دارات الكترونية /٢/

المضخم التفاضلي - *Differential amplifier*

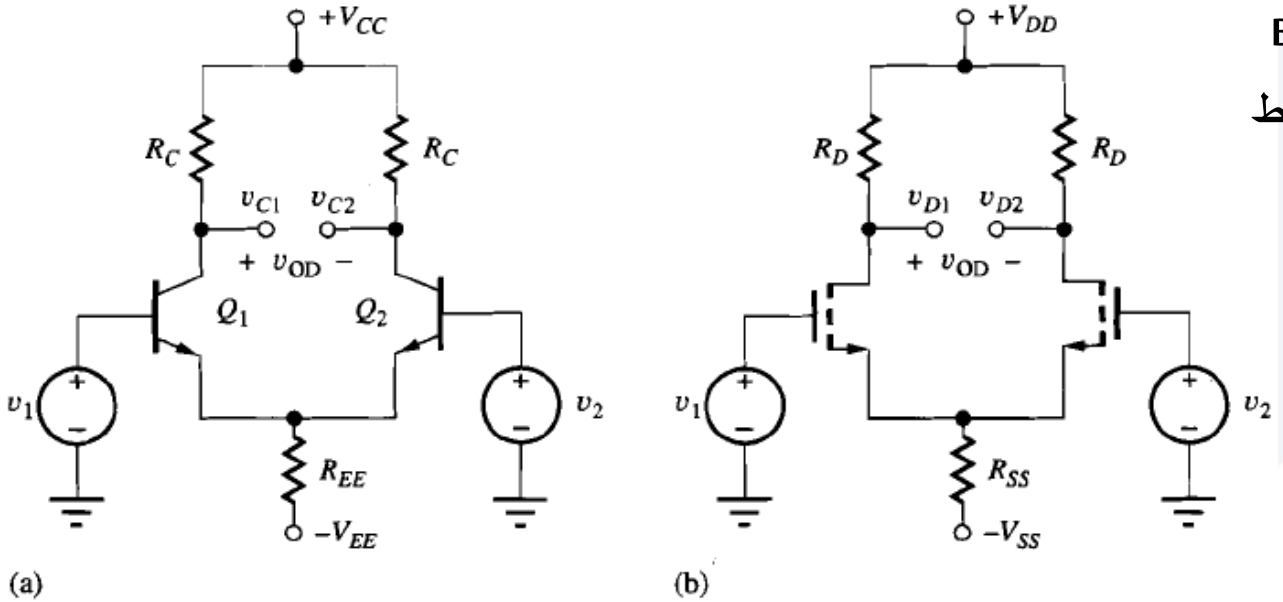
مضخم العمليات - *Operational amplifier*

مدرس المقرر
د. السموءل صالح

مقدمة

المضخم التفاضلي (*Differential amplifier*)

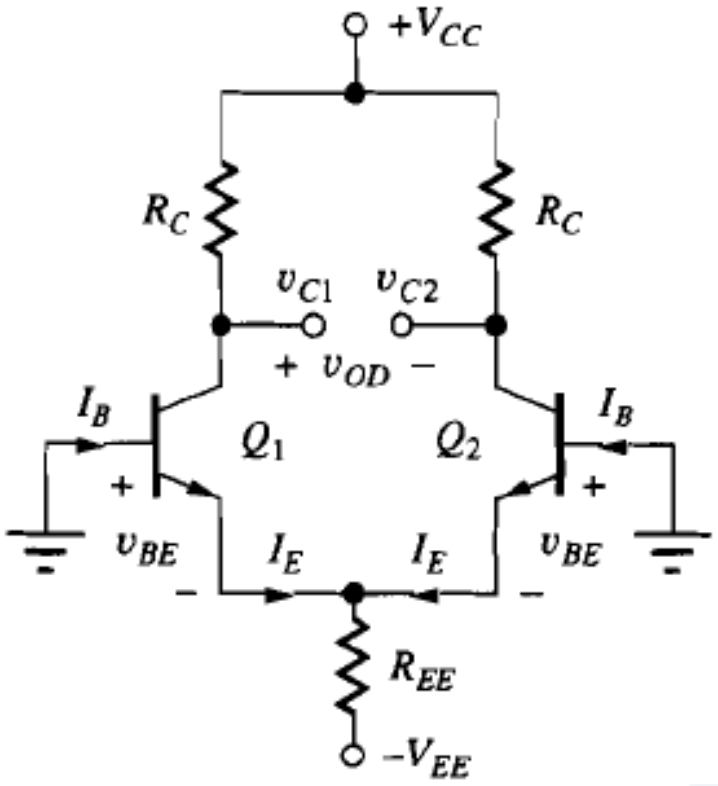
- يتكون المضخم التفاضلي من ترانزستورين متماثلين تمام BJT or MOS موصولين بالشكل المبين، يملك مدخلين v_1 & v_2 وله خرج v_{OD} يمثل النمط التفاضلي ويعرف بالفرق الجهد بين مجمعي او مصرفي الترانزستورين.
  ويمكن أخذ الخرج بين كل من المجمع أو المصرفين v_{D2} v_{C1}, v_{C2}, or v_{D1} والارضي.
- التناظر الموجود في المضخم يقدم خصائص مستمرة dc ومتناوبة ac مفيدة جدا.



- على جميع الجهات نحصل على اداء مثالي للمضخم التفاضلي فقط عندما يكون الترانزستورين متناظرين بشكل مثالي، و أفضل نسخة لهذا المضخم هي المصممة بتقنية الدارات المتكاملة IC والتي تقدم أفضل تقارب ويسمى بدارة مضخم العمليات.
- نقول عن ترانزستورين أنهما متماثلين اذا كان لديهما نفس الخصائص ونفس قيم البارامترات مثل: للترانزستور BJT (I_s, β_{FO}, V_A) *أو للترانزستور Mos* $(K_n, V_{TN}, \text{and } \lambda)$, *ولهما نفس درجة الحرارة.*

DC Analyze of Differential Amplifiers

التحليل المستمر للمكبر التفاضلي



الدارة المكافئة المستمرة DC لتحليل المضخم التفاضلي الذي يستخدم الترانزستور

- لإيجاد نقطة العمل الساكنة للمضخم نقصر اشارة الدخل كما الشكل وبذلك يمكن كتابة: $V_{BE1} = V_{BE2} = V_{BE}$

- بفرض التطابق بين الترانزستورين *Q1 and Q2* هذا التطابق يفرض ما يلي: $V_{C1} = V_{C2} = V_C$ وكذلك قيم التيارات على خرج كل من الترانزستورين متطابقة وفق: $I_{B1} = I_{B2} = I_B$ $I_{E1} = I_{E2} = I_E$ $I_{C1} = I_{C2} = I_C$.

- يكتب تيار الباعث لكلا الترانزستورين من حلقة دخل *Q1* وفق:

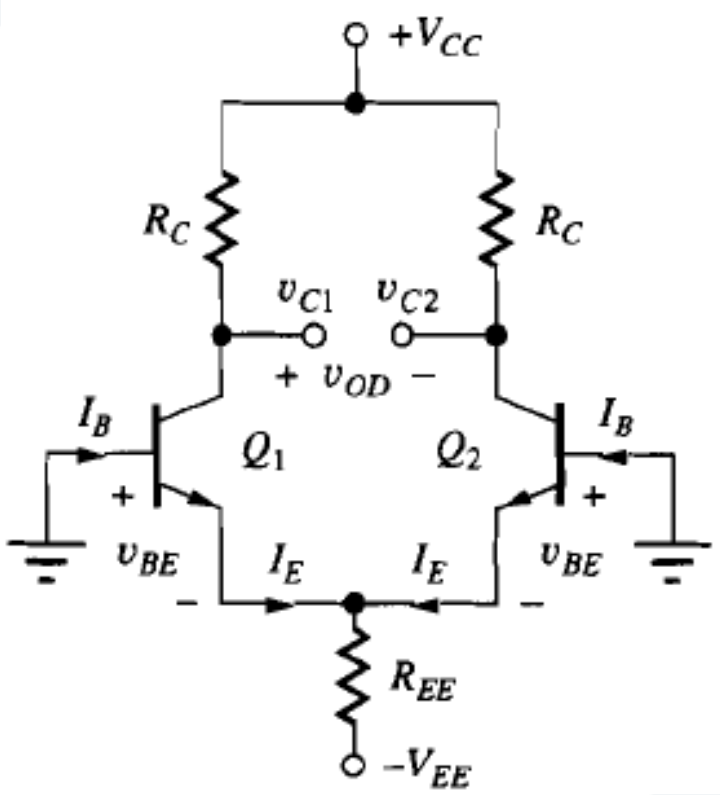
$$V_{BE} + 2I_E R_{EE} - V_{EE} = 0 \quad \text{Then} \quad I_E = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{2R_{EE}} \qquad I_C = \alpha_F I_E \qquad I_B = \frac{I_C}{\beta_F}$$

- الجهد على كل من المجمعين يساوي الى: $V_{C1} = V_{C2} = V_{CC} - I_C R_C$ كذلك: $V_{CE1} = V_{CE2}$

- من أجل المضخم التفاضلي المتناظر جهد الخرج المستمر يكون معدوما:

$$V_{OD} = V_{C1} - V_{C2} = 0 \text{ V}$$

Example: Find the Q-points plus V_C and I_B for the differential amplifier *if* $V_{CC} = V_{EE} = 15$ V, $R_{EE} = 75$ KΩ, $R_C = 75$ KΩ, *and* $B_F = 100$.
Active region operation with $V_{BE} = 0.7$ V, $V_A = \infty$



الدارة المكافئة المستمرة DC لتحليل المضخم التفاضلي الذي يستخدم الترانزستور

Example: Find the Q-points plus V_C and I_B for the differential amplifier *if* $V_{CC} = V_{EE} = 15$ V, $R_{EE} = 75$ KΩ, $R_C = 75$ KΩ, and $B_F = 100$. *Active region operation with* $V_{BE} = 0.7$ V, $V_A = \infty$

$$I_E = \frac{V_{EE} - V_{BE}}{2R_{EE}} = \frac{(15 - 0.7)\text{ V}}{2(75 \times 10^3\ \Omega)} = 95.3\ \mu\text{A}$$

$$I_C = \alpha_F I_E = \frac{100}{101} I_E = 94.4\ \mu\text{A}$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta_F} = \frac{94.4\ \mu\text{A}}{100} = 0.944\ \mu\text{A}$$

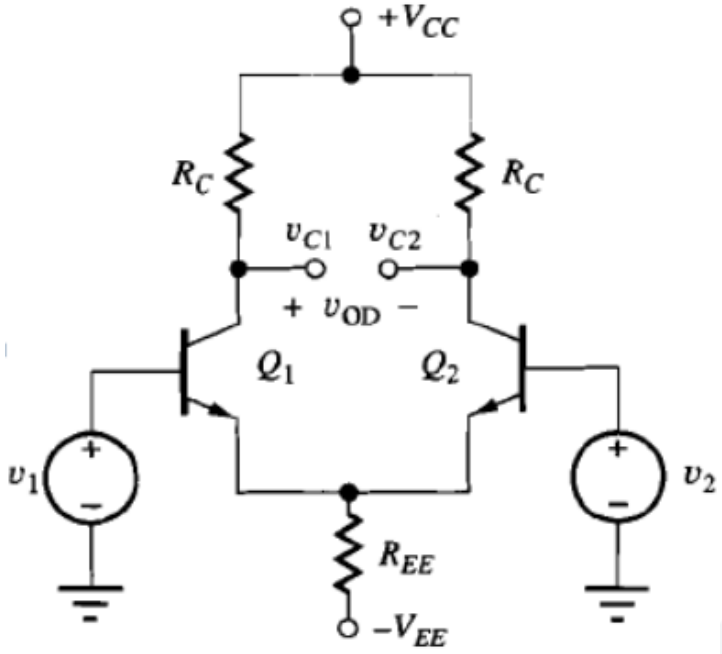
$$V_C = 15 - I_C R_C = 15\text{ V} - (9.44 \times 10^{-5}\text{ A})(7.5 \times 10^4\ \Omega) = 7.92\text{ V}$$

$$V_{CE} = V_C - V_E = 7.92\text{ V} - (-0.7\text{ V}) = 8.62\text{ V}$$

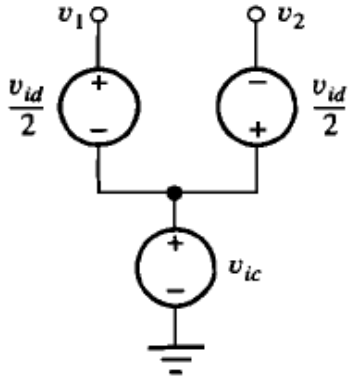
Because of the circuit symmetry, both transistors in the differential amplifier are biased at a Q-point of (94.4 μA, 8.62 V) with IS = 0.944 μA and VC = 7.92 V.

يمكن تبسيط التحليل المتناوب للمضخم التفاضلي بمكافئة كل من جهدي الدخل v_1 and v_2 بالنمطين الآتيين كمركبات لإشارة الدخل:

١- نمط الدخل التفاضلي differential-mode input (v_{id}) والمعرف وفق الشكل المبين:



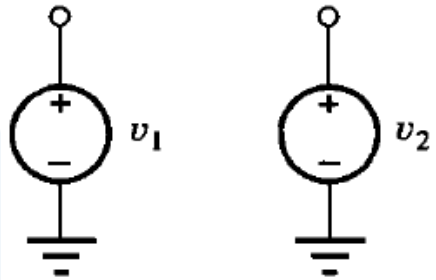
1- Definition of differential-mode (v_{id}) input voltages.



$$v_{id} = v_1 - v_2$$

٢- نمط الدخل المشترك common-mode input (v_{ic}) والمعرف وفق الشكل المبين:

2- Definition of the common-mode (v_{ic}).



$$v_{ic} = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

AC Analyze of Differential Amplifiers

التحليل المتناوب للمكبر التفاضلي

يمكن تبسيط التحليل المتناوب للمضخم التفاضلي بمكافئة كل من جهدي الدخل v_1 and v_2 بالنمطين الآتيين كمركبات لإشارة الدخل:

١- نمط الدخل التفاضلي (v_{id}) differential-mode input . ٢- نمط الدخل المشترك (v_{ic}) common-mode input .

-- بناء على ذلك يمكن كتابة جهد الدخل باستخدام النمطين السابقين v_{id} and v_{ic} وفق:

$$v_1 = v_{ic} + \frac{v_{id}}{2} \quad \text{and} \quad v_2 = v_{ic} - \frac{v_{id}}{2}$$

-- وبنفس الالية يمكن كتابة جهد الخرج لكل من النمطين v_{od} and v_{oc} وفق :

$$v_{od} = v_{c1} - v_{c2} \quad \text{and} \quad v_{oc} = \frac{v_{c1} + v_{c2}}{2}$$

-- يمكن الان تعميم النتيجة و ايجاد العلاقة في الحالة العامة بين دخل وخرج المضخم التفاضلي والتي تعطي اربع معاملات تضخيم معرفة بـ:

A_{dd} = **differential-mode gain**
A_{cd} = **common-mode** (to differential-mode) **conversion gain**
A_{cc} = **common-mode gain**
A_{dc} = **differential-mode** (to common-mode) **conversion gain**

$$\begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{dd} & A_{cd} \\ A_{dc} & A_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{id} \\ v_{ic} \end{bmatrix}$$

-- عندما يكون كل من الترانزستورين مثاليين ومتطابقين تماما يكون كل من المعاملين A_{dc} and A_{cd} مساوين للصفرونكتب:

$$\begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{dd} & 0 \\ 0 & A_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{id} \\ v_{ic} \end{bmatrix}$$

-- في هذه الحالة تنتج عن نمط اشارة الدخل التفاضلية اشارة خرج صرفة بالنمط التفاضلي، وعن اشارة النمط المشترك في الدخل ينتج فقط خرج بنمط مشترك صرف.

AC Analyze of Differential Amplifiers

التحليل المتناوب للمكبر التفاضلي

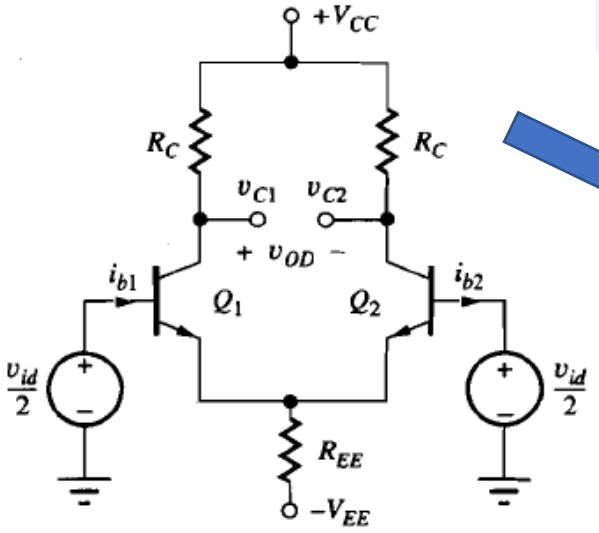
Differential-mode Gain and Input Resistance

ربح المكبر التفاضلي ومقاومة الدخل عند النمط التفاضلي

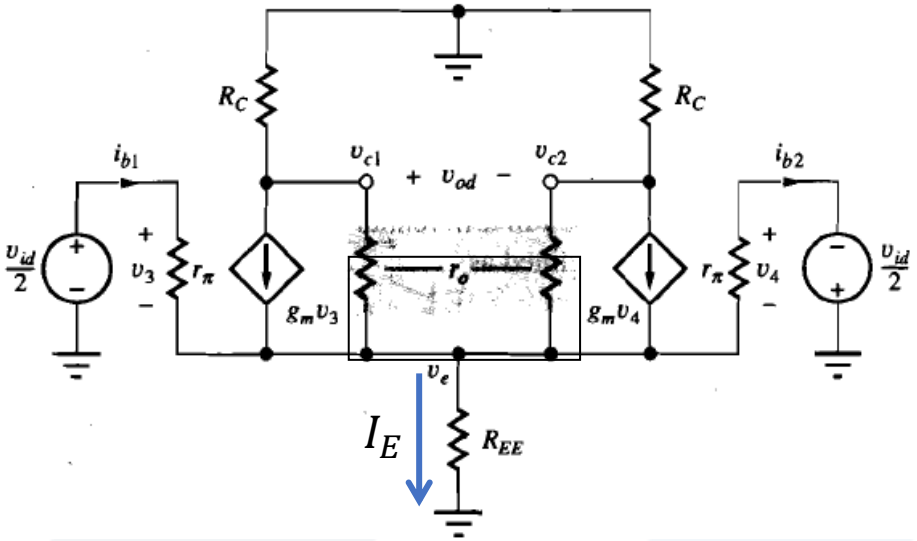
-١- طبقت اشارة الدخل من النمط التفاضلي على مداخل المضخم لاحظ الشكل.

-٢- المطلوب حساب الربح للخرج التفاضلي ولك خرج مفرد.

-٣- بسبب وجود مقاومة حمل للترانزستور، يمكن اهمال مقاومة خرجه r_o عند الدارة المكافئة المتناوبة للإشارة الصغيرة المبينة بالشكل.



Differential amplifier with a differential-mode input signal.



لحساب التيار الكلي على عقدة الباعث:

$$I_E = \frac{v_e}{R_{EE}} = g_m v_3 + \frac{v_3}{r_\pi} + g_m v_4 + \frac{v_4}{r_\pi}$$

يمكن تبسيط هذه المعادلة بأخذ الناقلية بدل المقاومة:

$$I_E = g_{EE} v_e = (g_m + g_\pi)(v_3 + v_4)$$

يحسب الربح للنمط التفاضلي A_{dd} من اجل خرج متوازن $v_d = v_{c1} - v_{c2}$ وفق:

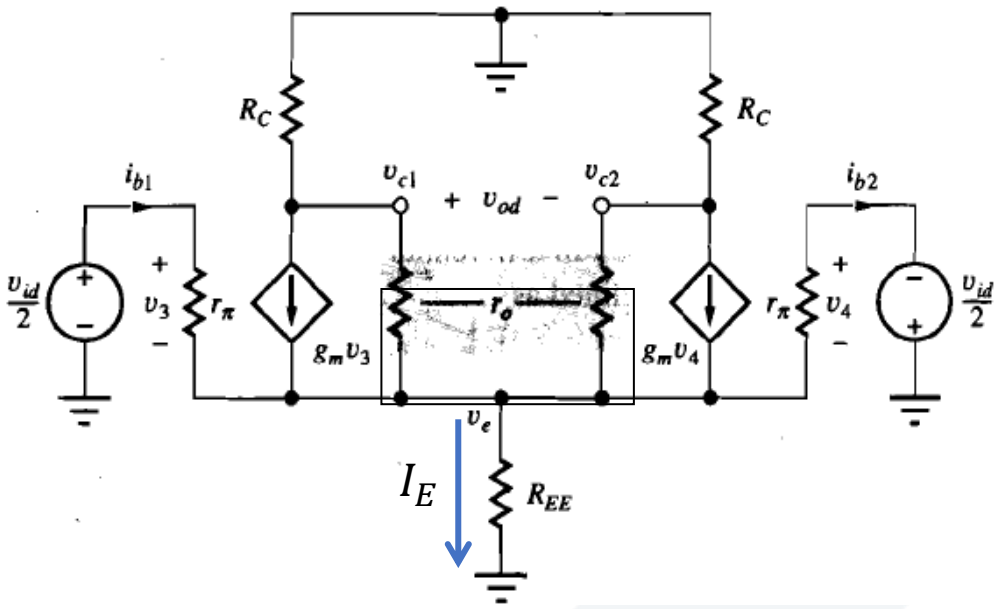
$$A_{dd} = \left.\frac{v_{od}}{v_{id}}\right|_{v_{ic}=0} = -g_m R_C$$

الربح لكل خرج على حدى باعتماد v_{C1} or v_{C2} :

$$A_{dd1} = \left.\frac{v_{c1}}{v_{id}}\right|_{v_{ic}=0} = \frac{g_m R_C}{2} = \frac{A_{dd}}{2} \quad \text{or} \quad A_{dd2} = \left.\frac{v_{c2}}{v_{id}}\right|_{v_{ic}=0} = +\frac{g_m R_C}{2} = -\frac{A_{dd}}{2}$$

Differential-mode Gain and Input Resistance

ربح المكبر التفاضلي ومقاومة الدخل عند النمط التفاضلي



-- بالنسبة لحساب الربح الناتج عن النمط المشترك يكون $A_{cc} = 0$ لان $v_{C2} = -v_{C1}$:

-- لحساب مقاومة دخل النمط التفاضلي R_{id} وهي المقاومة التي تمثل مقاومة الاشارة الصغيرة بالنسبة لجهد دخل النمط التفاضلي وتظهر بين قاعدتي الترانزستورين وتعطى بـ:

$$R_{id} = \frac{v_{id}}{i_{b1}} = 2r_\pi \qquad \text{because } i_{b1} = \frac{\frac{v_{id}}{2}}{r_\pi}$$

-- أذا اصبحت قيمة $v_{id} = 0$ إذا $g_m v_3 = g_m v_4 = 0$ وبذلك تأخذ مقاومة الخرج R_{od} للنمط التفاضلي القيمة:

$$R_{od} = 2(R_C \| r_o) \cong 2R_C$$

-- وتصبح قيمة المقاومة لكل خرج على حدى: $R_{od} \cong R_C$

Biasing with Electronic Current Sources

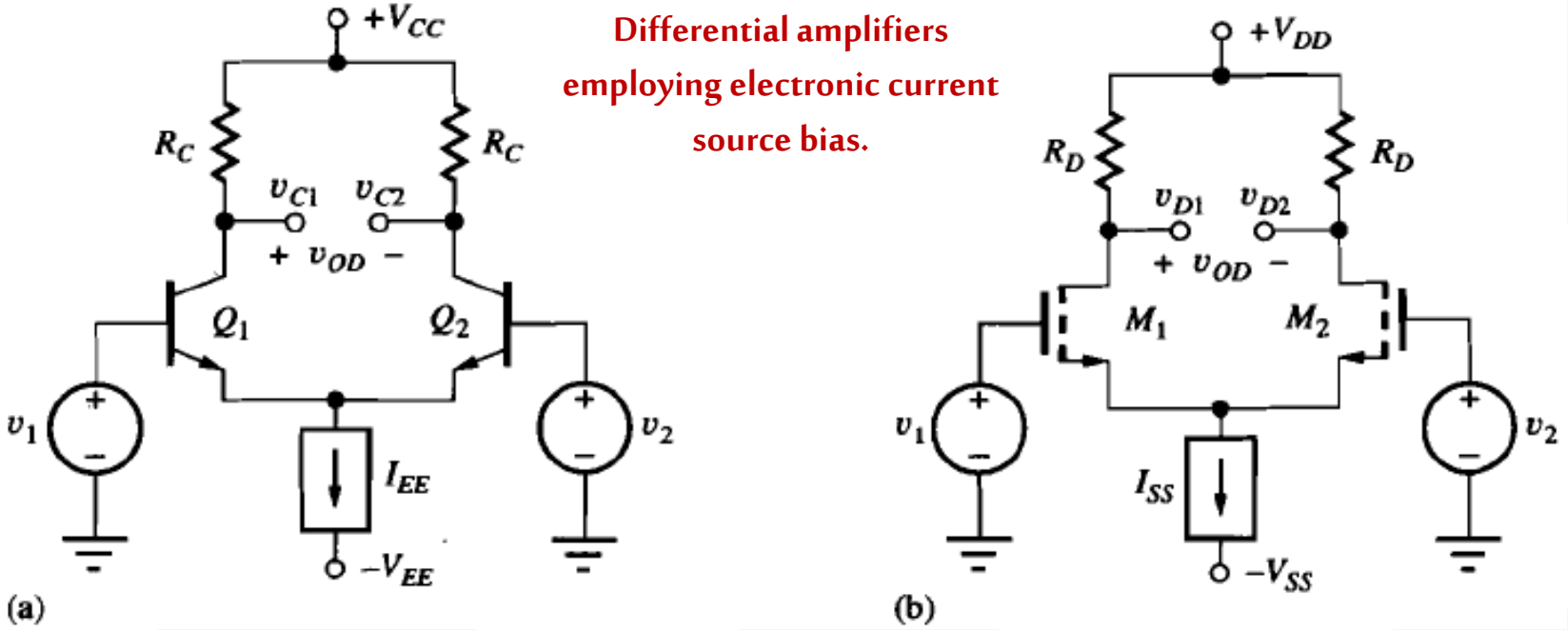
التحييز باستخدام تيار منبع الكتروني على الباعث

-- تعتمد نقطة العمل للمضخم التفاضلي بشكل مباشر على جهد المنبع وخاصة الجهد السالب وكذلك على مقاومة الباعث R_{EE}.

-- حتى نتخلص من هذه الحدود ونعمل على استقرارنقطة العمل ودعم مقاومة الباعث يجب تحييز المضخم التفاضلي باستخدام منبع التيارعلى الباعث.

-- التحييز باستخدام منبع التيارعلى للمضخم التفاضلي المكون من الترانزستورBJT أوMOSFET حيث نستبدل كل من المقاومة R_{EE} او المقاومة R_{SS} بمنبع التيار.

Differential amplifiers employing electronic current source bias.



Biasing with Electronic Current Sources

التحييز باستخدام تيار منبع الكتروني

DC Analysis of the MOSFET Differential Amplifier

التحليل المستمر للمضخم التفاضلي الذي يستخدم ترانزستور تأثير الحقل

-- من المعروف أن الترانزستور MOSFETS يقدم مقاومة دخل عالية جدا وهو مستخدم بشكل كبير في تقنية الـ CMOS.

-- بالإضافة لمقاومة الدخل العالية يقدم المضخم الذي يستخدم ترانزستور تأثير الحقل نسبة تضخيم عالية بالمقارنة مع الذي يستخدم الترانزستور ثنائي القطبية.

-- من الواضح أن قيمة تيار منبع I_S مساوي لنصف قيمة تيار المنبع

$$I_S = \frac{I_{SS}}{2}$$

-- بالنسبة لجهد بوابة الـ MOSFET ممكن أن يحسب بشكل مباشر عن طريق تيار المصرف وفق:

$$I_D = \frac{K_n}{2}(V_{GS} - V_{TN})^2 \quad \text{Then:}$$

$$V_{GS} = V_{TN} + \sqrt{\frac{2I_D}{K_n}} = V_{TN} + \sqrt{\frac{I_{SS}}{K_n}}$$

ولدينا ايضا جهد المنبع:

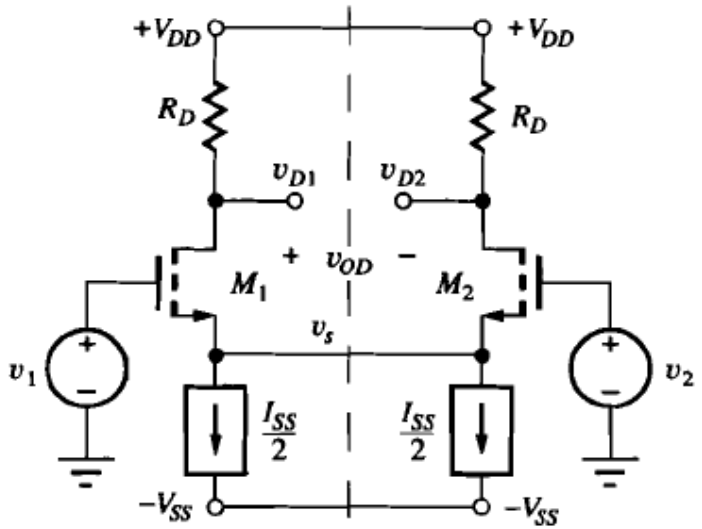
$$V_S = -V_{GS}$$

جهد المصرف:

$$V_{D1} = V_{D2} = V_{DD} - I_D R_D \quad \text{and} \quad V_O = 0$$

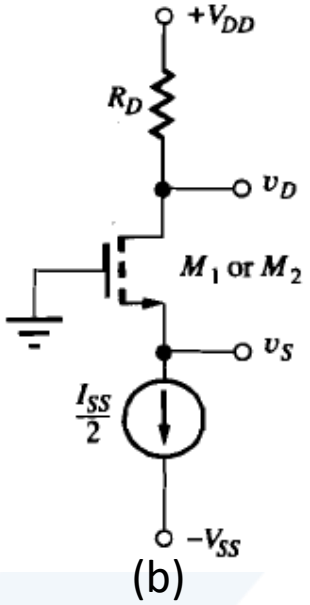
جهد المنبع-مصرف يعطى:

$$V_{DS} = V_{DD} - I_D R_D + V_{GS}$$



(a) دارة المضخم التفاضلي المتناظر باستخدام الـ MOS

(b) تقنية نصف الدارة من أجل التحليل المستمر.

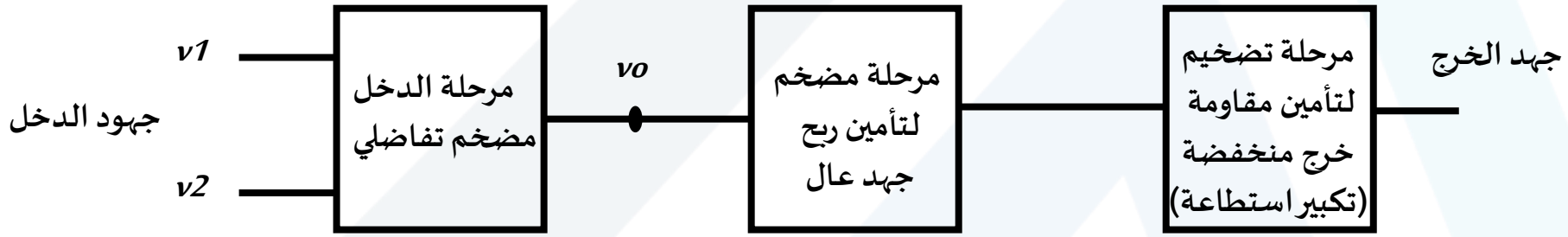


(b)

مضخم العمليات

Operational amplifier

- أهم تطبيق للمضخم التفاضلي هو استخدامه كدارة دخل لمكبر العمليات باعتباره يؤمن جهد الدخل التفاضلي المرغوب فيه.
- لكن مكبر العمليات يحتاج الى ربح جهد عال الذي لا يستطيع المضخم التفاضلي تأمينه.
- لذلك يربط الى المضخم التفاضلي مرحلة أو أكثر لتأمين ربح الجهد المطلوب.
- يجب على المرحلة النهائية (وعادة المرحلة الثالثة) أن تؤمن مقاومة خرج منخفضة لمكبر العمليات وتيار خرج عال (تكبير استطاعة).

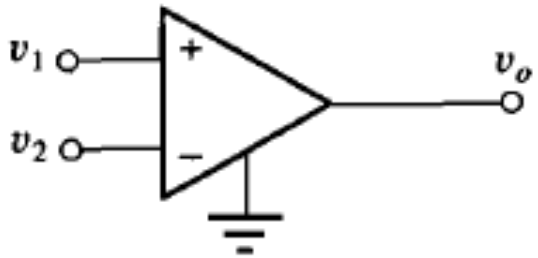


- يعد مكبر العمليات Operational Amplifier (op-amp) من أكثر العناصر الالكترونية استخداماً ضمن تطبيقات الدارات الخطية بسبب كلفته البسيطة وسهولة استخدامه واستهلاكه القليل للاستطاعة ودقة أدائه والوثوقية العالية وإمكانية استخدامه دون معرفة بنيته الداخلية المعقدة والمؤلفة من العديد من الترانزستورات والمقاومات وبعض المكثفات لاحظ الدارة المكافئة.

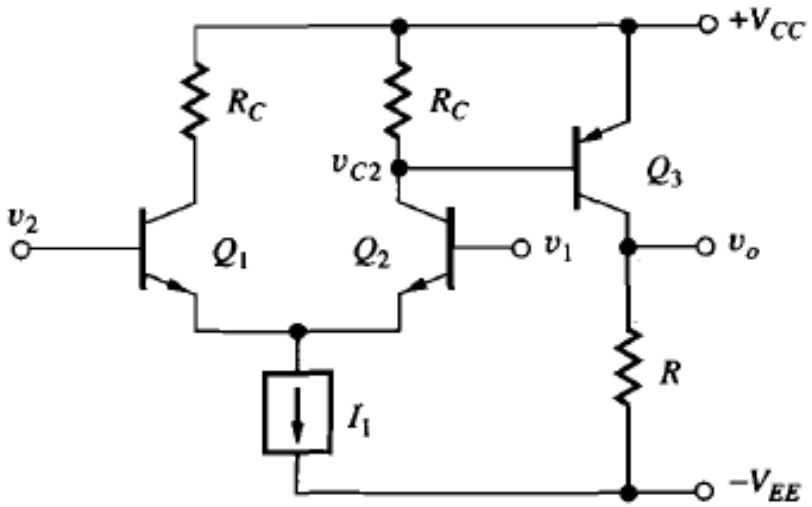
مضخم العمليات

Operational amplifier

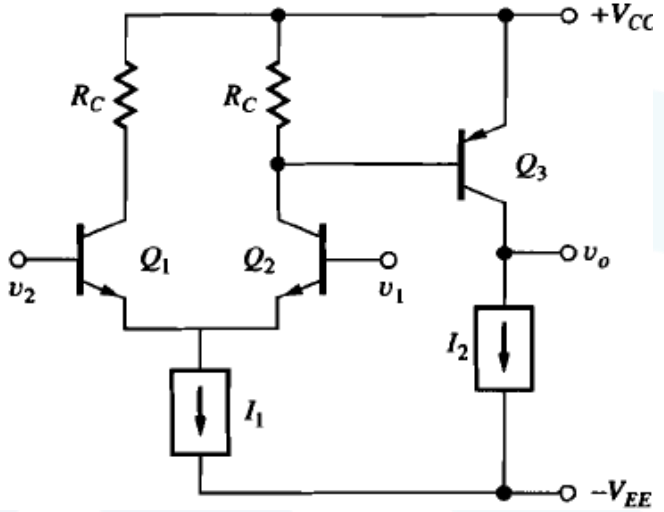
دارة مكبر عمليات بمرحلتين



الرمز الفيزيائي لدارة مضخم العمليات



دارة مكبر عمليات بمرحلتين الاولى مضخم تفاضلي
والثانية مضخم باعث مشترك لتأمين ربح جهد عال



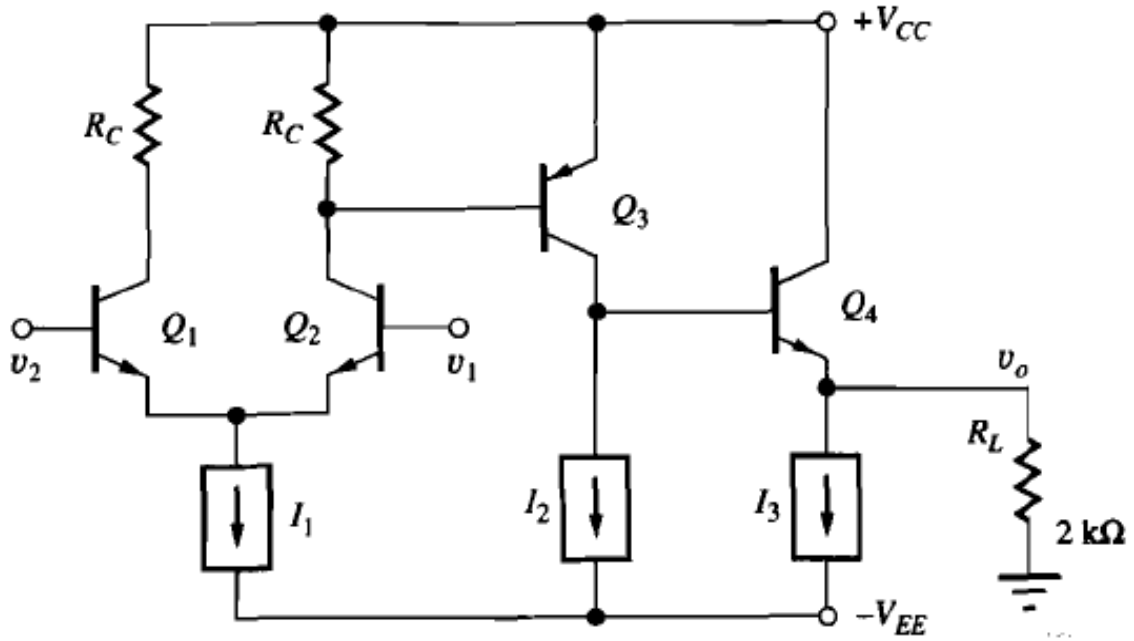
يمكن تحسن الربح وذلك باستبدال المقاومة R المربوطة مع
مجمع الترانزستور Q3 بمنبع تيار كما في الشكل

مضخم العمليات

Operational amplifier

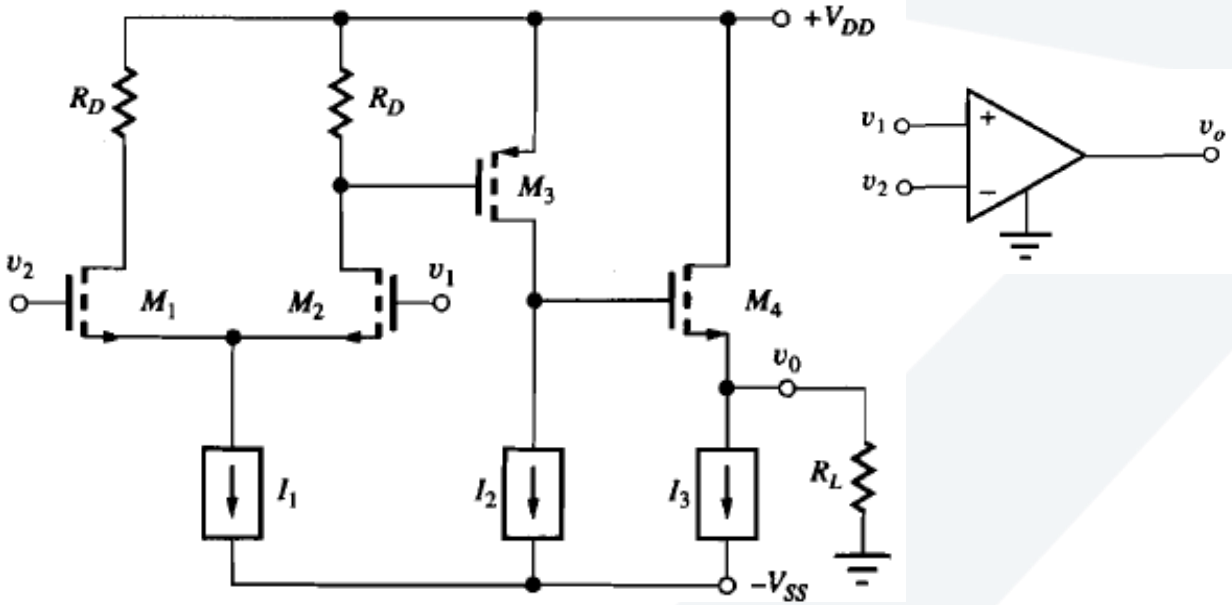
دارة مكبر عمليات بثلاث مراحل

يتم تخفيض مقاومة الخرج بإضافة مرحلة جديدة (ثالثة) ذات مقاومة خرج منخفضة،
وصلة المجمع المشترك تؤمن مقاومة خرج منخفضة



- يتم تصنيع مكبرات العمليات على شكل دارات متكاملة (ICs)

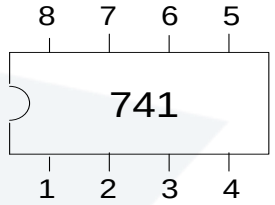
مكبر العمليات باستخدام ترانزستور MOSFET

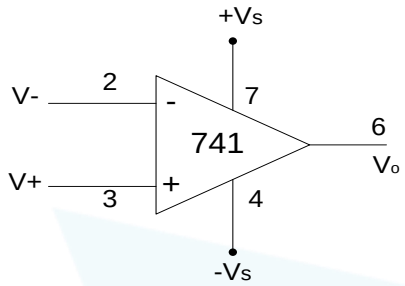


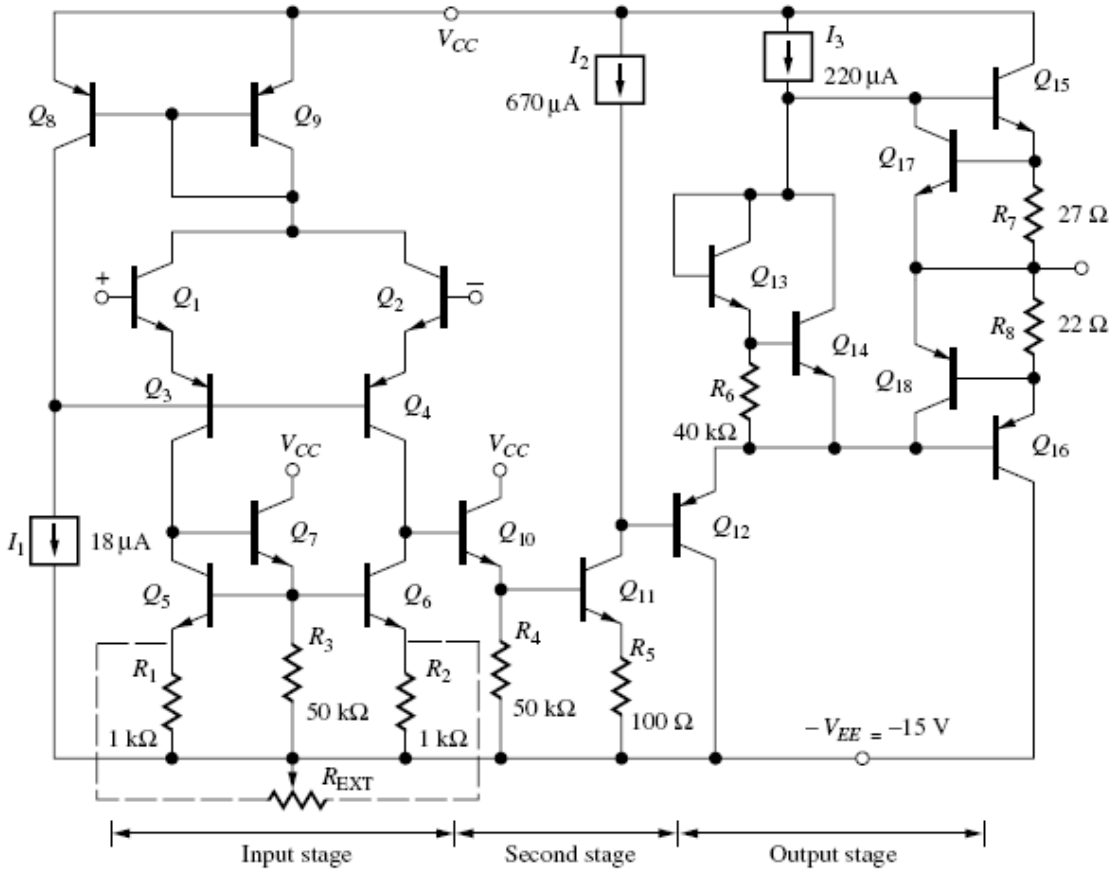
مرحلة-١- دارة الدخل: مضخم تفاضلي باستخدام MOSFET ترانزستور.
مرحلة-٢- دارة التضخيم وصلة المنبع المشترك.
مرحلة-٣- دارة الخرج وصلة المصرف المشترك (ربح =١ و مقاومة خرج منخفضة).

The 741 Operational amplifier

مضخم العمليات 741







- هو عبارة عن دارة متكاملة بثمانية أرجل حيث لها مدخلان ومخرج وحيد وتحتاج إلى تغذيتين موجبة وسالبة وذلك بسبب وجود نوعين من الترانزستورات بداخلها npn وpnp يرمز للمكبر بمثلث يتجه رأسه باتجاه سريان الإشارة وله الأرجل (نقاط التوصيل) التالية:

١. الرجل رقم (٢): المدخل العاكس (-) ، الرجل رقم (٣): المدخل غير العاكس (+)
٢. الرجل رقم (٤): التغذية السالبة (Vs-)، الرجل رقم (٧): التغذية الموجبة (Vs+)
٣. الرجل رقم (٦): الخرج، الرجل رقم (٨): ليس لديها استخدام
٤. الرجلان (١) و (٥): يستخدمان في بعض الدارات من أجل المعايرة وذلك بوصل دارة خارجية بسيطة فيما بينهما تحتوي على مقاومة متغيرة يتم ضبطها لجعل جهد الخرج مساوياً للصفر في حال عدم تطبيق أي جهد على المداخل

- يمكن لمكبر العمليات أن يشكل العديد من الدارات الالكترونية وذلك بحسب العناصر الكهربائية التي يتم توصيلها معه فيمكن أن يستخدم كمكبر، مقوم، مفاضل، مكامل، مرشح، جامع، طارح، دارة قص وتحديد، وحيد وثنائي وعديم الاستقرار، مولد الإشارات....

مضخم العمليات 741

The 741 Operational amplifier

- إن قطبية جهد الخرج لمكبر العمليات تعتمد على قطبية فرق الجهد بين مدخليه أي أنه يضخم الفرق بين جهدي الدخل V1(المدخل العاكس) و V2 (المدخل غير العاكس) ، يمكن التمييز بين ثلاثة حالات:

١. إذا كان V1<V2 ، Vo موجب -- إذا كان V1>V2، Vo سالب -- إذا كان V1=V2، Vo معدوم

- يمكن تلخيص أهم خصائص مكبر العمليات بالنقاط التالية:

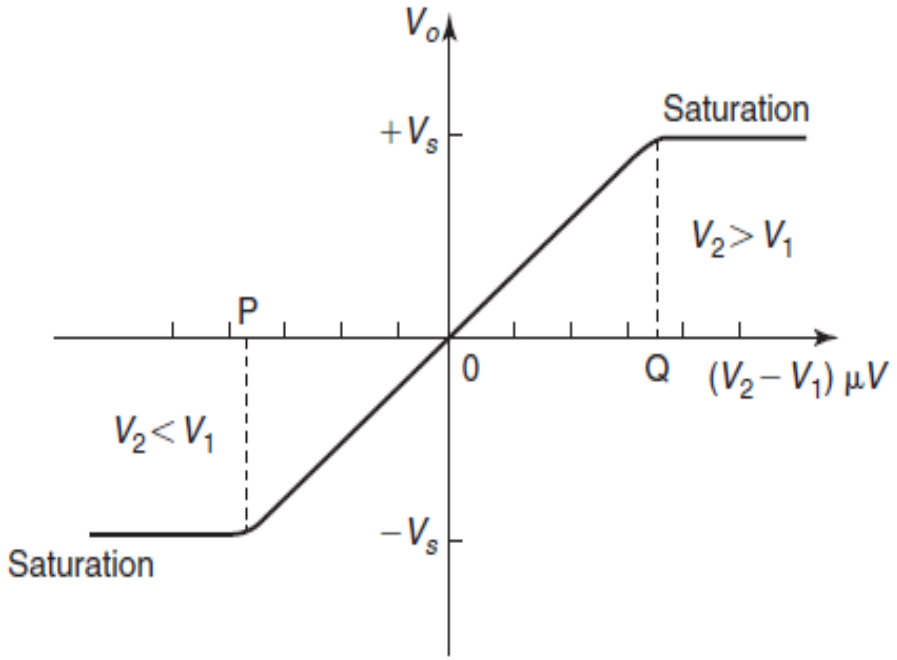
١. ربح الحلقة المفتوحة عالي جداً Ao والذي يقدر بحوالي 10^5 من أجل الجهد المستمر والجهد المتناوب منخفض التردد (Ao=∞ للمكبر المثالي)

٢. ممانعة دخل عالية جداً تأخذ القيمة بين 10^6 و 10^{12} وبالتالي يمر جهد التغذية (الدخل) دون ضياع كبير

٣. ممانعة خرج منخفضة جداً حوالي 600Ω وبالتالي جهد الخرج يمكن استخدامه بشكل فعال مع أي حمل خارجي حتى ولو بلغت قيمته عدة كيلو أوم

٤. عرض المجال الترددي كبير جداً (Bw=∞ للمكبر المثالي)

٥. مواصفات ثابتة مع تغيرات درجة الحرارة



$$V_o = A_o(V_2 - V_1)$$

$$A = \frac{V_o}{V_2 - V_1}$$

خواص النقل

- تظهر خواص الجهد كيفية تغير جهد الخرج Vo مع الجهد (V2 - V1)
- بين النقطتين P و Q يكون جهد الخرج خطياً مع جهد الدخل، ضمن هذا المجال يتصرف مكبر العمليات بشكل خطي مع تشوه قليل في الجهد المكبّر
- يسبب جهد الدخل خارج المنطقة الخطية حالة إشباع ويكون عندها جهد الخرج قريباً من القيم العظمى Vs– و Vs+
- ينتج هذا الأداء الخطي عن ربح الجهد العالي للحلقة المفتوحة Ao الذي يعطى بالعلاقة التالية