقاومة الدخل لابد من إيجاد المقاومة الداخلية الديناميكية للباعث ويتم ذلك وفق العلاقة:

$$r'_e = \frac{25mV}{I_E}$$

$$I_E = \frac{V_E}{R_E}$$

$$V_E = \frac{R_2 V_{CC}}{R_1 + R_2} - 0.7 = \frac{12k\Omega(10V)}{68k\Omega} - 0.7$$

$$V_E = 1.06V$$

ومنه $I_E = 1.06mA$

وبالتعويض في علاقة المقاومة الداخلية الديناميكية للباعث نجد:

$$r'_e = \frac{25mV}{I_E} = \frac{25mV}{1.06mA} = 23.6\Omega$$

ومنه

$$R_{in(emitter)} \cong r'_e = 23.6\Omega$$

ويحسب الربح بالجهد وفق العلاقة (23−1):

$$A_v \cong \frac{R_c}{r'_e}$$

$$R_c = R_C \parallel R_L = 2.2\ k\Omega \parallel 10k\Omega = 1.8k\Omega$$

ومنه :

$$A_v \cong 76.3$$

و

$$A_i \cong 1$$

و

$$A_p \cong A_v \cong 76.3$$

الربح بالجهد مقدراً بالديسبل (dB):

يعبر عادة عن الربح بالجهد بالديسبل بالعلاقة (28−1):

$$A_{v(dB)} = 20logA_v \qquad (1-28)$$

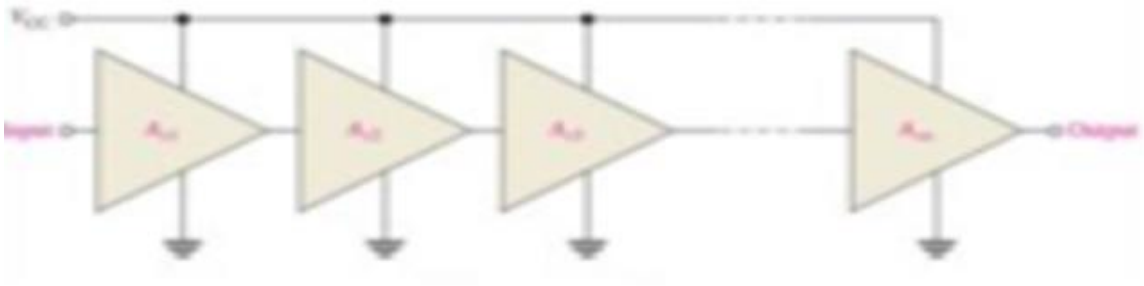
وهذا مفيد في المجموعات المتعددة المراحل لأن عامل الربح بالديسبل يساوي إلى مجموع الأرباح بالجهد لكل مضخم على حدة مقدرة بالديسبل وفق العلاقة:

$$A'_v = A_{v1(dB)} + A_{v2(dB)} + A_{v3(dB)} + \cdots + A_{vn(dB)}$$

تتشكل المضخمات متعددة المراحل كما هو موضح في الشكل (19) من ربط مضخمين أو أكثر وفق ترتيب تسلسلي بحيث يغذى مخرج المضخم الأول مدخل المضخم اللاحق ويسمى هذا الترتيب للمضخمات بالترتيب المتدرج فكل مضخم يدخل في تركيب الترتيب المتدرج يقابله مرحلة عملياتية واحدة والهدف الرئيس من الترتيب المتعدد المراحل في زيادة الربح الكلي بالجهد.

وتعطى علاقة الربح الإجمالي بالجهد للمضخمات المتدرجة A'_v بالعلاقة:

$$A'_v = A_{v1}A_{v2}A_{v3} \dots \dots \dots A_{vn}$$



الشكل (19): المضخمات متعددة المراحل