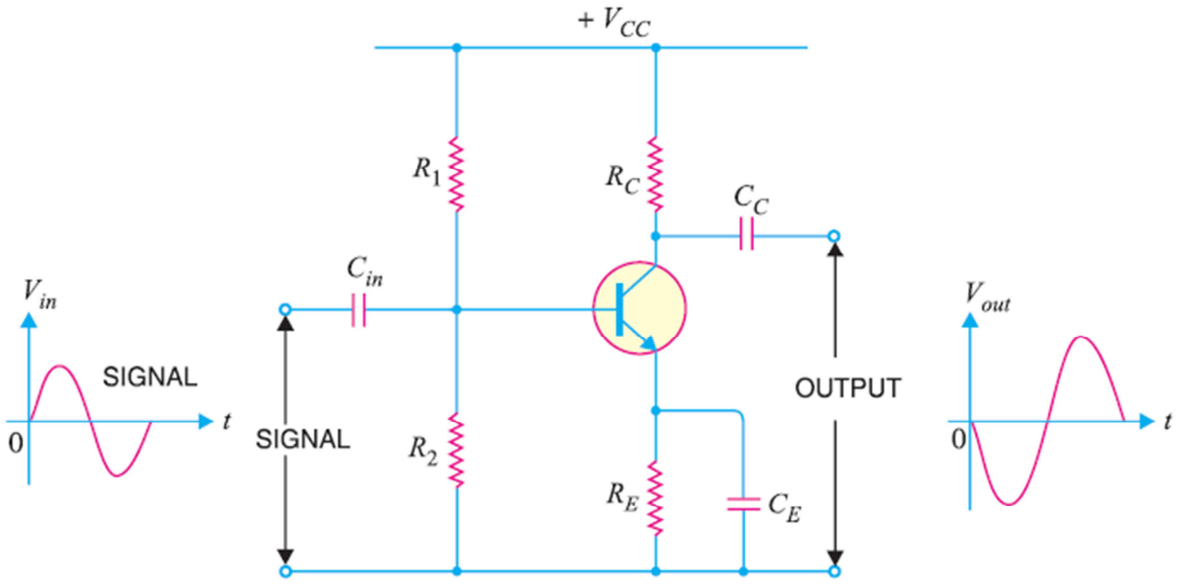
تدعى العملية التي يتم من خلالها زيادة شدة إشارة من دون تغيير أو تشويه في شكلها بالتضخيم (Amplification)، والدائرة التي تقوم بعملية تضخيم إشارة الإدخال تدعى بالمضخم (Amplifier). ويكاد لا يخلوا أي جهاز الكتروني في أيامنا هذه من دائرة مضخم، ومن امثلتها أجهزة التلفاز، المذياع، الهاتف النقال، المسجلات الصوتية، الحواسيب وغيرها كثير ولهذا تكتسب دوائر التضخيم أهمية كبيرة في مجال الإلكترونيات. سنتطرق أولا لدائرة المضخم التي تحتوي على ترانزستور واحد مع ملحقاتها والتي يطلق عليها مضخم ترانزستور ذي المرحلة الواحدة ومن ثم نناقش مضخم متعدد المراحل.

١.٦ مبدأ عمل مضخم ترانزستور BJT ذي المرحلة الواحدة

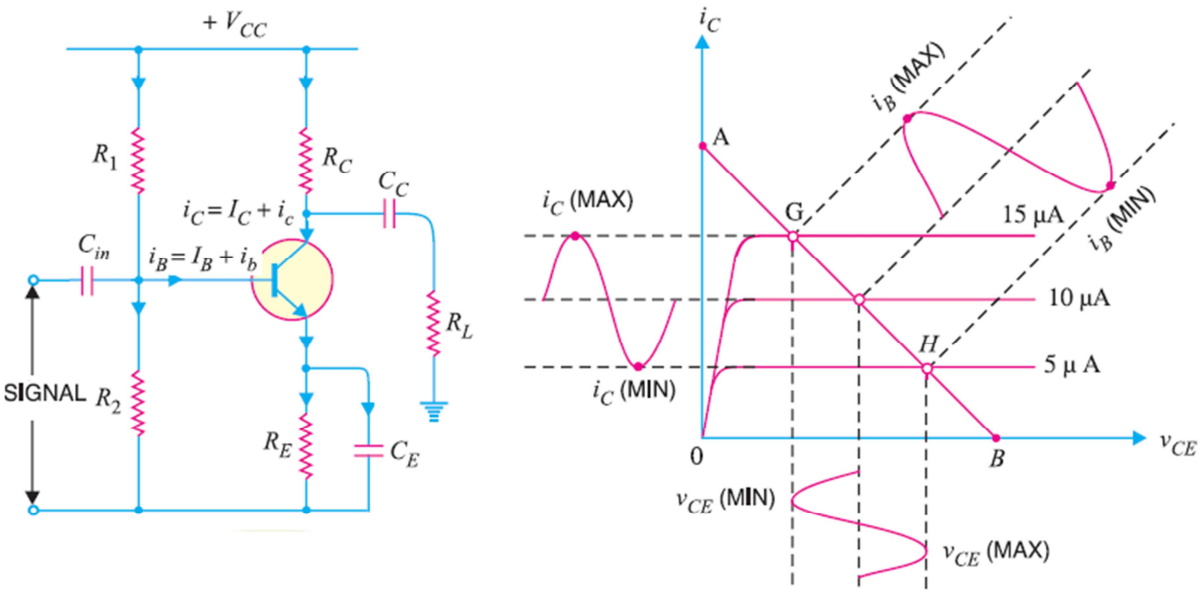
الشكل (٦-١) يمثل دائرة عملية لمضخم باعث مشترك بدائرة انحياز مقسم الجهد وهي من اكثر دوائر المضخمات استعمالاً في التطبيقات العملية، وفيما يلي وظيفة كل عنصر من عناصر تلك الدائرة:

- R_1 ، R_2 مقاومتان تعملان كمجزأ جهد لتوفير فولتيات التحييز الملائمة لعمل الترانزستور.
- R_E مقاومة تعمل على زيادة استقرارية عمل الدائرة (الثبوت النسبي لموضع نقطة العمل الساكنة).
- R_C مقاومة تعمل على تحديد التيار المار في الترانزستور لتجنب مرور تيار اعلى من تحمله.
- C_{in} ، C_c متسعات اقران، حيث تعمل C_{in} على السماح بدخول الإشارة الإدخال المتناوبة وتمنع أي إشارة مستمرة من الدخول إلى المضخم، و تعمل C_c على جعل فولتية الإخراج خالية من أي مركبة مستمرة.
- C_E متسعة إمرار تعمل على زيادة كسب الدائرة من خلال تأريض R_E في ظروف العمل المتناوبة.



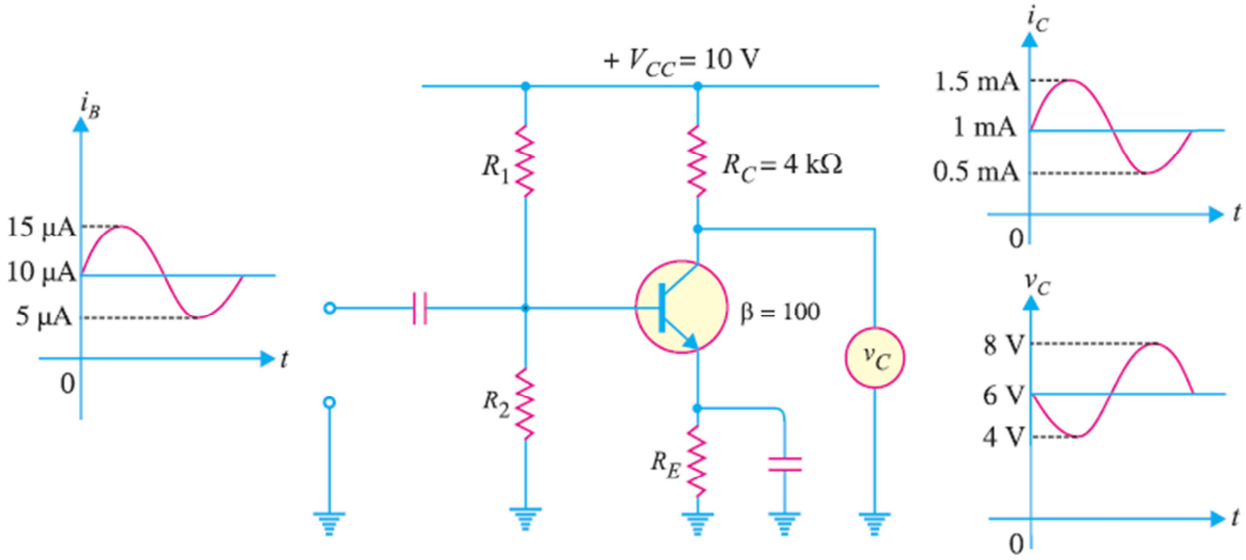
شكل ٦-١: مضخم باعث مشترك بانحياز مقسم جهد

الشكل (٦-٢) يوضح التيارات المختلفة (المستمرة والمتناوبة) داخل دائرة المضخم والتمثيل البياني لها.



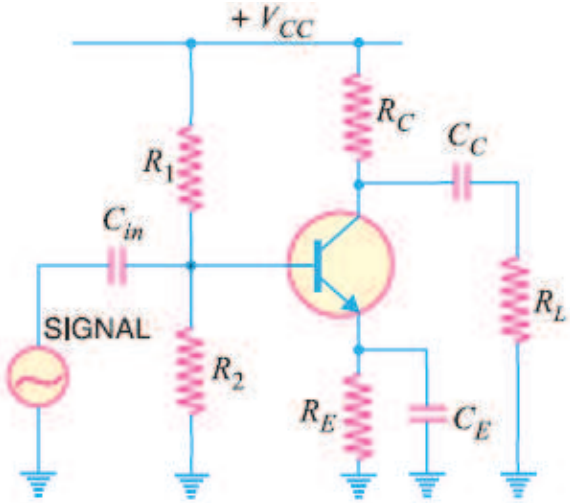
شكل ٦–٢: التيارات الداخلة والخارجة من مضخم الباعث المشترك بانحياز مقسم جهد

نلاحظ ان تيار القاعدة الكلي i_B هو عبارة عن تيار القاعدة الساكن I_B (غياب إشارة الإدخال) مضافاً اليه تيار الإدخال المتناوب i_b (القادم عبر المتسعة C_{in}) أي ان ($i_B=I_B+i_b$)، وباعتبار ان الترانزستور عامل في المنطقة الفعالة فان تيار الجامع الساكن I_C سيكون متناسباً خطياً مع تيار القاعدة الساكن ($I_C=\beta_{dc}I_B$) وكذلك الحال بالنسبة لتيار الجامع المتناوب ($i_c=\beta_{ac}i_b$) حيث β_{dc} و β_{ac} هما معاملا كسب التيار المستمر والمتناوب على الترتيب، وبالنتيجة يكون تيار الجامع الكلي هو ($i_C=I_C+i_c$). الشكل (٦–٣) يوضح دائرة مضخم له ($\beta=100$)، ووفرت له دائرة التحييز تيار قاعدة ساكن ($I_B=10\mu A$) ونقطة عمل ساكنة عند ($6V,1mA$)، حيث نلاحظ ان إشارة إدخال صغيرة ($\Delta i_B=10\mu A$) قد تضخمت بفعل المضخم إلى تغير كبير (مئة مرة) في تيار ($\Delta i_C=1mA$) الإخراج و تغير كبير في فولتية الإخراج ($\Delta v_{ce}=2V$) .



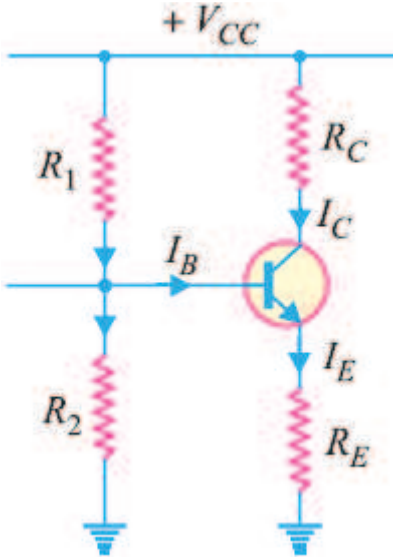
شكل ٦–٣: مخطط لمضخم باعث مشترك لتطبيق معين

٢.٦ الدائرة المكافئة المستمرة والمتناوبة للمضخم



لاحظنا من الفقرة السابقة ان عمل المضخم يتضمن ظروف عمل ساكنة (عدم وجود إشارة إدخال) والتي توفرها دائرة التحييز التي تتكون من مصدر الجهد المستمر والمقاومات ووظيفتها جعل الترانزستور عاملاً في منطقة العمل، وعند استعمال تلك لدائرة في تضخيم إشارة متناوبة فان دائرة المضخم ستتضمن فولتيات وتيار مستمرة ومتناوبة، ولتسهيل دراسة دائرة المضخم يتم تحليل دائرة المضخم المبينة في الشكل المجاور إلى دائرة مكافئة مستمرة ودائرة مكافئة متناوبة و كما يلي:

أولاً: الدائرة المكافئة المستمرة للمضخم:



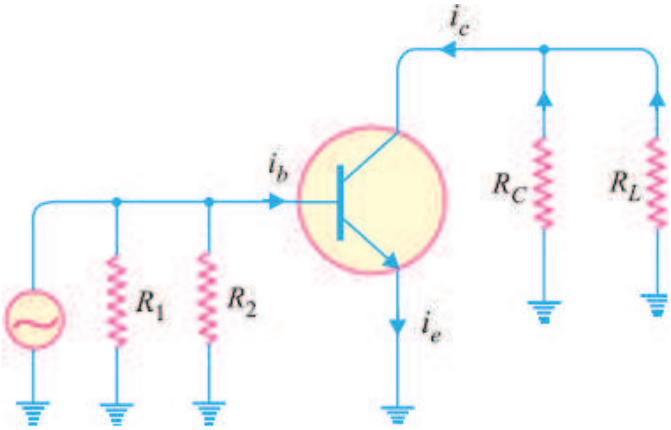
في هذه الحالة يتم اعتماد مصادر الجهد المستمرة فقط، ويتم تجاهل أي إشارة إدخال، وللحصول على الدائرة المكافئة المستمرة نقوم بالخطوات التالية:

١- قصر جميع المصادر المتناوبة.

٢- اعتبار أي متسعة دائرة مفتوحة.

الشكل المجاور يمثل الدائرة المكافئة المستمرة لدائرة مضخم الباعث المشترك بانحياز مقسم الجهد، ونلاحظ انها نفس الدائرة التي ناقشناها في الفصل السابق (دوائر الانحياز)، حيث يمكننا حساب كل من I_B, I_C, V_{CE} ورسم خط الحمل المستمر.

ثانياً: الدائرة المكافئة المتناوبة للمضخم:



الشكل المجاور يمثل الدائرة المكافئة المتناوبة، والذي يتم الحصول عليه بالخطوات التالية:

١- قصر جميع مصادر الجهد المستمر.

٢- اعتبار جميع المتسعات دوائر قصر.

وباعتماد تلك التقريبات يتم حساب التيارات والفولتيات المتناوبة وذلك باستعمال طرق تحليل سنأتي عليها لاحقاً.

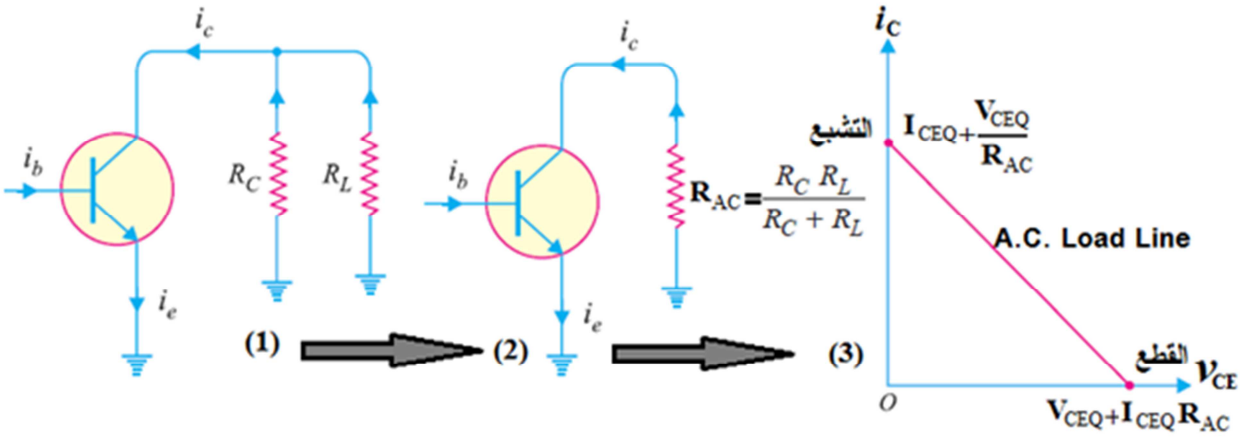
٣.٦ خط الحمل المتناوب D. C. Load Line

المخطط التالي يوضح خطوات رسم خط الحمل المتناوب، حيث يتم أولا رسم الدائرة المكافئة المتناوبة للدائرة ومن ثم يتم إيجاد المقاومة المكافئة للحمل المتناوب R_{AC} ومن ثم يتم إيجاد احداثيات نقطتي القطع والتشبع، حيث تعطى قيمة تيار التشبع وفولتية القطع بالصيغتين:

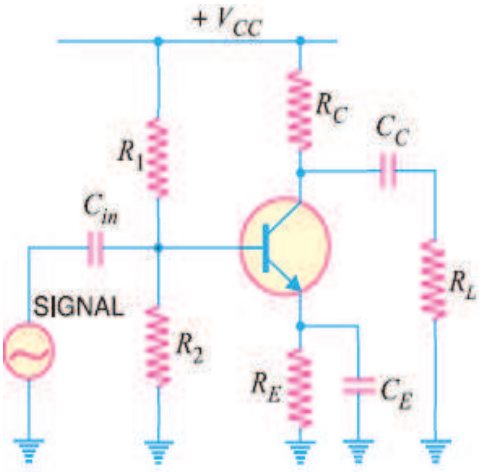
$$i_{Csat} = I_{CQ} + \frac{V_{CEQ}}{R_{AC}}$$

$$v_{CE\,cutt-off} = V_{CEQ} + I_{CQ}R_{AC}$$

حيث تمثل I_{CQ} و V_{CEQ} احداثيات نقطة العمل الساكنة.



مثال (٦-١): في الشكل التالي، اذا علمت ان (R_C=10kΩ) و (R_L=30kΩ) و (V_{CC}=20V)، المقاومتان R_1 و R_2 ضبطت بحث تكون احداثيات نقطة العمل الساكنة عند (10V, 1mA) ارسم:



١- خط الحمل المستمر.

٢- خط الحمل المتناوب.

علماً بان المقاومة R_E صغيرة القيمة بحيث يمكن إهمال تأثيراها.

الحل:

من معطيات المسألة لدينا

R_C=10kΩ,R_L=30kΩ,V_{CC}=20V,Q(10V, 1mA)

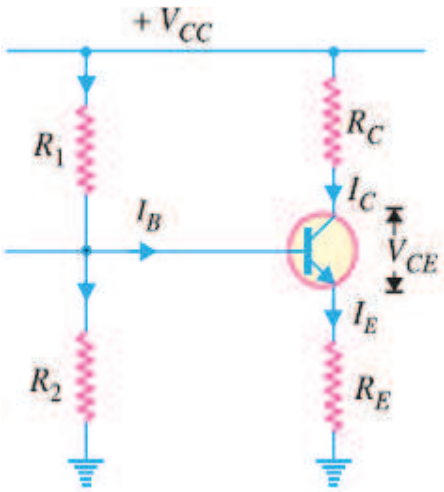
V_{CEQ}=10V, I_{CEQ}=1mA, R_E≈0

أولاً: رسم خط الحمل المستمر

لرسم خط الحمل المستمر نقوم أولا برسم الدائرة المكافئة المستمرة للدائرة والتي تكون بالشكل التالي:

حيث تعطى معادلة خط الحمل المستمر بالصيغة:

$$V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E)I_C$$



وبالاعتماد على معادلة خط الحمل المستمر نجد ان حداثيات نقطة التشبع وكما يلي:

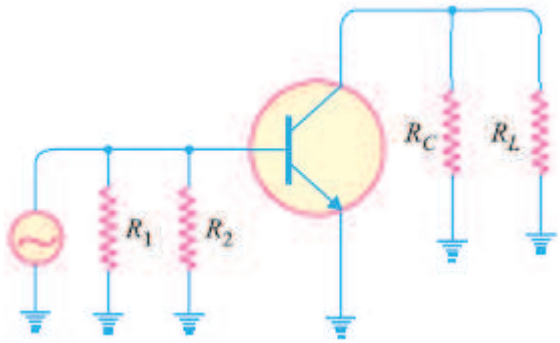
$$I_{Csat} = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E} \ , \ \Rightarrow \ I_{Csat} = \frac{20}{10\times10^3 + 0} = 2\times10^{-3}\,A$$

أي

ان احداثي نقطة التشبع هي (2mA , 0).

اما احداثيات نقطة القطع فتكون (V_{CC},0) أي ان احداثي نقطة القطع هي (20V, 0)، وبالتوصيل بين نقطتي التشبع والقطع نحصل على خط الحمل المستمر كما موضح بالشكل المجاور.

ثانياً: رسم خط الحمل المتناوب



لرسم خط الحمل المتناوب نقوم أولا برسم الدائرة المكافئة المتناوبة للدائرة، وهي كما موضحة بالشكل المجاور. من الشكل المجاور نجد ان المقاومة المكافئة للحمل المتناوب R_{AC} هي:

$$R_{AC} = \frac{R_C \times R_L}{R_C + R_L}$$

$$R_{AC} = \frac{10\times10^3 \times 30\times10^3}{10\times10^3 + 30\times10^3} = 7.5\times10^3\,\Omega$$

من معطيات المسألة ان احداثي نقطة العمل الساكنة هي (10V, 1mA) أي ان (V_{CEQ}=10V) و (I_{CQ}=1mA) ومنه يمكن ان نجد احداثي نقطتي القطع والتشبع لخط الحمل المتناوب وكما يلي:

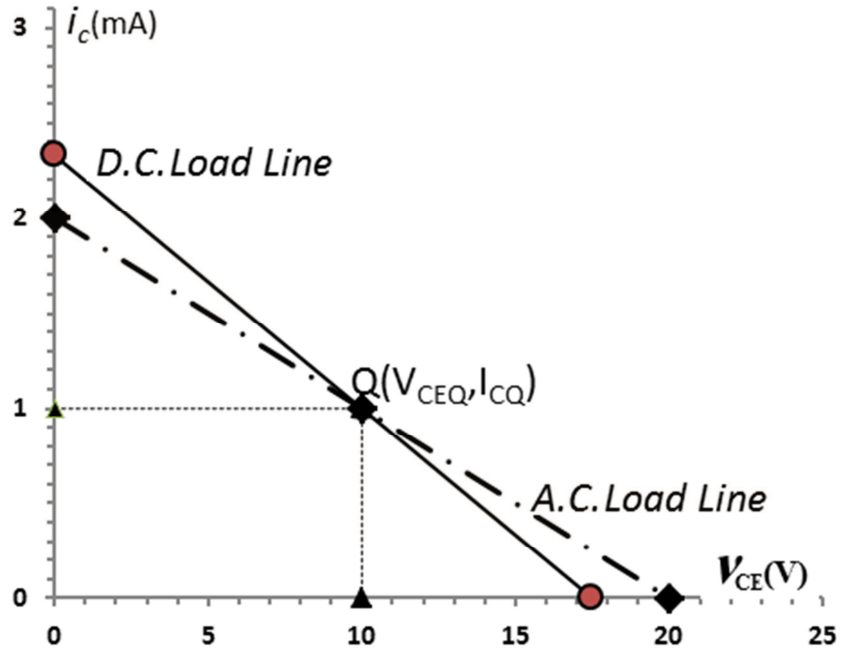
$$i_{Csat} = I_{CQ} + \frac{V_{CEQ}}{R_{AC}} = 1\times10^{-3} + \frac{10}{7.5\times10^3}$$

$$i_{Csat} = 2.33\times10^{-3}\,A \Rightarrow i_{Csat} = 2.33mA$$

$$\nu_{CEcutt-off} = V_{CEQ} + I_{CQ}R_{AC} = 10 + 1\times10^{-3}\times7.5\times10^3$$

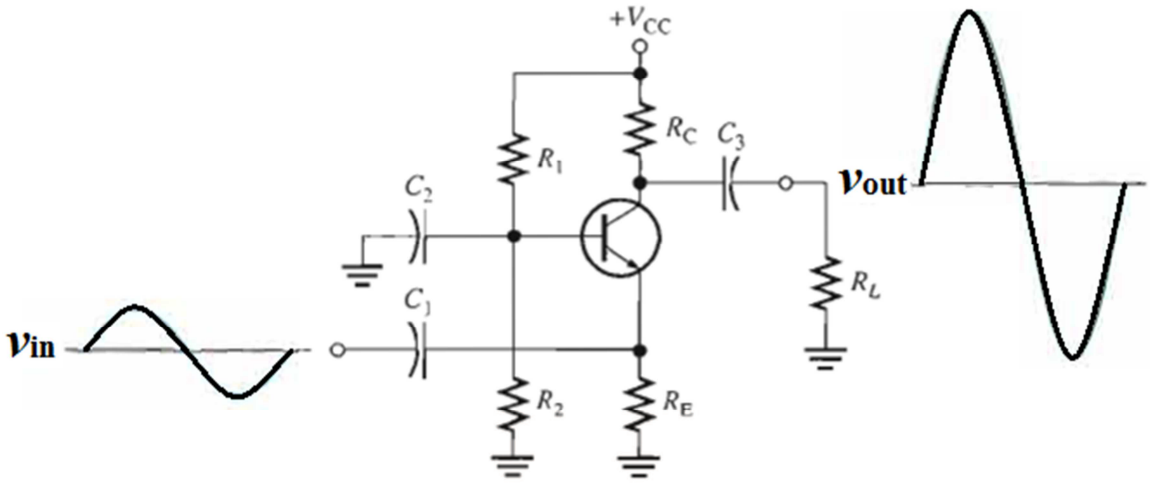
$$\nu_{CEcutt-off} = 17.5V$$

نجد ان احداثي نقطة التشبع هي (2.33mA , 0) ونقطة القطع هي (17.5V, 0)، وبالتوصيل بين النقطتين نحصل على خط الحمل المتناوب وكما هو موضح بالشكل التالي، يلاحظ ان خطي الحمل المستمر والمتناوب يتقاطعان عند نقطة العمل الساكنة.



٤.٦ مضخم القاعدة المشترك

الشكل (٦-٤) يوضح دائرة نموذجية لمضخم قاعدة مشتركة بانحياز مقسم جهد، حيث نجد ان طرف القاعدة هو الطرف المشترك حيث يتم تأريضه عبر المتسعة الإمرار C_2، إشارة الإدخال يتم إمرارها عبر متسعة الاقران C_1 اما إشارة الإخراج فتمر عبر متسعة الاقران C_3 وتظهر على طرفي مقاومة الحمل R_C.

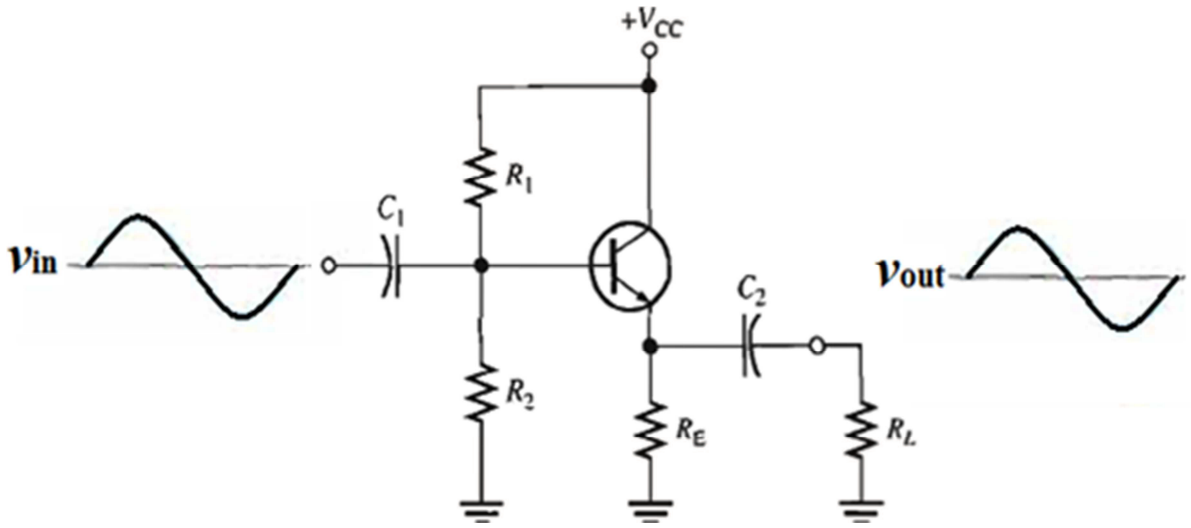


شكل ٦-٤: دائرة مضخم القاعدة المشترك

نلاحظ من الشكل (٦-٤) ان فولتية الإخراج المضخمة هي بنفس طور فولتية الإدخال، وكما يمتاز مضخم القاعدة المشترك بكسب فولتية عالي ($A_v>>1$) ، وبكسب تيار اقل أو قريب من واحد ($A_i\approx1$) ، وبكسب قدرة عالي ($A_p\approx A_v$)، كما يمتاز بممانعة إدخال (Z_{in}) صغيرة جداً وممانعة اخراج (Z_o) عالية جداً. ويستعمل هذا النوع من مضخمات في تطبيقات الترددات العالية (الأكثر من 10MHz).

٥.٦ مضخم الجامع المشترك

يسمى هذا المضخم أيضا مضخم تابع الباعث (Emitter Follower)، الشكل (٦-٥) يوضح مضخم الجامع المشترك بانحياز مقسم الجهد، حيث يلاحظ ان إشارة الإدخال تمرر عبر متسعة الاقران C_1 إلى طرف القاعدة، بينما تمرر إشارة الإخراج من طرف الباعث عبر متسعة الاقران C_2 لتظهر على طرفي مقاومة الحمل، بينما يكون طرف الجامع في حالة تأريض متناوب.



شكل ٦-٥: دائرة مضخم الباعث المشترك

نلاحظ ان فولتية الإخراج تشابه فولتية الإدخال حيث نجد ان فولتية الإخراج تساوي تقريباً فولتية الإدخال وبنفس الطور، يمتاز هذا المضخم بكسب فولتية اقل أو قريب من الواحد ($A_v \approx 1$)، وكسب تيار عالي ($Ai >> 1$) وكسب قدرة عالي ($A_p \approx A_i$)، وممانعة إدخال عالية جداً وممانعة إخراج صغيرة جداً. المقارنة بين مضخم الباعث المشترك والقاعدة المشترك والجامع المشترك مبينة في الجدول (٦-١) .

جدول (٦-١) مقارنة بين مضخمات الباعث المشترك، القاعدة المشتركة والجامع المشترك

الخاصية	مضخم القاعدة المشترك	مضخم الباعث المشترك	مضخم الجامع المشترك
ممانعة الإدخال Z_{in}	صغيرة جداً	صغيرة	عالية جداً
ممانعة الإخراج Z_o	عالية جداً	كبيرة	صغيرة جداً
كسب الفولتية A_v	عالي	عالي	اقل من واحد
كسب التيار A_i	اقل من واحد	عالي	عالي
كسب القدرة A_P	عالي	عالي جداً	عالي
فرق الطور	$0°$	$180°$	$0°$

٦.٦ الدائرة المكافئة المتناوبة للترانزستور باستعمال المعاملات الهجينة

تعتبر طريقة المعاملات الهجينة (*Hybrid Parameter*) من ادق الطرق المعتمدة في تحليل دوائر مضخم الترانزستور، كما تمتاز تلك المعاملات بسهولة حساب قيمها عملياً. ان أي دائرة خطية لها طرفي إدخال وطرفي إخراج يمكن تحليلها باستعمال اربع معاملات (احدها بوحدة بالأوم Ω والثانية مقلوب الأوم S والاثنان الباقيان بدون وحدات).

الشكل المجاور يمثل مخطط لدائرة خطية، تيار الإدخال لها i_1 والإخراج i_2 وبالاتجاه الموضح، وفولتية الإدخال v_1 والإخراج v_2 وبالقطبية الموضحة بالشكل.

في هذه الحالة يمكن التعبير عن فولتية الإدخال وتيار الإخراج بالصيغتين:

$$v_1 = h_{11} i_1 + h_{12} v_2 \qquad (6-1)$$

$$i_2 = h_{21} i_1 + h_{22} v_2 \qquad (6-2)$$

نلاحظ من المعادلة (6-1) ان المعامل h_{11} له وحدة الأوم (Ω) بينما المعامل h_{12} ليس له وحدات، ومن المعادلة (6-2) نجد ان المعامل h_{22} له وحدة مقلوب الأوم والتي تدعى سيمنس siemens ويرمز لها S، بينما المعامل h_{21} ليس له وحدات.

من المعادلتين (1) و (2) يمكننا تعريف المعاملات الهجينة الأربعة وكما يلي:

- بجعل (v_2=0) أي بقصر "توصيل" طرفي الإخراج، نحصل على:

$$h_{11} = \frac{v_1}{i_1}, \quad \text{for } v_2 = 0 \quad \text{(output shorted)}$$

$$h_{21} = \frac{i_2}{i_1}, \quad \text{for } v_2 = 0 \quad \text{(output shorted)}$$

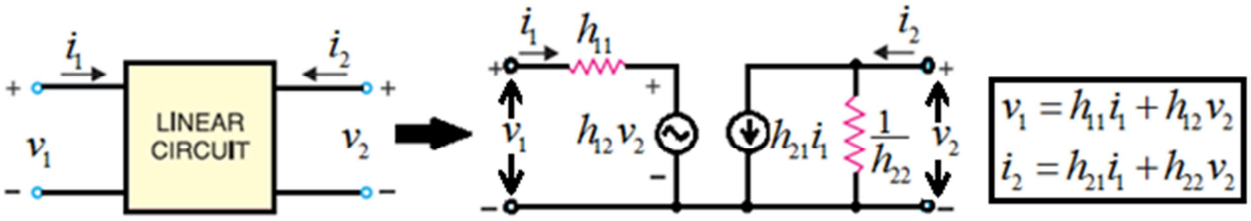
- بجعل (i_1=0) أي بقطع (فتح) طرفي الإدخال نحصل على:

$$h_{12} = \frac{v_1}{v_2}, \quad \text{for } i_1 = 0 \quad \text{(input open)}$$

$$h_{22} = \frac{i_2}{v_2}, \quad \text{for } i_1 = 0 \quad \text{(input open)}$$

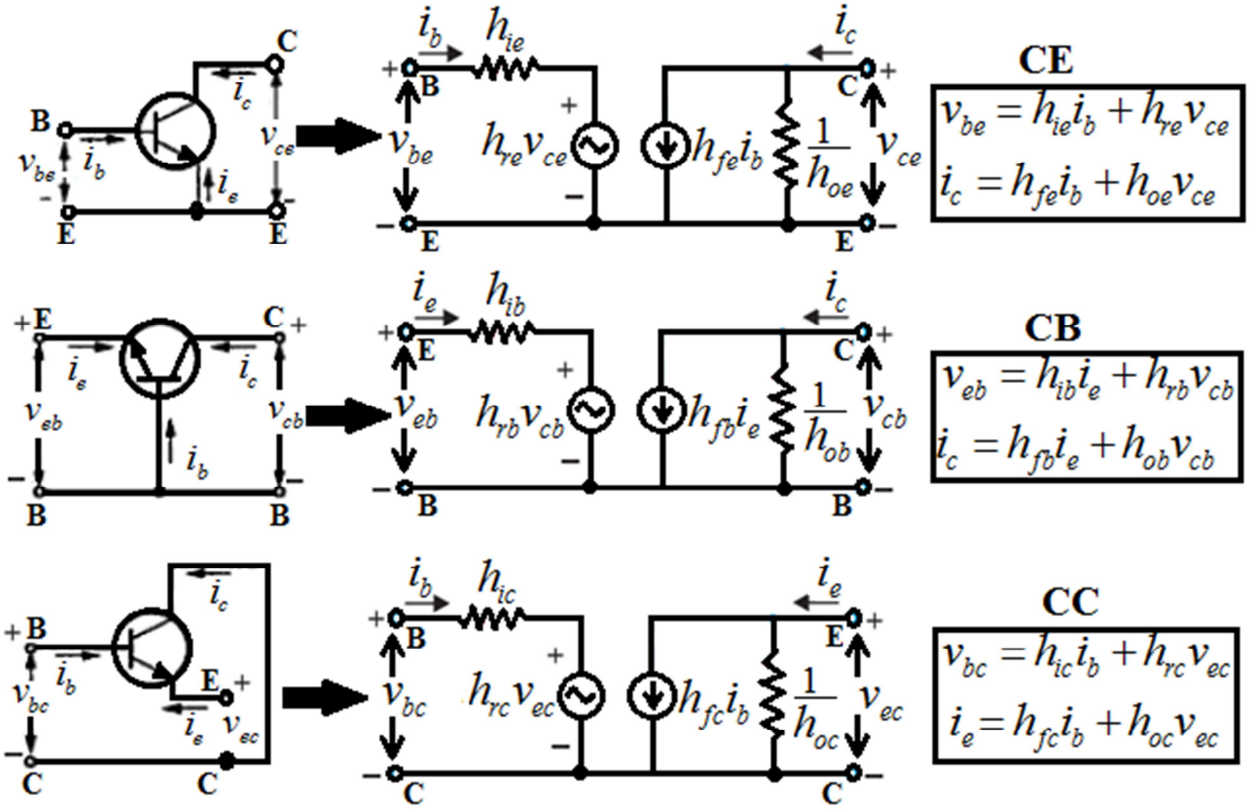
من العلاقات الأربع الأخيرة نلاحظ ان المعامل h_{11} يمثل ممانعة الإدخال للدائرة عند قصر طرفي الإخراج يرمز له أيضا (h_i)، بينما المعامل h_{21} يمثل كسب التيار عند قصر طرفي الإخراج ويرمز له أيضا (h_f)، والمعامل h_{12} يمثل مقلوب كسب الفولتية عند فتح طرفي الإدخال ويرمز له أيضا (h_r) ، والمعامل h_{22} يمثل مواصلة (مقلوب الممانعة) الإخراج عند فتح طرفي الإدخال ويرمز له أيضا (h_o).

ان المعادلتين (6-1) و (6-2) يمكن تمثيلها بالدائرة الموضحة بالشكل التالي:



$$v_1 = h_{11} i_1 + h_{12} v_2$$
$$i_2 = h_{21} i_1 + h_{22} v_2$$

يمكننا الآن ان نجد الدائرة المكافئة المتناوبة لترانزستور ذو ربط الباعث المشترك وكذلك القاعدة والجامع المشترك وكما موضح بالشكل التالي:



CE

$$v_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} v_{ce}$$
$$i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} v_{ce}$$

CB

$$v_{eb} = h_{ib} i_e + h_{rb} v_{cb}$$
$$i_c = h_{fb} i_e + h_{ob} v_{cb}$$

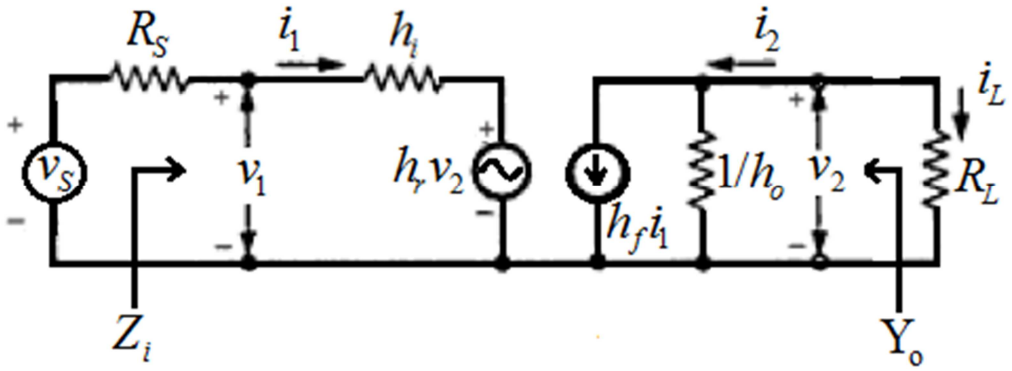
CC

$$v_{bc} = h_{ic} i_b + h_{rc} v_{ec}$$
$$i_e = h_{fc} i_b + h_{oc} v_{ec}$$

ان الشكل السابق يوضح كيفية الحصول على الدائرة المكافئة للترانزستور المنفرد حسب طريقة الربط المتبعة باستعمال المعاملات الهجينة، في الفقرة التالية سنناقش الدائرة المكافئة للمضخم باستعمال المعاملات الهجينة.

٧.٦ الدائرة المكافئة المتناوبة للمضخم باستعمال المعاملات الهجينة

الشكل (٦-٦) يوضح دائرة مضخم والدائرة المكافئة المتناوبة لها باستعمال المعاملات الهجينة:



شكل ٦-٦: الدائرة المكافئة لمضخم باستعمال المعاملات الهجينة

حيث تمثل R_L المقاومة الحمل المكافئة، R_S المقاومة المكافئة لمصدر الإشارة ودائرة تحييز الإدخال، يلاحظ من الشكل أننا لم نحدد طريقة الربط معينة للترانزستور، وبالتالي يمكننا كتابة العلاقة الخاصة بفولتية الإدخال وتيار الإخراج بالصيغة:

$$v_1 = h_i i_1 + h_r v_2 \qquad (6-3)$$

$$i_2 = h_f i_1 + h_o v_2 \qquad (6-4)$$

بالاعتماد على الدائرة المكافئة يمكننا اشتقاق العديد من العلاقات الهامة وهي:

أولاً: اشتقاق كسب التيار (A_i (Current Gain

من تعريف كسب التيار لدينا: $\mathrm{A}_i = \dfrac{i_L}{i_1} = \dfrac{-i_2}{i_1}$, $i_2 = -i_L$

من الشكل نلاحظ ان ($v_2 = -i_2 R_L$)، وبالتعويض في المعادلة (6-2) نحصل على:

$$i_2 = h_f i_1 + h_o(-i_2 R_L)$$

$$i_2 + h_o i_2 R_L = h_f i_1$$

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{h_f}{1 + h_o R_L} \quad \text{But we have,} \quad \mathrm{A}_i = \frac{-i_2}{i_1}$$

$$\therefore \mathrm{A}_i = \frac{-h_f}{1 + h_o R_L}$$

من العلاقة الأخيرة نلاحظ ان اقصى قيمة لكسب التيار هي ($-h_f$) عند قصر طرفي الإخراج ($R_L=0$).

ثانياً: اشتقاق ممانعة الإدخال للمضخم (Z_i (Input Impedance

من الشكل (٦-٦) نجد ممانعة الإدخال للمضخم تعطى بالصيغة: $Z_i = \frac{v_1}{i_1}$

بالتعويض عن قيمة v_1 من المعادلة (6-1) نحصل على: $Z_i = \frac{h_i i_1 + h_r v_2}{i_1}$

$$Z_i = h_i + h_r \frac{v_2}{i_1} \qquad \text{But we have } v_2 = -i_2 R_L$$

$$Z_i = h_i + h_r (\frac{-i_2 R_L}{i_1}) \quad , \qquad \mathrm{A}_i = \frac{-i_2}{i_1}$$

$$\therefore Z_i = h_i + h_r \mathrm{A}_i R_L \quad , \text{ But we have } \quad \mathrm{A}_i = \frac{-h_f}{1 + h_o R_L}$$

$$Z_i = h_i - \frac{h_f h_r R_L}{1 + h_o R_L}$$

ثالثاً: اشتقاق كسب الفولتية (A_v (Voltage Gain

من تعريف كسب الفولتية لدينا: $\mathrm{A}_v = \frac{v_2}{v_1}$

But we have $v_2 = -i_2 R_L$, and $\mathrm{A}_i = \frac{-i_2}{i_1} \Rightarrow -i_2 = i_1 \mathrm{A}_i$

$$v_2 = i_1 A_i R_L$$

$$\mathrm{A}_v = \frac{i_1 A_i R_L}{v_1} \quad , \quad \text{but we have, } Z_i = \frac{v_1}{i_1}$$

$$\mathrm{A}_v = \mathrm{A}_i \frac{R_L}{Z_i}$$

رابعاً: اشتقاق مواصلة الإخراج (Y_o (Output Admittance

تعرف مواصلة الإخراج (مقلوب الممانعة الإخراج) بالصيغة:

$$\mathrm{Y}_o = \frac{i_2}{v_2} \quad \text{at} \quad v_s = 0$$

من المعادلة (6-2) لدينا:

$$i_2 = h_f i_1 + h_o v_2$$

$$\frac{i_2}{v_2} = \frac{h_f i_1 + h_o v_2}{v_2} = h_f \frac{i_1}{v_2} + h_o$$

ولإيجاد ($\frac{i_1}{v_2}$)، نقوم بتطبيق قانون كيرشوف الخاص بالجهد على دائرة الإدخال عند (v_s=0) فنحصل على:

$$i_1 R_s + i_1 h_i + h_r v_2 = 0$$

$$(R_s + h_i) i_1 = -h_r v_2 \quad \Rightarrow \frac{i_1}{v_2} = \frac{-h_r}{R_s + h_i}$$

بالتعويض في معادلة المواصلة نحصل على: $$Y_o = h_o - \frac{h_f h_r}{R_s + h_i}$$

ولإيجاد ممانعة الإخراج (Z_o) يمكننا استعمال العلاقة: $$Z_o = \frac{1}{Y_o}$$

خامساً: اشتقاق كسب القدرة A_P (Power Gain)

يعرف كسب القدرة بالصيغة: $$A_P = A_v \times A_i$$

سبق ان وجدنا ان ($A_v = A_i \frac{R_L}{Z_i}$) وبالتعويض نحصل على: $$A_P = \frac{A_i^{\,2}}{Z_i} R_L$$

الجدول (٦-٢) يعطي القيم النموذجية للمعاملات الهجينة للترانزستور الباعث المشترك ، الجامع المشترك والقاعدة المشترك.

جدول ٦-٢: القيم النموذجية للمعاملات الهجينة لطرق الربط الثلاث

Parameter	*CE*	*CC*	*CB*
h_i	$1\ k\Omega$	$1\ k\Omega$	$20\ k\Omega$
h_r	2.5×10^{-4}	≈ 1	3.0×10^{-4}
h_f	50	-50	-0.98
h_o	$25\ \mu A/V$	$25\ \mu A/V$	$0.5\ \mu A/V$
$1/h_o$	$40k\Omega$	$40k\Omega$	$2M\Omega$

واجب: بالاعتماد على الجدول (٦-٢) أوجد القيم النموذجية لكل من (A_i , Z_i , A_v , Y_o , A_p) لكل طريقة من طرق الربط الثلاث و دون النتائج في جدول، ثم قارن بين النتائج التي حصلت عليها. افرض ان (R_s=1kΩ) و (R_L=1kΩ).

مثال (٦-٢): مضخم باعث مشترك له ($h_{ie}=1000\Omega$, $h_{re}=10^{-4}$, $h_{fe}=100$, $h_{oe}=12X10^{-6}S$, $R_L=2k\Omega$, $R_s=1k\Omega$)، أوجد: كسب التيار، ممانعة الإدخال، كسب الفولتية، ممانعة الإخراج، كسب القدرة؟

الحل:

كسب التيار لمضخم الباعث المشترك يعطى بدلالة المعاملات الهجينة بالصيغة: $A_i = \frac{-h_{fe}}{1+h_{oe}R_L}$

$$A_i = \frac{-100}{1+12\times10^{-6}\times2\times10^{3}} \quad \Rightarrow \quad A_i = -97.656$$

ممانعة الإدخال لمضخم الباعث المشترك يعطى بالصيغة: $Z_i = h_{ie} + h_{re}A_iR_L$

$$Z_i = 1000+10^{-4}\times(-97.56)\times2\times10^{3} \quad \Rightarrow \quad Z_i = 980.47\Omega$$

كسب الفولتية لمضخم الباعث المشترك يعطى بالصيغة: $A_v = A_i\frac{R_L}{Z_i}$

$$A_v = (-97.56)\frac{2\times10^{3}}{980.47} \quad \Rightarrow \quad A_v = -199.2$$

لإيجاد **ممانعة الإخراج** نجد أولا مواصلة الإخراج والذي يعطى بالصيغة: $Y_o = h_{oe} - \frac{h_{fe}h_{re}}{R_s+h_{ie}}$

$$Y_o = 12\times10^{-6} - \frac{100\times10^{-4}}{1\times10^{3}+1\times10^{3}} \quad \Rightarrow Y_o = 7\times10^{-6}S$$

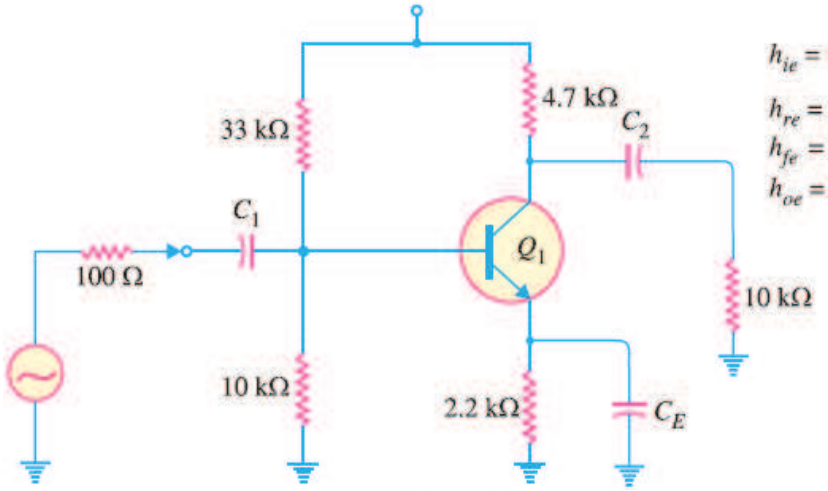
$$Z_o = \frac{1}{Y_o} = \frac{1}{7\times10^{-6}} \quad \Rightarrow \quad Z_o = 142.85\times10^{3}\Omega$$

كسب القدرة يعطى بالصيغة: $A_P = A_v\times A_i$

$$A_P = (-199.2)\times(-97.656) \quad \Rightarrow \quad A_p = 19453$$

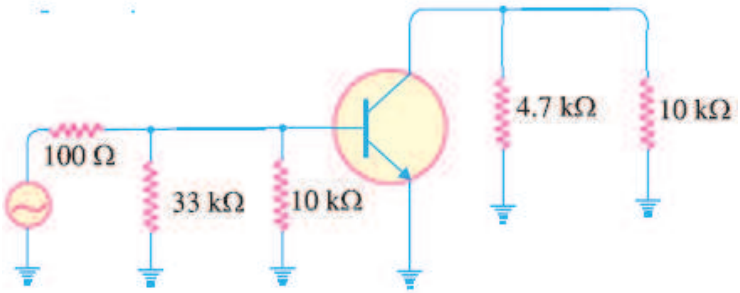
مثال (٦-٣):

في الشكل المجاور مضخم باعث مشترك، أوجد: كسب التيار، ممانعة الإدخال، كسب الفولتية، وكسب القدرة.



الحل:

قبل تطبيق العلاقة الخاصة بكسب التيار علينا أولا ان نجد المقاومة المكافئة للحمل المتناوب والتي نحصل عليها بعد إيجاد الدائرة المكافئة المتناوبة الموضحة بالشكل المجاور، ومنها نجد:



$$R_L = \frac{(4.7\times10^3)\times(10\times10^3)}{(4.7\times10^3)+(10\times10^3)} \quad \Rightarrow \quad R_L = 3197.3\Omega$$

وبعدها نستطيع تطبيق العلاقة:

$$A_i = \frac{-h_{fe}}{1+h_{oe}R_L}$$

$$A_i = \frac{-50}{1+25\times10^{-6}\times3197.3} \quad \Rightarrow \quad A_i = -46.3$$

لإيجاد ممانعة الإدخال نطبق العلاقة:

$$Z_i = h_{ie} + h_{re}A_iR_L$$

$$Z_i = 1\times10^3 + 2.5\times10^{-4}\times(-46.3)\times3197.3 \quad \Rightarrow \quad Z_i = 963\Omega$$

لإيجاد كسب الفولتية نطبق العلاقة:

$$A_v = A_i\frac{R_L}{Z_i}$$

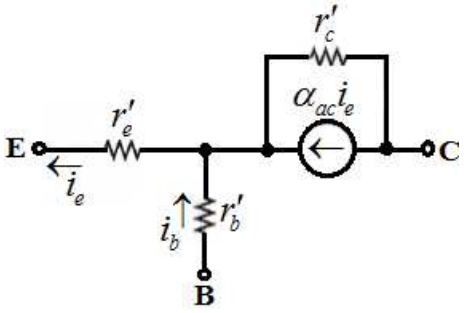
$$A_v = (-46.3)\times(\frac{3197.3}{963}) \quad \Rightarrow \quad A_v = -153.72$$

لإيجاد كسب القدرة نطبق العلاقة:

$$A_P = A_v \times A_i$$

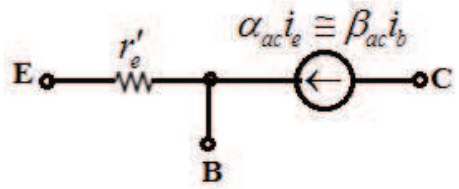
$$A_P = (-153.72)\times(-46.3) \quad \Rightarrow \quad A_p = 7117.2$$

٨.٦ الدائرة المكافئة المتناوبة للمضخم باستعمال المعاملات r′



بالإضافة للمعاملات الهجينة هناك طريقة ثانية لإيجاد الدائرة المكافئة المتناوبة لترانزستور BJT، حيث يعبر عن الترانزستور بثلاث مقاومات ومصدر تيار كما هو موضح بالشكل المجاور. حيث تمثل كل من (r_e', r_b', r_c') المقاومة المكافئة لمناطق الترانزستور الثلاث (الباعث، القاعدة، الجامع) حسب الترتيب.

عادة ما تكون r_e' صغيرة القيمة بحيث يمكن اعتبارها توصيل، بينما تكون r_c' كبيرة القيمة (مئات الكيلو اوم) بحيث يمكن اعتبارها دائرة مفتوحة، وبالتالي يمكن اختزال الدائرة كما هو موضح بالشكل التالي.



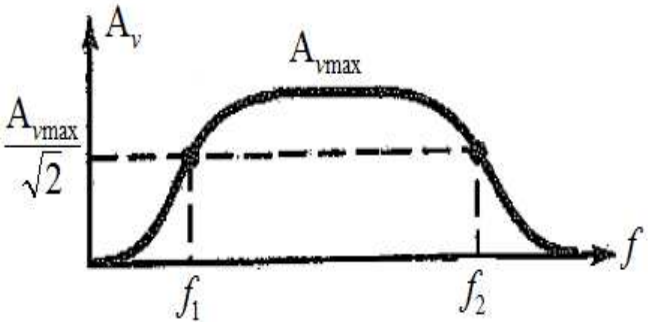
اما المعاملين α_{ac} و β_{ac} فيعرفان بالصيغة:

$$\alpha_{ac} = \frac{i_c}{i_e} \quad , \quad \beta_{ac} = \frac{i_c}{i_b}$$

ان تحليل دوائر الترانزستور باستعمال معاملات r يكون اسهل نسبياً من تحليلها باستعمال المعاملات الهجينة، غير ان حساب قيم معاملات r عملياً اصعب من قياس المعاملات الهجينة، وقد يلجأ البعض إلى إيجاد قيم معاملات r بدلالة المعاملات الهجينة (سهلة القياس) ومن ثم تحليل الدائرة باعتماد معاملات r وفيما يلي العلاقات التي تربط بين معاملات r والمعاملات الهجينة:

$$\alpha_{ac} = h_{fb} \quad , \quad \beta_{ac} = h_{fe} \, , \quad r'_e = \frac{h_{re}}{h_{oe}} \quad , \quad r'_c = \frac{h_{re}+1}{h_{oe}} \quad , \quad r'_b = h_{ie} - \frac{h_{re}}{h_{oe}}(1+h_{fe})$$

٩.٦ الاستجابة الترددية للمضخم Frequency Response of an Amplifier

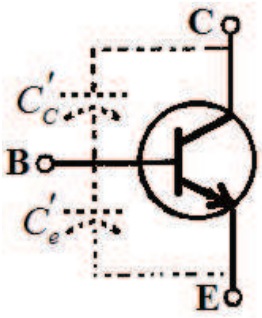


شكل ٦–٧: الاستجابة الترددية للمضخم

يقصد بالاستجابة الترددية منحنى العلاقة بين كسب الفولتية لمضخم ما وتردد إشارة الإدخال، الشكل (٦–٧) يوضح تغير كسب المضخم مع التردد، حيث يلاحظ ان الكسب يزداد تدريجياً مع زيادة التردد إلى ان يصل إلى قيمة عظمى A_{vmax}، وبعدها ينخفض الكسب تدريجياً.

ان الانخفاض في الكسب عند الترددات الواطئة يعود إلى الممانعة العالية التي تبديها متسعات الاقران (C_{in}, C_C) للإشارة الداخلة والخارجة من المضخم، بالإضافة إلى ان تأثير متسعة الامرار (C_E) يكون قليلاً

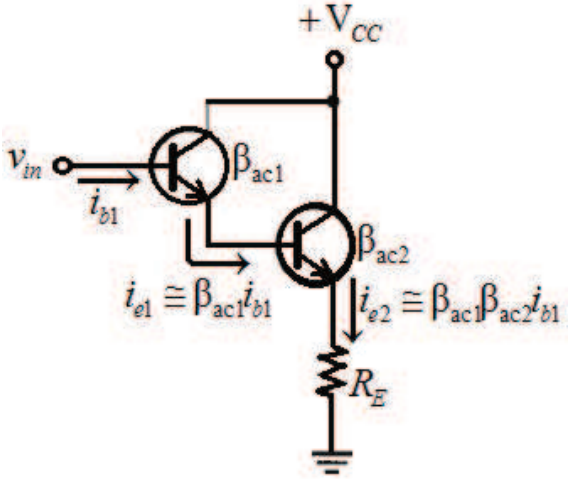
في الترددات الواطئة (تأريضها للمقاومة R_E يكون قليلاً) مما يؤدي إلى التقليل من كسب المضخم، ان تلك التأثيرات السلبية تتناقص مع الزيادة في التردد مما تؤدي إلى زيادة تدريجية في الكسب مع زيادة التردد.



اما عند الترددات العالية فان السبب في النقصان التدريجي في الكسب يعود إلى تأثير ما يعرف بالمتسعات الشاردة التي تنشأ بين اطراف الترانزستور في الترددات العالية، الشكل المجاور يوضح تلك المتسعات، حيث تعمل متسعة وصلة (الجامع–القاعدة) على إرجاع جزء من إشارة الإخراج إلى مدخل المضخم مما تولد تغذية خلفية سالبة تؤدي إلى التقليل من الكسب، بالإضافة لمتسعة وصلة (القاعدة–الباعث) التي تقصر مدخل المضخم مما يؤدي إلى التقليل من الكسب. وتزداد تأثير المتسعات الشاردة مع زيادة التردد مما يؤدي إلى النقصان التدريجي في الكسب مع زيادة التردد في الترددات العالية.

يسمى f_1 بتردد القطع الأدنى (lower cut-off frequency)، والتردد f_2 بتردد القطع الأعلى (upper cut-off frequency) وهما الترددان التي يكون عندها كسب المضخم يساوي ($A_v=0.707A_{vmax}$)، ويعرف عرض النطاق (Band-Width) بالعلاقة: $BW = f_2 - f_1$

١٠.٦ زوج دارلنكتون Darlington Pair



هو عبارة عن ترانزستورين BJT مربوطين بحيث يكون طرف الباعث للأول مرتبط بطرف قاعدة الثاني ويكون طرفا الجامع للترانزستورين متصلين وكما هو موضح بالشكل المجاور. بهذا الترتيب نحصل على نبيطة ثلاثية الأطراف تقوم مقام ترانزستور منفرد ذو ممانعة إدخال عالية وذات كسب تيار عالي يساوي حاصل ضرب معاملي كسب الترانزستورين المكونان لها أي ان: $\beta_{ac} = \beta_{ac1} \times \beta_{ac2}$

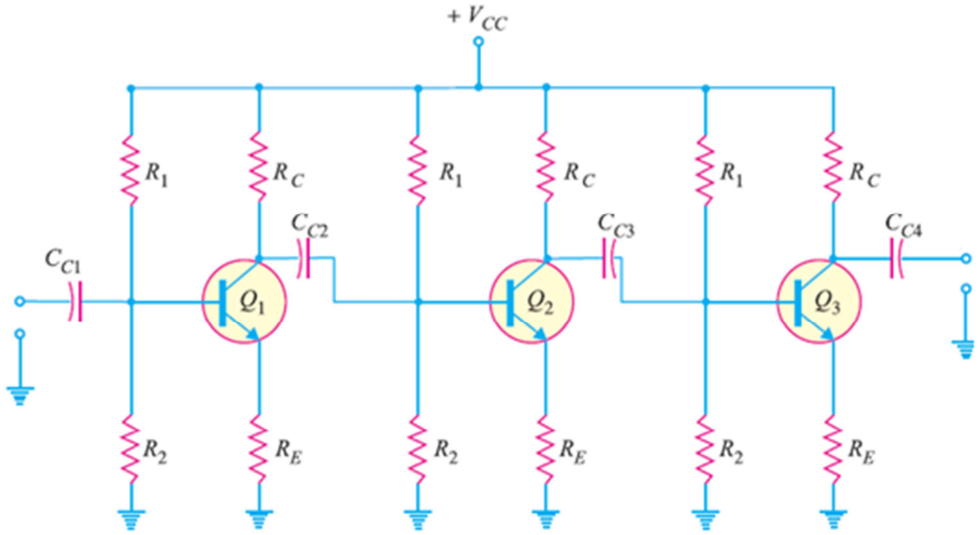
عادة ما يتم وضع الترانزستورين المكونين لزوج دارلنكتون داخل غلاف ترانزستور واحد، حيث يمكن اعتباره ترانزستور واحد ذو معامل كسب عالي، فمثلاً الترانزستور 2N6725 هو ترانزستور دارلنكتون له كسب تيار (β=25000) عند تيار (200mA)، وكذلك ترانزستور القدرة TIP102 الذي له كسب تيار (β=1000) عند تيار (3A).

١١.٦ مضخمات متعدد المراحل (Multistage Amplifiers)

في معظم الأجهزة الإلكترونية لا يكفي استعمال مضخم ترانزستور واحد للحصول على التضخيم المطلوب لعملها، ولغرض زيادة الكسب في دوائر التضخيم تستعمل اكثر من مرحلة تضخيم واحدة بحيث تصبح إشارة الإخراج من المرحلة الأولى إشارة إدخال للمرحلة التي تليها ويدعى هذا النوع من دوائر بالمضخمات متعددة المراحل. وهناك ثلاث طرق أساسية لربط (اقران) مراحل التضخيم وهي كالتالي:

أولاً: اقران مقاومة–متسعة (RC Coupling)

الشكل (٦–٨) يمثل مضخم ذو ثلاث مراحل يستعمل اقران مقاومة–متسعة، والذي يعتبر من اكثر طرق الاقران استعمالاً وذلك لرخص ثمنه واستقراريه عمله (ثبوت الكسب) في مدى واسع من الترددات وبالأخص الترددات المسموعة (20-20kHz). في هذه الطريقة يتم ربط (اقران) مجمع المرحلة الأولى إلى قاعدة المرحلة الثانية بواسطة متسعة اقران (C_C) والتي تكوّن مع مقاومة إدخال المرحلة الثانية .



شكل ٦–٨: دائرة مضخم ذي ثلاث مراحل باقران RC

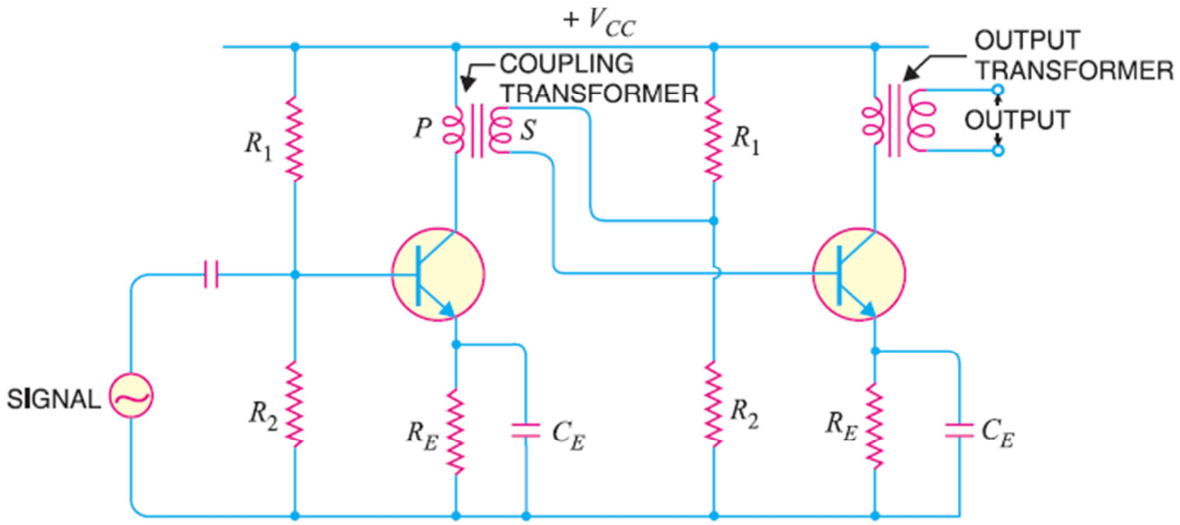
ان الكسب الكلي للمضخم متعدد المراحل يساوي حاصل ضرب كسب المراحل المكونة له، اما فرق الطور بين الإشارة الداخلة لأول مرحلة والإشارة الخارجة من المرحلة الأخيرة فتساوي مجموع فروق الطور لمراحل المضخم ، أي ان:

$$G = G_1 \times G_2 \times G_3 \times .....$$
$$\theta = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 + ...$$

اما سلبيات هذا الربط فهو كون الكسب الإجمالي قليل نوعاً ما وذلك بسبب تأثير المراحل على بعضها وبخاصة عند عدم التوافق في الممانعات.

ثانياً: اقران المحولة (Transformer Coupling)

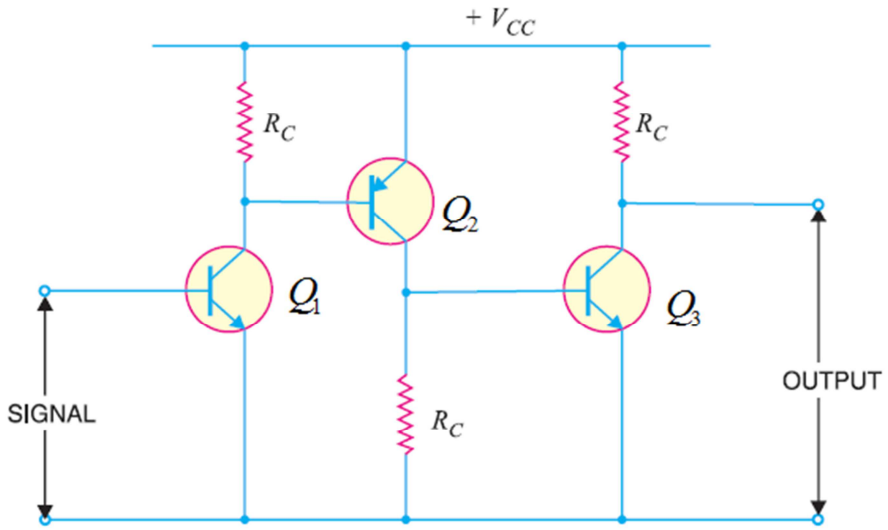
الشكل (٦-٩) يوضح اقران المحولة، يمتاز هذا النوع من الربط بإمكانية الموالفة الجيدة بين المراحل مما يتيح الحصول على قدرة إخراج عالية، اما سلبياتها فتتمثل بغلاء الثمن (بالمقارنة مع المتسعات) بالإضافة لكبر الحجم والوزن وخاصة في التطبيقات المتعلقة بالترددات السمعية.



شكل ٦-٩: دائرة مضخم ذي مرحلتين باقران المحولة

ثالثاً: اقران مباشر (Direct Coupling)

في هذا النوع من الاقران يتم توصيل المراحل مع بعضها بصورة مباشرة وكما موضح بالشكل التالي، ويستعمل هذا الربط في الترددات الواطئة (الأقل من 10Hz تقريباً) حيث يتعذر استعمال اقران متسعة-مقاومة وذلك لكون ممانعات متسعات الاقران عالية جداً في الترددات الواطئة، اما مساوئ هذا النوع فتتمثل بعدم الاستقرارية الناشئ من تأثير المرحلة الأولى على نقطة عمل المرحلة التي تليها.



أسئلة الفصل السادس

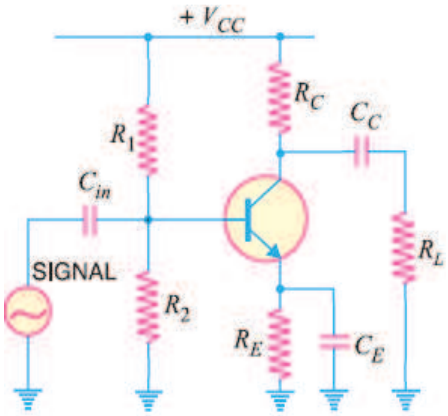
س١: ارسم دائرة مضخم الباعث المشترك بانحياز مقسم الجهد، ثم اذكر وظيفة كل عنصر من عناصرها.

س٢: اشرح باختصار كيف يمكنك رسم الدائرة المكافئة المتناوبة لمضخم ما ومن ثم رسم خط الحمل المتناوب له.

س٣: قارن بين المضخمات الباعث المشترك، القاعدة المشترك، والجامع المشترك.

س٤: في الشكل المجاور، ارسم خط الحمل المستمر وخط الحمل المتناوب علماً بان:

$V_{CC}=15V$, $R_C=1k\Omega$, $R_E=2k\Omega$, $R_1=10k\Omega$, $R_2=5k\Omega$, $R_L=1k\Omega$, $V_{BE}=0.7V$, $\beta=75$

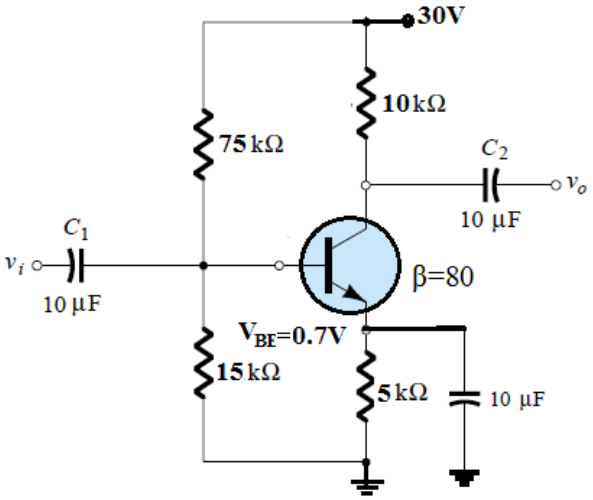


س٥:

في الشكل المجاور:

أ- ارسم الدائرة المكافئة في ظروف العمل المستمرة، ثم ارسم خط الحمل المستمر.

ب-ارسم الدائرة المكافئة في ظروف العمل المتناوبة ثم ارسم خط الحمل المتناوب.

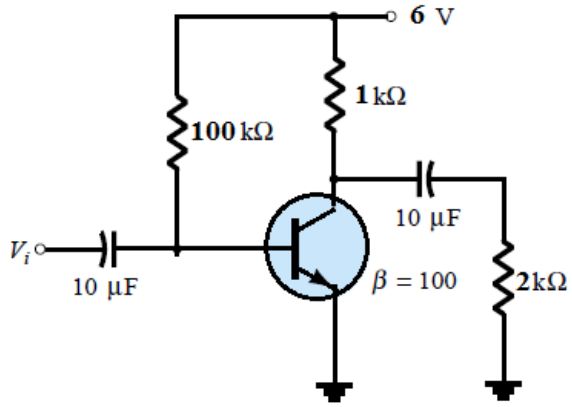


س٦:

في الشكل المجاور:

أ- ارسم خط الحمل المستمر.

ب- ارسم خط الحمل المتناوب.

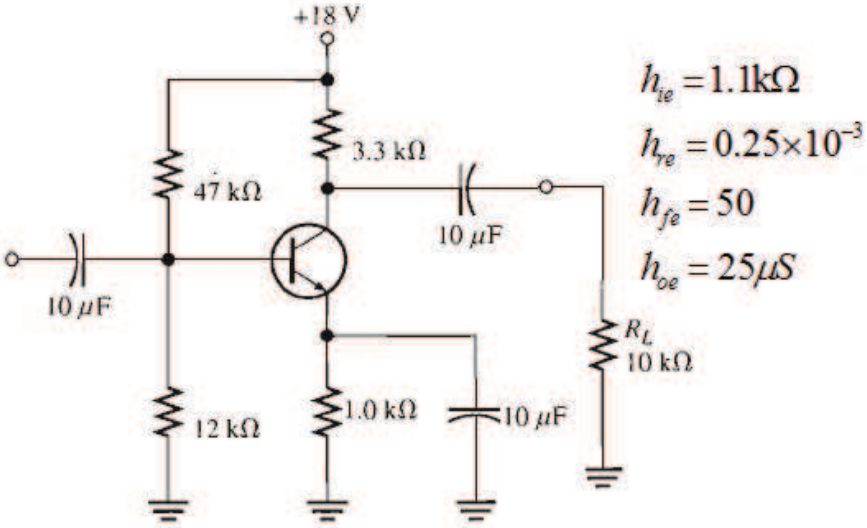


س٧: مضخم باعث مشترك له ($h_{ie}=1500\Omega$, $h_{re}=10^{-4}$, $h_{fe}=60$, $h_{oe}=12.5X10^{-6}S$, $R_L=5k\Omega$, $R_s=1k\Omega$)، أوجد: كسب التيار، ممانعة الإدخال، كسب الفولتية، ممانعة الإخراج، كسب القدرة؟

س٨:

في الشكل المجاور، أوجد:

A_i , Z_i , A_v, A_p



س٩:

في الشكل التالي أوجد: كسب التيار، ممانعة الإدخال، كسب الفولتية، كسب القدرة.