مكبرات الترانزستور

دارات الكترونية /١/

مكبرات الترانزستورات (BJT) - ... Transistors Ampli

مدرس المقرر
د. السموءل صالح

جَـامعة
المَـنارة
MANARA UNIVERSITY

Course Contents

مفردات المقرر

Transistor Amplifier (BJT)

- مقدمة + الدارة المكافئة المتناوبة للإشارة الصغيرة
- مكبرات الإشارة الصغيرة
  - مكبر الباعث المشترك، مكبر المجمع المشترك
  - مكبر القاعدة المشتركة
- مكبرات الاستطاعة
  - مكبرالاستطاعة صنف (A)، مكبر الاستطاعة صنف (B)
  - مكبرالاستطاعة صنف (C). مكبر دارلينغتون
  - المكبرالتفاضلي

+ FeedBack and Amplifiers.

++ Feedback Concepts.

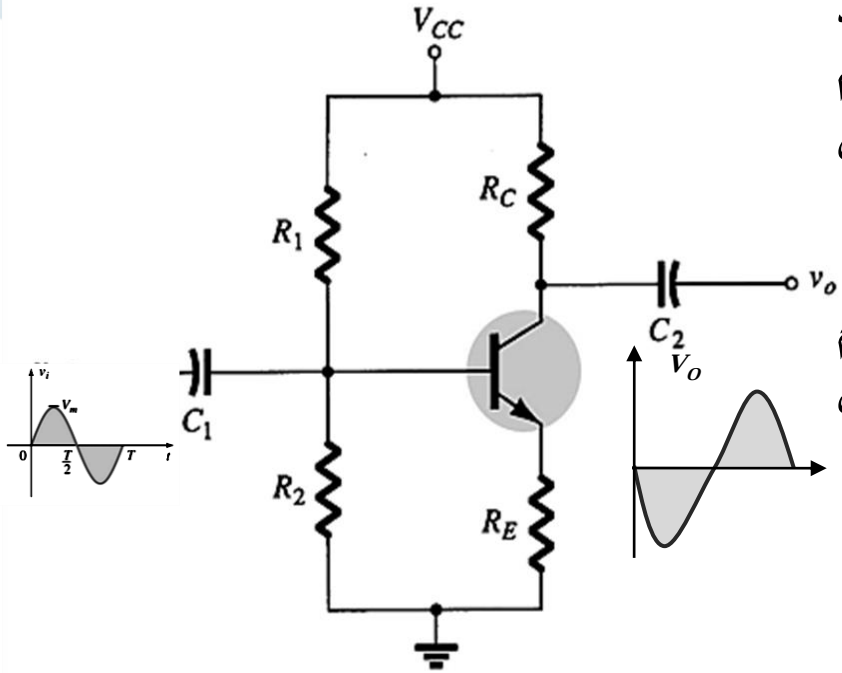
++ Feedback Connection Types.

مقدمة

- يعتبر الترانزستور من أهم القطع الالكترونية حيث أنه يستخدم في تركيب معظم الدارات المتقدمة والتي منها دارات المكبرات
- يمكن تقسيم دارات التكبير إلى نوعين وذلك حسب سعة الإشارة هما:
  ١. مكبرات الإشارة الصغيرة (small signal amplifiers)
  ٢. مكبرات الاستطاعة (Power amplifiers)
- الترانزستورات المستخدمة في النوع الأول تسمى بترانزستورات الإشارة الصغيرة والتي تمتلك تبديد في الاستطاعة أقل من نصف واط في حين تسمى الترانزستورات المستخدمة في مكبرات الاستطاعة بترانزستورات الاستطاعة والتي تمتلك تبديد أكثر من واحد واط (تملك مبردات من الالمنيوم).
- تستخدم مكبرات الإشارة الصغيرة عادة في المراحل الأولى للمستقبلات وفي أجهزة القياس.

عمل الترانزستور كمضخم

التضخيم: هو عملية رفع مستوى إشارة الدخل (جهد أو تيار أو الاثنين معا) إلى مستوى أعلى، وتعتبر وصلة الباعث المشترك الوصلة الأكثر استخداماً في عملية التضخيم، وتطبق الإشارة المتناوبة المراد تضخيمها على متصل باعث– قاعدة ويؤخذ الخرج على متصل مجمع–باعث الذي يمثل دارة مضخم لإشارة ذات مطال V_m volt ، ونحصل في الخرج على الإشارة نفسها ولكنها مكبرة بمقدار معين عائد إلى معامل تضخيم الدارة.



دور المكثفات: حجز المركبة المستمرة من أجل عدم التأثير على تحييز الترانزستور وبالنتيجة عدم التأثير على منطقة عمله، كما أن مكثف الخرج يمنع وصول المركبة المستمرة إلى إشارة الخرج من أجل الحصول على الإشارة المتناوبة مضخمة من دون رفع مستوى القيمة المستمرة لها.

النقاط الواجب إتباعها حتى يعمل الترانزستور كمضخم:

أولاً: نقطة العمل، وذلك برسم الدارة المكافئة المستمرة، نفتح المكثفات بعد قصر منبع الجهد المتناوب ونحسب إحداثيات نقطة العمل للدارة $Q(I_{CQ}, V_{CEQ})$ ونختار I_{BQ} بحيث تقع نقطة العمل في منتصف المنطقة الفعالة. دارة التضخيم هذه، هي دارة تحييز عن طريق مقسم كمون على القاعدة، نطبق ثفنين من أجل حلّ الدارة، كما رأينا سابقاً.

النقاط الواجب إتباعها حتى يعمل الترانزستور كمضخم:

ثانياً: نرسم خط الحمولة الساكن بعد تحديد كل من تياروجهد الإشباع، وتياروجهد القطع أيضاً.

ثالثاً: نطبق الإشارة المتناوبة على قاعدة الترانزستور، فنجد أن تيار القاعدة يتغير حول قيمته الساكنة I_{BQ} وهذا التغير سوف ينقل إلى تغير في تيار المجمع $I_{CQ} = \beta I_{BQ}$ مضخماً بمقدار β وهذا بدوره يسبب هبوطاً متغيراً على مقاومة الحمل (الخرج) ويكون كبيراً بالنسبة لإشارة الدخل المتناوبة.

رابعاً: تتأرجح إشارة الخرج المتناوبة على مستقيم الحمولة المتناوب *Ac. Load line* لذلك نرسم الدارة المكافئة المتناوبة ونرسم هذا المستقيم. نلاحظ في مثالنا أن رسم الدارة المكافئة المتناوبة هو نفسه رسم الدارة المكافئة المستمرة، لأن قصر المكثفات في الدارة المتناوبة لا يؤدي إلى قصر أية مقاومة من الدارة. كذلك نفتح منابع الجهد المتناوب ونقصر منابع الجهد المستمر، وهذا يعني أن مستقيم الحمولة المتناوب ينطبق تماماً على مستقيم الحمولة الساكن، إذاً يكون لدينا نقطة العمل نفسها في الحالتين، ويتم تأرجح الإشارة على مستقيم الحمولة المتناوب المنطبق على خط الحمولة الساكن.

AC- Load Line Analysis

خط الحمل الديناميكي

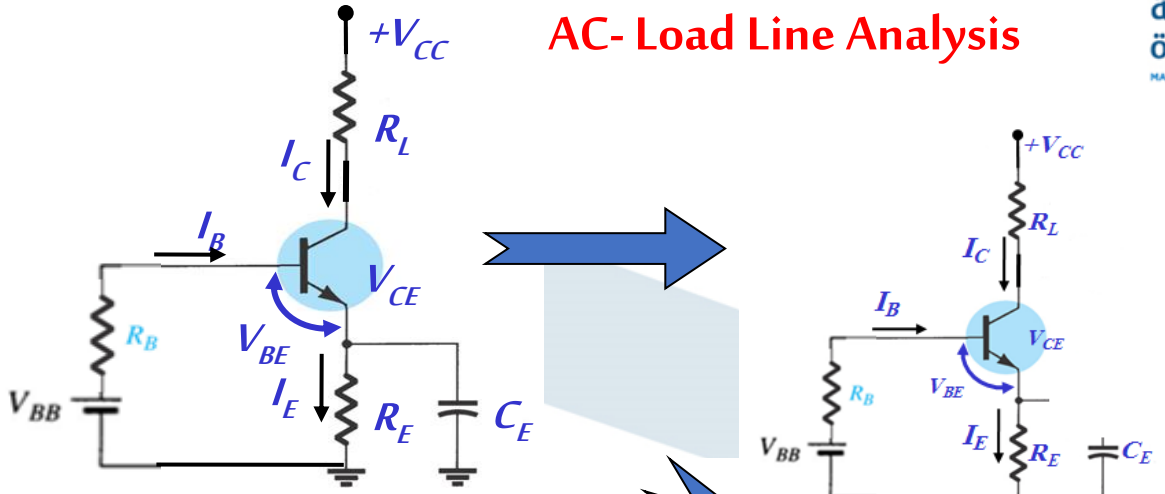
الدارة المكافئة للتيار المستمر (نفتح المكثفات) من اجل رسم خط الحمل الساكن.

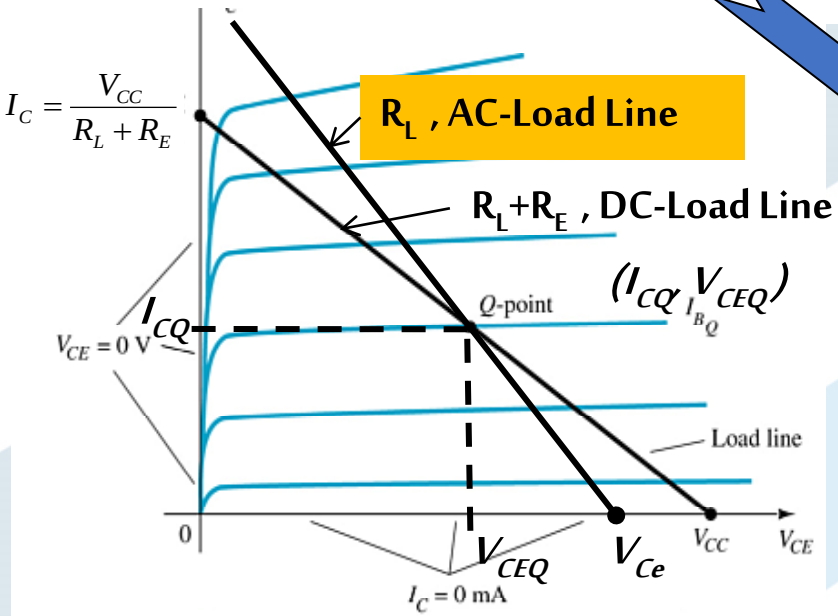
-يرسم الخط بنفس الطريقة السابقة بعد كتابة معادلة الخرج التالية.

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

$$I_{CSat} = \frac{V_{CC}}{R_L + R_E} , V_{CE} = V_{CC}$$

ميل هذا الخط هو التالي: $\frac{1}{R_L + R_E}$





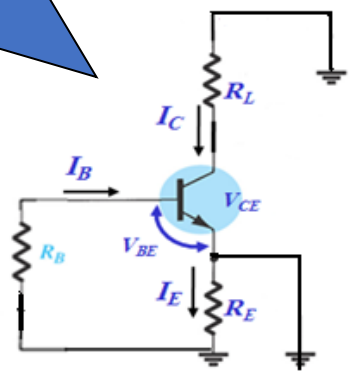
الدارة المكافئة للتيار المتناوب (نقصر المكثفات ومنابع الجهد المستمر؟؟) من اجل رسم خط الحمل الديناميكي. يرسم الخط بنفس الطريقة السابقة بعد كتابة معادلة الخرج المتناوبة: $V_{Cei} = i_{ci}R_L$

(التيار الكلي) i_C = (المتناوب) i_{ci} + (المستمر) I_{CQ}

(الجهد الكلي) V_{Ce} = (المتناوب) V_{cei} + (المستمر) V_{CEQ}

$$V_{Ce} - V_{CEQ} = (i_c - I_{CQ})R_L$$

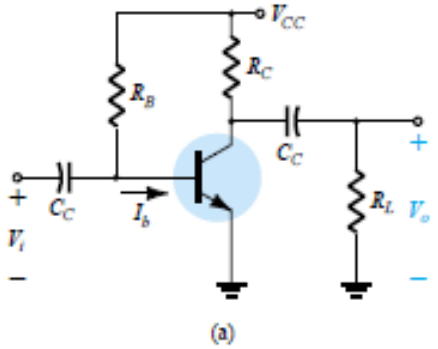
$$V_{Ce} - V_{CEQ} = i_c R_L - I_{CQ} R_L$$

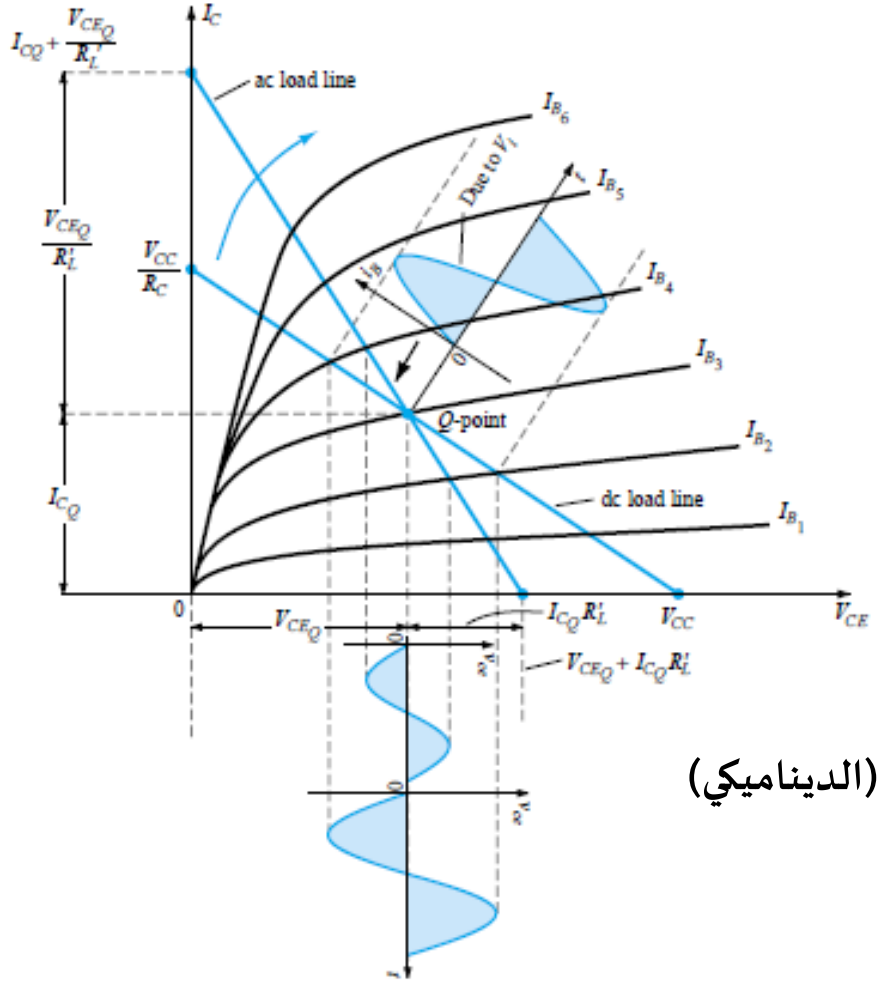


الميل يعطى بـ: $1/R_L$ خط الحمل الساكن لا ينطبق على الديناميكي بسبب المكثف إنما يمر بنفس نقطة العمل Q وبعدم وجود المكثف فان الخطين يصبحان طبوقين.

AC- Load Line Analysis

خط الحمل الديناميكي





الفارق بين خط الحمل الساكن والمتناوب (الديناميكي)

في هذا التقريب:

١- تمثل الدارة بنظام ثنائي المنافذ.

٢- يقدم في الخرج (منفذ الخرج) دارة ثفنين.

٣- يجعل من السهل تحديد اثر تغير الحمل على الدارة كذلك اثر تغيير المنبع V_S مع مقاومته R_S.

With $V_i \longrightarrow 0$ V:

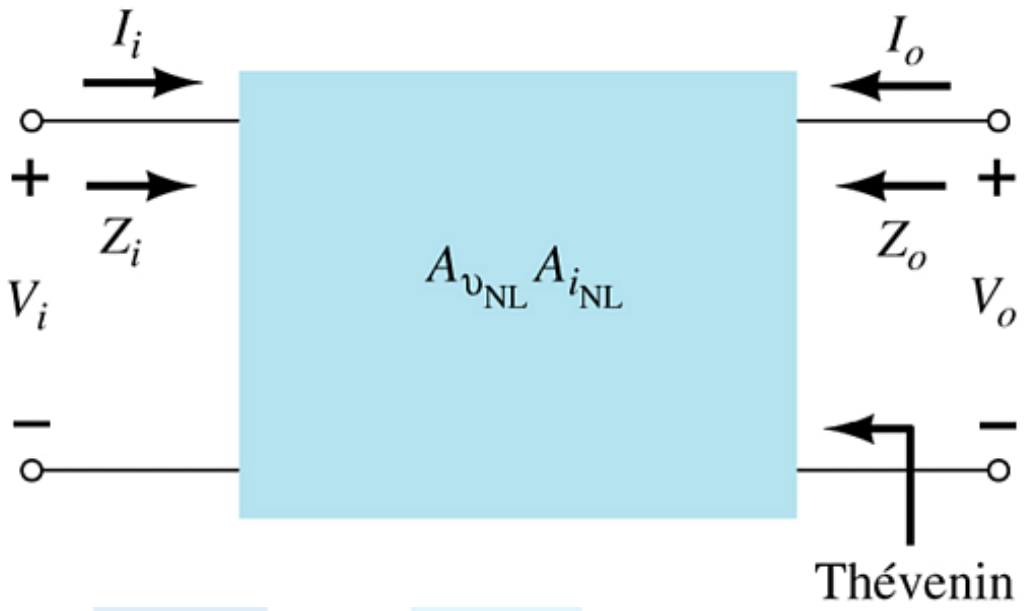
$$Z_{Th} = Z_o = R_o$$

الجهد عبر منفذ خرج مفتوح يعطى بـ:

$$E_{Th} = A_{vNL} V_i$$

where A_{vNL} is the no-load voltage gain.

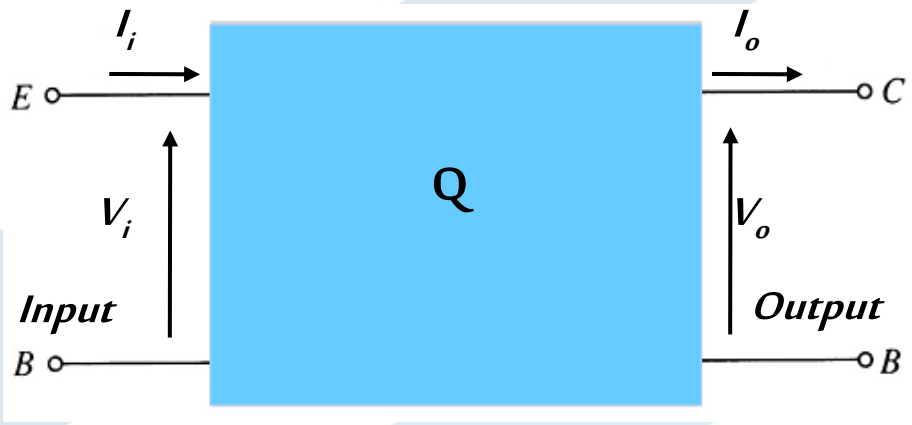
(يمثل ربح الجهد بدون حمل)



تحليل عمل الترانزستوربالنسبة للإشارة المتناوبة
نمذجة الترانزستورثنائي القطبية BJT Transistor Modeling

النموذج:

- عبارة عن دارة مكافئة تمثل الخصائص المتناوبة للترانزستورأي تمثل استجابة الترانزستور للإشارة المتناوبة.
- النموذج يستخدم عناصرالدارة المكافئة بحيث يقترب من سلوك الترانزستور.
- على اعتبارأن الترانزستوريسلك سلوك رباعي الأقطاب، هناك عدة دارات مكافئة له لتحليل سلوكه تجاه الإشارة المتناوبة و هي:



١- نموذج منبع التيارمع الديود The r_e Transistor Model

٢- النموذج المكافئ Z The Z Transistor Model

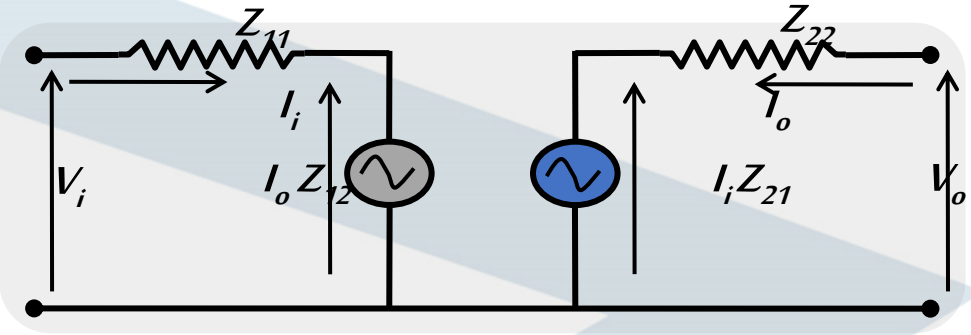
٣- النموذج المكافئ Y The Y Transistor Model

٤- النموذج المكافئ الهجين H The H Transistor Model

BJT Transistor Modeling

نمذجة الترانزستور ثنائي القطبية

The Z Transistor Model النموذج المكافئ Z



يتم استخدام دارتي ثفنين (منبع جهد مع ممانعة على التسلسل) في الدخل و الخرج

$$V_i = Z_{11} I_i + Z_{12} I_o$$

$$V_o = Z_{21} I_i + Z_{22} I_o$$

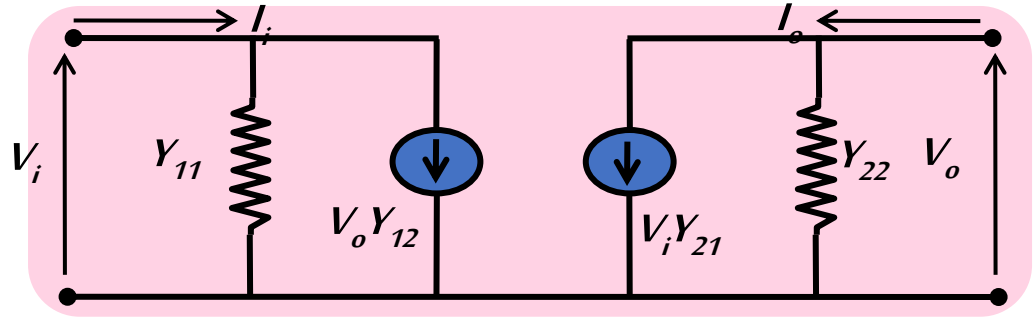
Z_{11} = ممانعة الدخل للتيار المتناوب من اجل خرج مفتوح.

Z_{12} = ممانعة النقل العكسية تأثير تيار الخرج على جهد الدخل.

Z_{21} = ممانعة النقل الأمامية تأثير تيار الدخل على جهد الخرج.

Z_{22} = ممانعة الخرج للتيار المتناوب من اجل دخل مفتوح.

The Y Transistor Model النموذج المكافئ Y



يتم استخدام دارتي نورتون (منبع تيار مع سماحيه على التفرع) في الدخل و الخرج

$$I_i = Y_{11} V_i + Y_{12} V_o$$

$$I_o = Y_{21} V_i + Y_{22} V_o$$

Y_{11} = سماحية الدخل للتيار المتناوب من اجل خرج مقصور.

Y_{12} = سماحية النقل العكسية تأثير جهد الخرج على تيار الدخل.

Y_{21} = سماحية النقل الأمامية تأثير جهد الدخل على تيار الخرج.

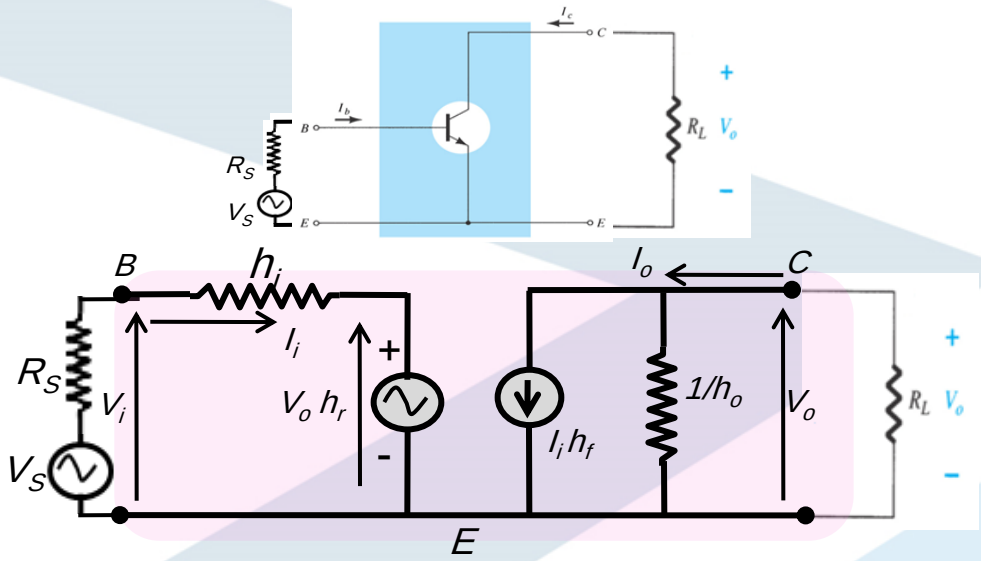
Y_{22} = سماحية الخرج للتيار المتناوب من اجل دخل مقصور.

The H Equivalent Model

النموذج المكافئ الهجين H

في هذا النموذج نأخذ مكافئ ثفينين في الدخل (دارة هبوط جهد تسلسلي مكافئ Z) و نورتون في الخرج (دارة تفرعيه للتيارات مكافئ Y)
وتكون معادلتي النموذج:

$$V_i = h_i I_i + h_r V_o$$
$$I_o = h_f I_i + h_o V_o$$



$h_i = V_i / I_i|_{Vo=0}$ ممانعة الدخل للتيار المتناوب من اجل خرج مقصور.

$h_r = V_i / V_o|_{Ii=0}$ نسبة نقل الجهد العكسي من دخل مفتوح.

$h_r V_o$ منبع جهد يمثل اثر جهد الخرج في دارة الدخل.

$h_f = I_o / I_i|_{Vo=0}$ نسبة تحويل التيار الأمامي من أجل خرج مقصور.

$h_f I_i$ = منبع تيار يمثل اثر تيار الدخل في دارة الخرج.

$h_o = I_o / V_o|_{Ii=0}$ سماحية الخرج من اجل دخل مفتوح.

ربح الجهد A_V: $A_V = \frac{V_o}{V_i}$

ربح الجهد A_{VS}: $A_{VS} = \frac{V_o}{V_S}$

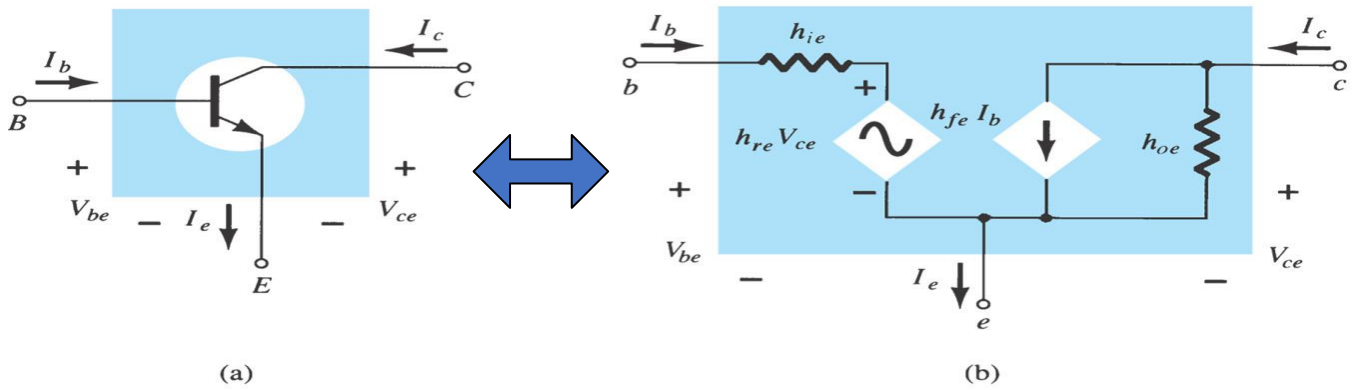
ربح التيار: $A_i = \frac{I_o}{I_i}$

مقاومة الدخل: $R_i = \frac{V_i}{I_i}$ بوجود الحمل R_L

مقاومة الخرج: $R_o = \left.\frac{V_o}{I_o}\right|_{V_S=0, R_L \cong \infty}$

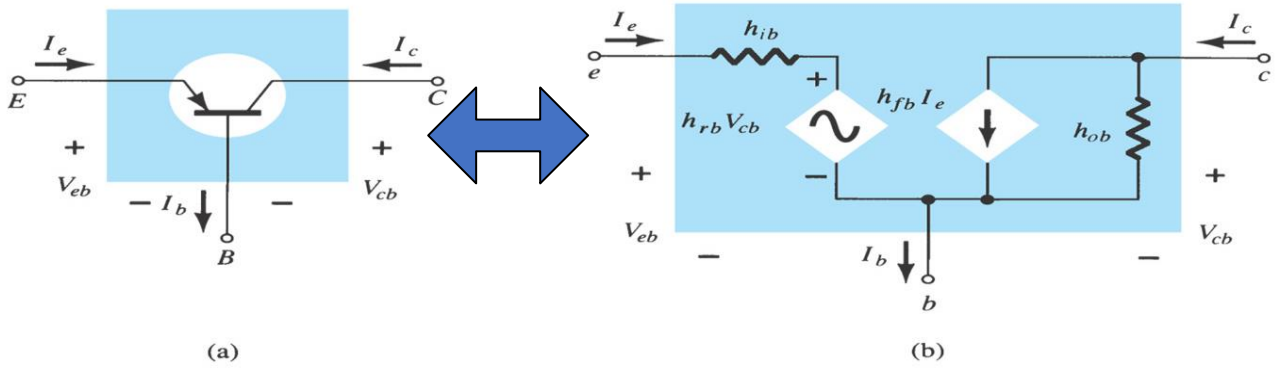
النموذج المكافئ الهجين H لوصلة الباعث المشترك The H Equivalent Model off CE

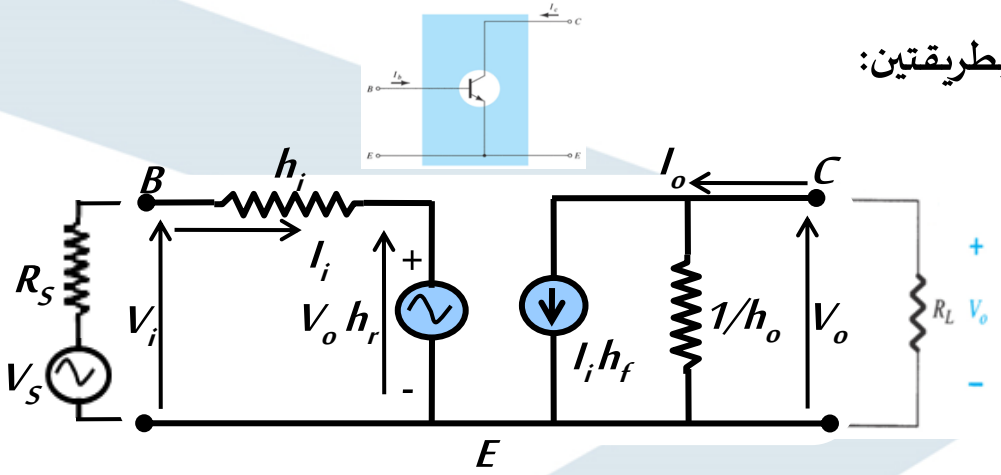
نضع حرف e على المعاملات الهجينة للدلالة على نوع الوصلة



النموذج المكافئ الهجين H لوصلة القاعدة المشترك The H Equivalent Model off CB

نضع حرف b على المعاملات الهجينة للدلالة على نوع الوصلة





إيجاد معاملات النموذج المكافئ الهجين، حل الدارة المكافئة $A_{VS}, R_i, R_o, A_i \& A_V$ يتم ذلك بطريقتين:

١- الطريقة الكلاسيكية المكونة من حلقات تيارات كيرشوف و عقد الجهد.

٢- الطريقة المختصرة التي تتبع الخطوات التالية :

ا- تحديد R_l مقاومة الحمل (على خرج المكبر).

ب- حساب A_i . ج- تحديد R_i ثم حساب Z_i .

د- حساب A_V . هـ- تحديد R_o ثم حساب Z_o .

من اجل الحل لدينا المعادلتين: $V_i = h_i I_i + h_r V_o \quad \& \quad I_o = h_f I_i + h_o V_o$

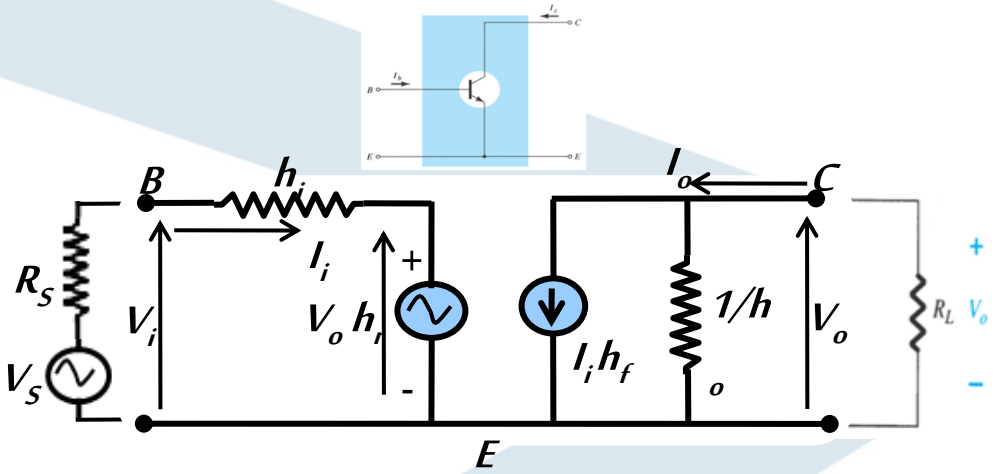
١- مقاومة الحمل تحدد بالنظر من جهة الخرج الى الدارة المكافئة و تساوي $R_l = R_L$.

٢- ربح التيار $A_i = \frac{I_o}{I_i}$ من العلاقة التالية و من دارة اخرج، حسب قانون تقسيم التيارات: $I_o = h_f I_i \frac{1/h_o}{1/h_o + R_L} \Rightarrow A_i = \frac{I_o}{I_i} = \frac{h_f}{1 + h_o R_L}$

هي العلاقة العامة لربح التيارات في التشكيلات الثلاث.

٣- مقاومة الدخل $R_i = Z_i = \frac{V_i}{I_i}$ تحسب من المعادلة الأولى المأخوذة من حلقة الدخل و ذلك بالتقسيم على تيار الدخل:

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{h_i I_i + h_r V_o}{I_i} = h_i + h_r \frac{V_o}{I_i} = h_i + h_r \frac{-I_o R_L}{I_i} = h_i - h_r A_i R_L$$



٤- ربح الجهد A_V :

$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-I_o R_L}{I_i R_i} = -A_i \frac{R_L}{R_i}$$

٥- مقاومة الخرج: تحسب R_o بعد قصر منبع الإشارة الصغيرة $V_S=0$ وفتح الحمل $R_L=\infty$:

$$g_o = 1/R_o = \frac{I_o}{V_o} = \frac{h_f I_i + h_o V_o}{V_o} = h_o + h_f \frac{I_i}{V_o}$$

من دارة الدخل وبعد قصر V_S :

$$I_i(h_i + R_S) = -h_r V_o \Rightarrow \frac{I_i}{V_o} = \frac{-h_r}{h_i + R_S}$$

وبعد التعويض يكون

إذا تصبح قيمة المقاومة:

$$R_o = 1/g_o = \frac{1}{h_o - h_f h_r/(h_i + R_S)}$$

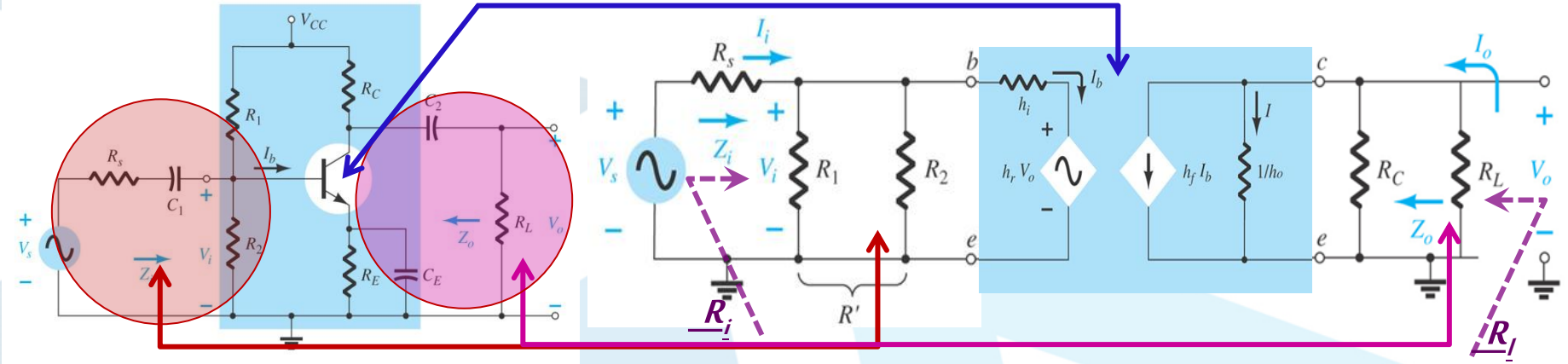
نمذجة الترانزستور ثنائي القطبية

BJT Transistor Modeling

إيجاد معاملات النموذج المكافئ الهجين، A_{VS}، R_i، R_o، A_i & A_V لأنواع مضخمات الترانزستور (CE,CC,CB). وصلة الباعث المشترك CE: عند رسم الدارة المكافئة للإشارة الصغيرة يمكن إضافة حرف صغير للدلالة على نوع الوصلة ونقوم بقصر منابع الجهد المستمر كافة وكذلك كل المكثفات الموجودة في الدارة وهذا يؤدي لعدم ظهور مقاومة الباعث R_E في الدارة المكافئة وتصبح المعادلتين بالشكل التالي:

$$V_{be} = h_i I_b + h_r V_{ce} \quad \& \quad I_c = h_f I_b + h_o V_{ce}$$

ملاحظة: بالنسبة لوصلة Cc &Cb نتبع نفس الأسلوب الحل بعد مكافئة الدارة المتناوبة.



١- مقاومة الحمل تحدد بالنظر من جهة الخرج إلى الدارة المكافئة وتساوي $R_l = R_L$.

٢- مقاومة الدخل تحدد بالنظر من جهة الدخل إلى الدارة المكافئة وتساوي $R' = R_b = R_1 // R_2$ أما ممانعة الدخل $Z_i = V_i / I_i$

٣- ربح التيار $A_i = \frac{I_o}{I_i}$ من دارة الخرج، حسب قانون تقسيم التيارات نحسب تيار الخرج بدلالة تيار الدخل ثم نجد علاقة ربح التيار.

٤- ربح الجهد A_V : $A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{I_o R_L}{I_i R_i} = A_i \frac{R_L}{R_i}$

٥- ممانعة الخرج : تحسب $Z_o = V_o / I_o$ بعد قصر منبع الإشارة الصغيرة $V_S = 0$ وفتح الحمل $R_L = \infty$.

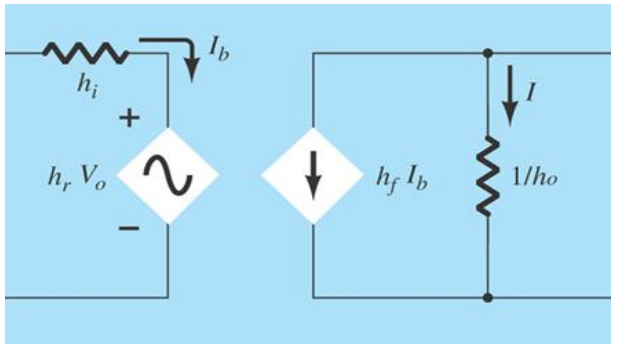
النموذج المكافئ المختصر للترانزستور BJT:

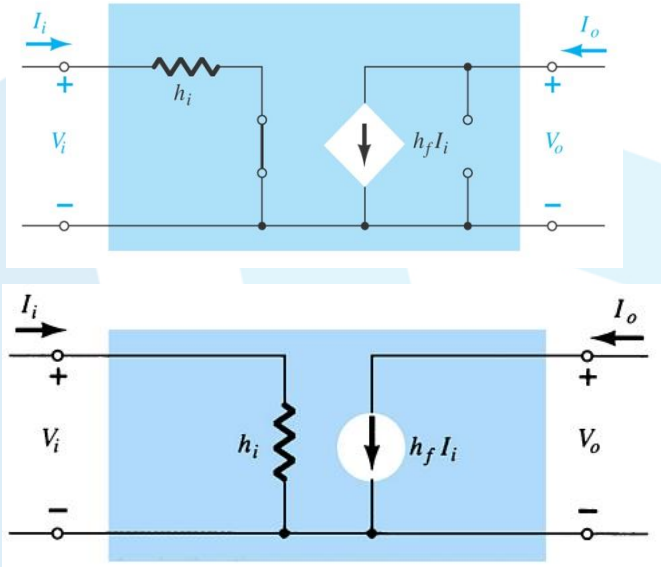
** إن اثر h_r & h_o على معاملات الدارة المكافئة الهجينة للإشارة الصغيرة هو تأثير خفيف جدا حيث: $h_r \approx 0 \Rightarrow h_r V_o \approx 0$ ذلك يؤدي لقصر منبع الجهد في الدخل أي عدم تأثير الخرج بالدخل.

** مقاومة الخرج $1/h_o$ عبارة عن مقاومة كبيرة بالمقارنة مع الحمل الموازي لها لذلك يمكن إهمالها، يؤدي إلى دارة مفتوحة على التوازي مع الحمل، لان مرور التيار فيها صغير جدا فهو يمر كاملا في الحمل.

** تصبح الدارة المكافئة الهجينة تشبه النموذج r_e الذي سيدرس لاحقا و معادلتها بالشكل التالي :

$$V_i = h_i I_i \quad \& \quad I_o = h_f I_i$$





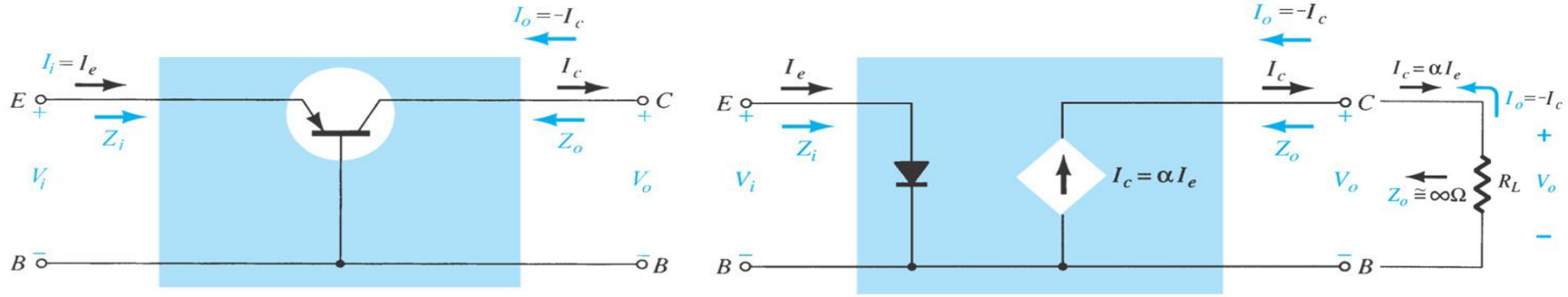
The r_e Transistor Model

نموذج منبع التيارمع الديود

-- بما أن الترانزستورثنائي القطبية عبارة عن منبع تيارمتحكم به إذا يمكن مكافئته بـ ثنائي عادي (متصل) مع منبع تيار، لهما نفس السلوك.

-- من مساوئ هذه الدارة هي حساسيتها الشديدة لمستوي القيمة المستمرة في الإشارات، لذلك يصمم هذا النموذج لدارات ترانزستوريه بمواصفات خاصة

Common-Base Configuration وصلة القاعدة المشتركة



$$r_e = \frac{26\ mV}{I_e} \qquad I_c = \alpha I_e$$

-- Input impedance (few Ohms to 50 Ω): $Z_i = \frac{V_i}{I_i} = r_e$

-- Output impedance: Signal =0 => I_e= 0 => I_c= 0 then Open circuit => Z_o=M Ohms $Z_o = \frac{V_O}{I_O} \cong \infty\Omega$

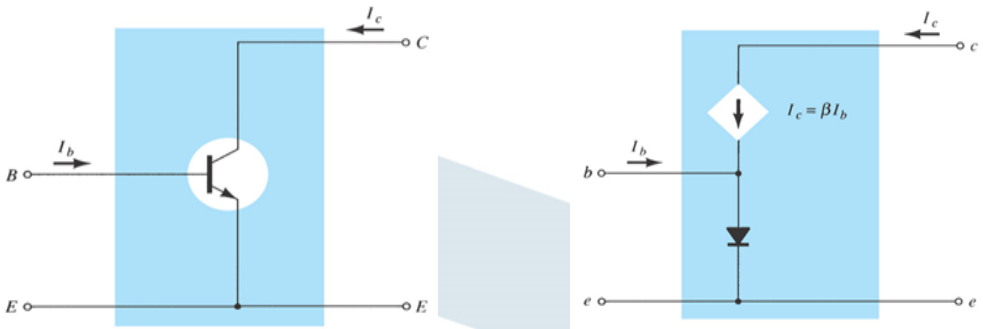
-- Voltage gain: $A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-I_o R_L}{I_i Z_i} = \frac{I_c R_L}{I_e r_e} = \frac{\alpha I_e R_L}{I_e r_e} \cong \frac{R_L}{r_e}$

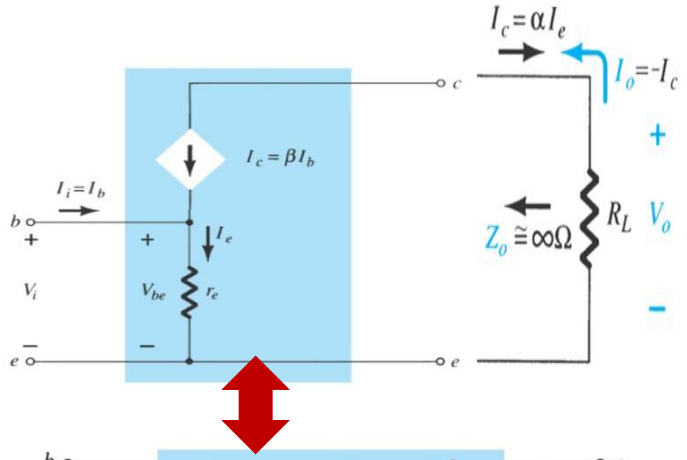
-- Current gain: $A_i = \frac{I_o}{I_i} = \frac{-I_c}{I_e} = -\alpha \cong -1$

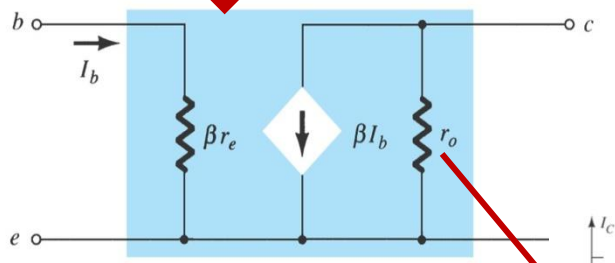
The r_e Transistor Model

نموذج منبع التيارمع الديود

Common-Emitter Configuration   وصلة الباعث المشترك







يمكن استبدال الديود بالمقاومة الديناميكية r_e و $r_e = 26\ mV/I_e$

يحسب تيار الباعث: $I_e = I_c + I_b = \beta I_b + I_b = (\beta+1)I_b \cong \beta I_b \cong I_c$

بمناقشة مميزة الخرج يمكن إضافة هذه المقاومة للخرج وذلك

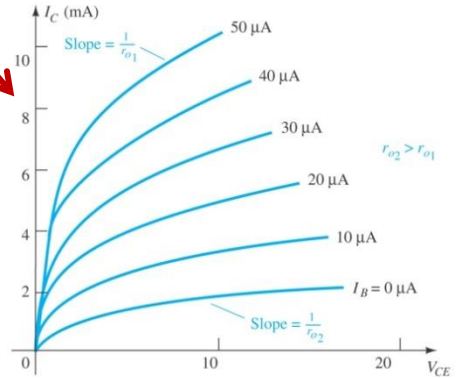
بعد جعل إشارة الدخل = صفر. بإهمال اثر r_o تصبح $Z_o = \infty$

Output impedance: $Z_o = r_o$

Input impedance: $$Z_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{V_{be}}{I_b} = \frac{I_e r_e}{I_b} = \frac{\beta I_b r_e}{I_b} = \beta r_e$$

Current gain: $$A_i = \frac{I_o}{I_i} = \frac{I_c}{I_b} = \beta \Big|_{r_o=\infty}$$

Voltage gain: $$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-I_o R_L}{I_i Z_i} = \frac{-I_c R_L}{I_b \beta r_e} = \frac{-\beta I_b R_L}{I_b \beta r_e} \cong -\frac{R_L}{r_e}\Big|_{r_o=\infty\Omega}$$

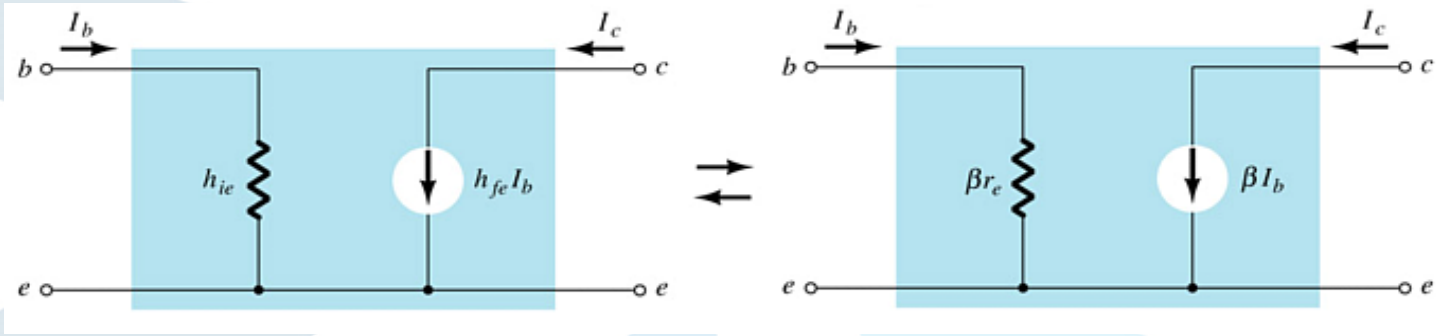


النموذج المكافئ المختصر للترانزستور BJT:

مكافئة بين النموذج r_e و الهجين المختصر C-E & C-B r_e vs. h-Parameter Model

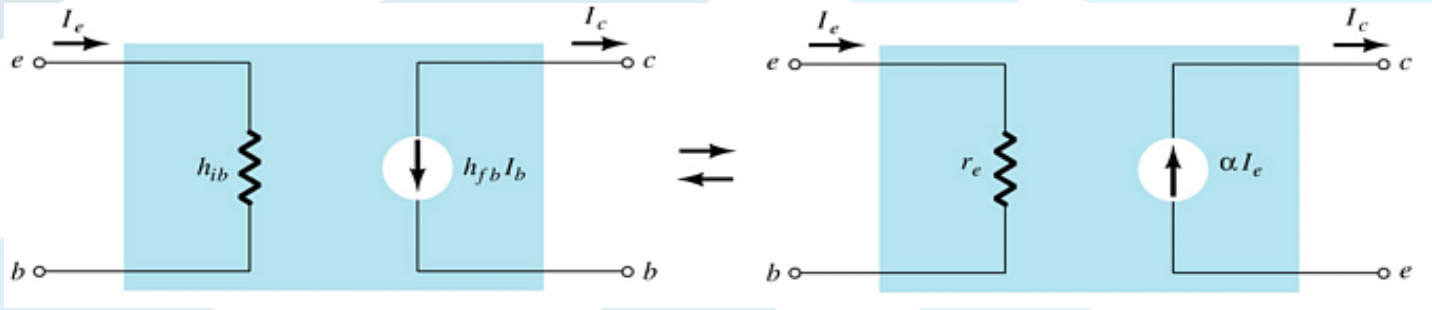
Common-Emitter

$$h_{ie} = \beta r_e$$
$$h_{fe} = \beta_{ac}$$



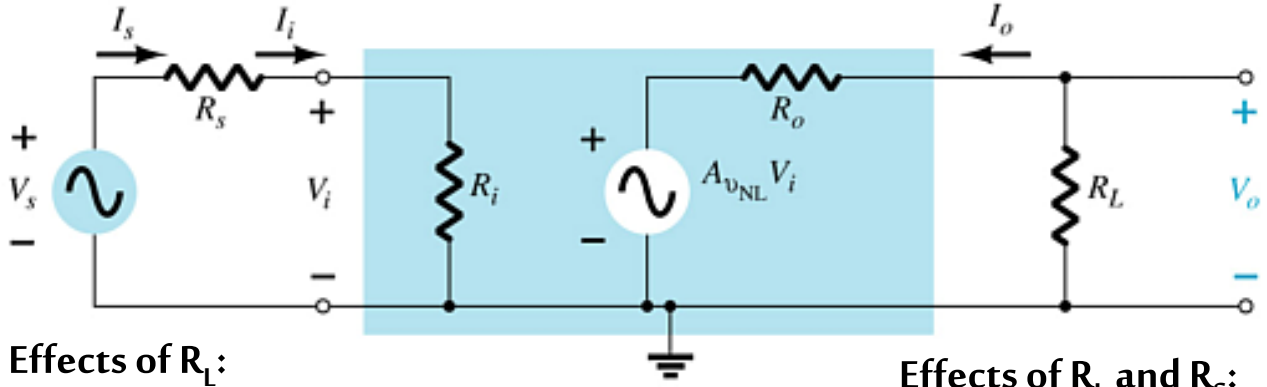
Common-Base

$$h_{ib} = r_e$$
$$h_{fb} = -\alpha \cong -1$$



Combined Effects of R_S and R_L on Voltage Gain

الأثر المركب لكل من R_S & R_L على ربح الجهد



Effects of R_L:

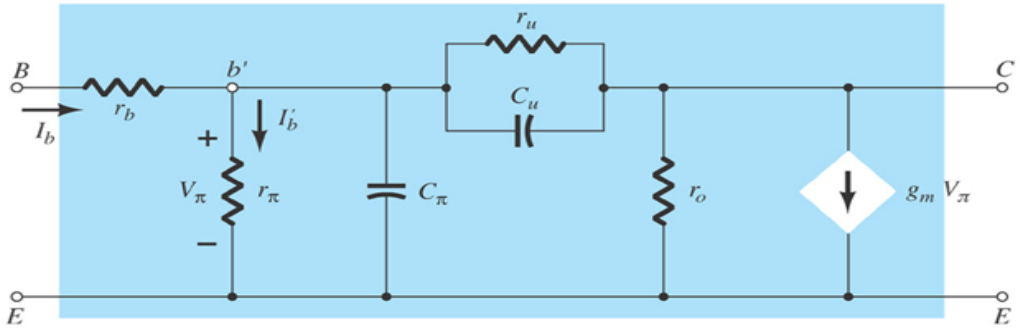
$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_L A_{vNL}}{R_L + R_o}$$

$$A_i = -A_v \frac{R_i}{R_L}$$

Effects of R_L and R_S:

$$A_{vs} = \frac{V_o}{V_s} = \frac{R_i}{R_i + R_s} \frac{R_L}{R_L + R_o} A_{vNL}$$

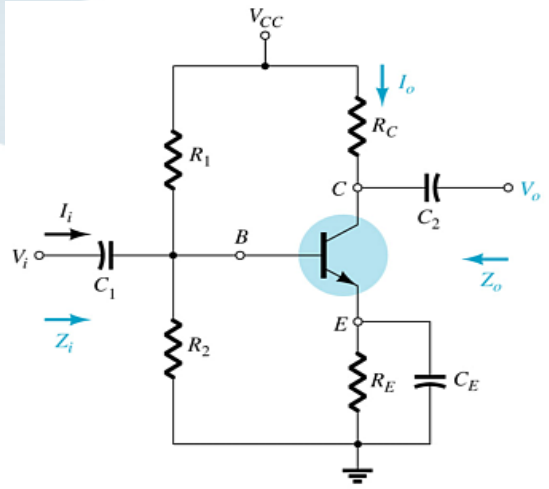
$$A_{is} = -A_{vs} \frac{R_s + R_i}{R_L}$$



The Hybrid π Model π النموذج الهجين نوع

هذا النموذج يستخدم بكثرة عند تحليل دارة الترانزستورفي الترددات العالية أما عند الترددات المنخفضة فيصبح أويقرب هذا النموذج إلى المكافئ r_e

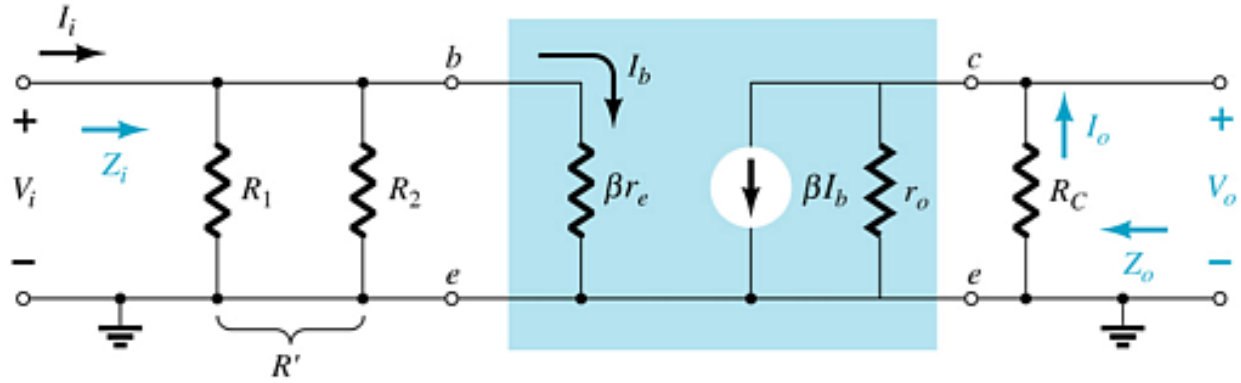
r_e model requires you to determine β, r_e, and r_o.



Input impedance:

$$R' = R_1 \,||\, R_2$$

$$Z_i = R' \,||\, \beta r_e$$



Output impedance:

$$Z_o = R_C \,||\, r_o$$

$$Z_o \cong R_C \Big|_{r_o \geq 10R_C}$$

Current gain:

$$A_i = \frac{I_o}{I_i} = \frac{\beta R' r_o}{(r_o + R_C)(R' + \beta r_e)}$$

$$A_i = \frac{I_o}{I_i} \cong \frac{\beta R'}{R' + \beta r_e} \Big|_{r_o \geq 10R_C}$$

$$A_i = \frac{I_o}{I_i} \cong \beta \Big|_{r_o \geq 10R_C,\, R' \geq 10\beta r_e}$$

Voltage gain:

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-R_C \,||\, r_o}{r_e}$$

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} \cong -\frac{R_C}{r_e} \Big|_{r_o \geq 10R_C}$$

Current gain from voltage gain: $$A_i = -A_v \frac{Z_i}{R_C}$$

Common-Emitter Fixed-Bias Calculations

Input impedance:

$$Z_i = R_B \,||\, \beta r_e$$

$$Z_i \cong \beta r_e \Big|_{R_B \geq 10\beta r_e}$$

Output impedance:

$$Z_o = R_C \,||\, r_o$$

$$Z_o \cong R_C \Big|_{r_o \geq 10R_C}$$

Voltage gain:

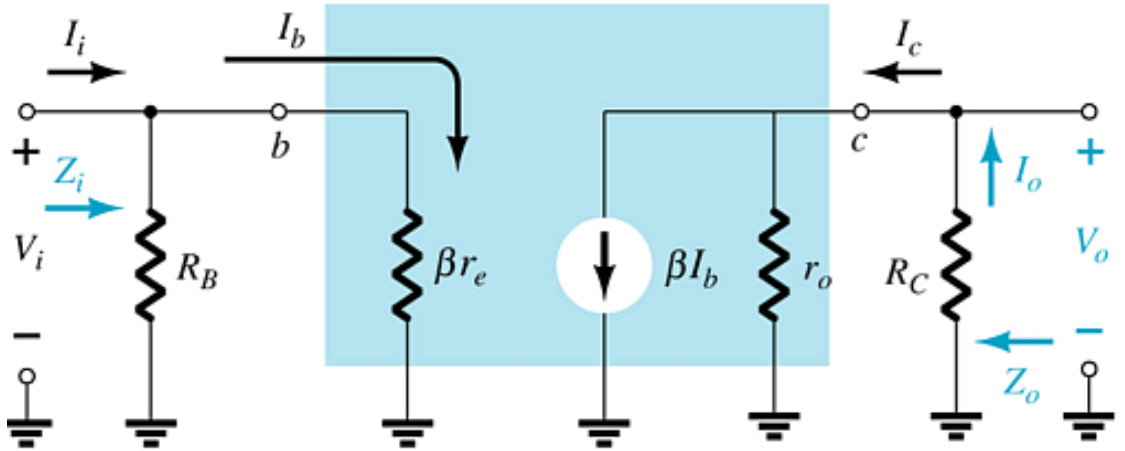
$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{(R_C \,||\, r_o)}{r_e}$$

$$A_v = -\frac{R_C}{r_e}\Big|_{r_o \geq 10R_C}$$

Current gain:

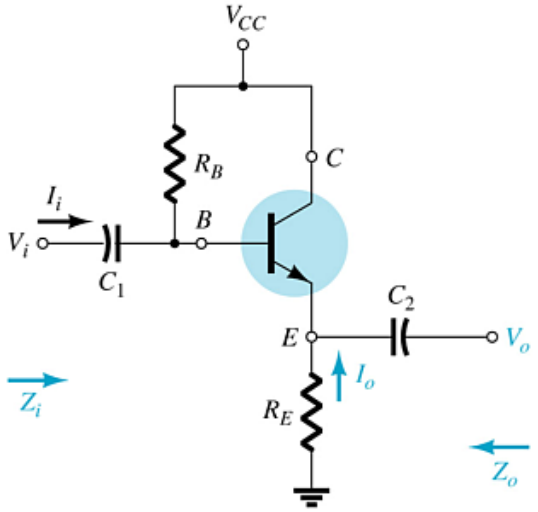
$$A_i = \frac{I_o}{I_i} = \frac{\beta R_B r_o}{(r_o + R_C)(R_B + \beta r_e)}$$

$$A_i \cong \beta \Big|_{r_o \geq 10R_C,\, R_B \geq 10\beta r_e}$$

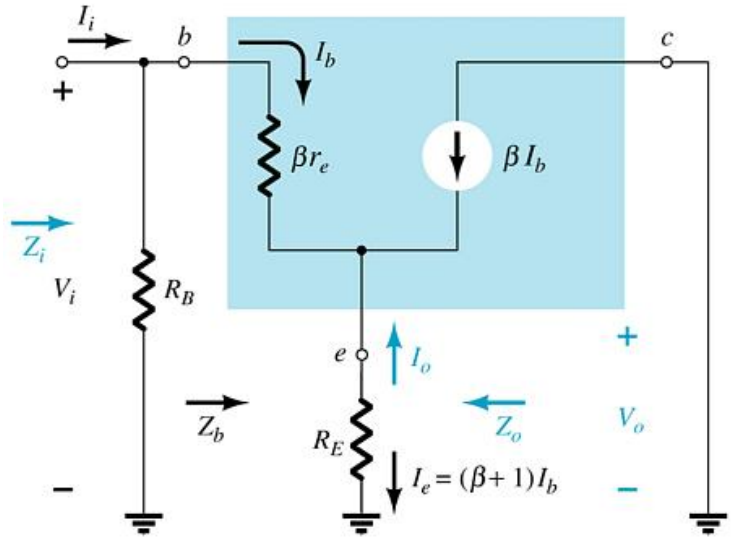


Current gain from voltage gain: $A_i = -A_v \frac{Z_i}{R_C}$

C-E, Emitter-Bias Configuration (Without R_C)



الدارة المكافئة



-- تعرف هذه الدارة بدارة المجمع المشترك.

-- الدخل مطبق على القاعدة و الخرج مأخوذ من الباعث.

-- ولا يوجد أي انزياح بالصفحة بين الدخل والخرج.

Input impedance: $R_E >> r_e$

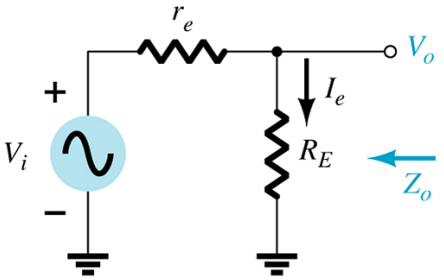
$$Z_i = R_B \,||\, Z_b$$

$$Z_b = \beta r_e + (\beta + 1) R_E$$

$$Z_b \cong \beta (r_e + R_E)$$

$$Z_b \cong \beta R_E$$

Output impedance:



$$Z_o = R_E \,||\, r_e$$

$$Z_o \cong r_e \Big|_{R_E >> r_e}$$