دارات الكترونية

مضخم العمليات - *Operational amplifier*

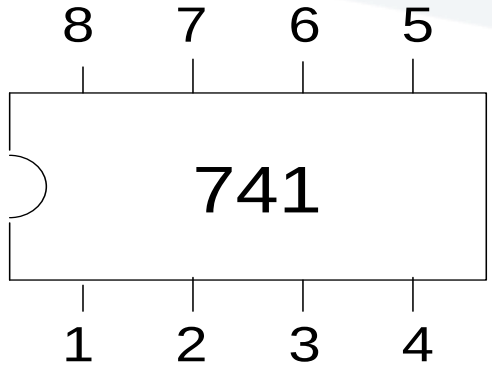
تطبيقات مضخم العمليات - *O a Application*

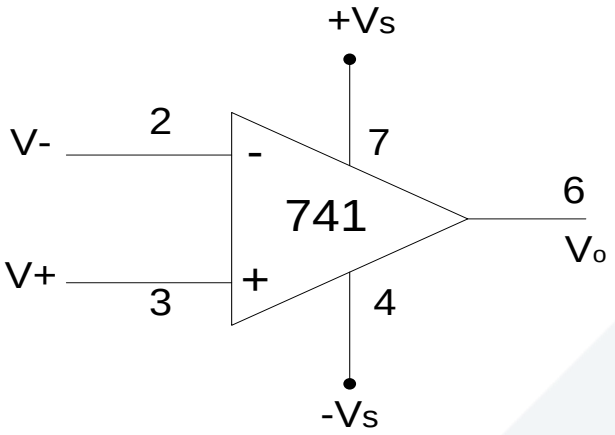
مدرس المقرر

د. السموءل صالح

The 741 Operational amplifier

الرمز الالكتروني لمضخم 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:

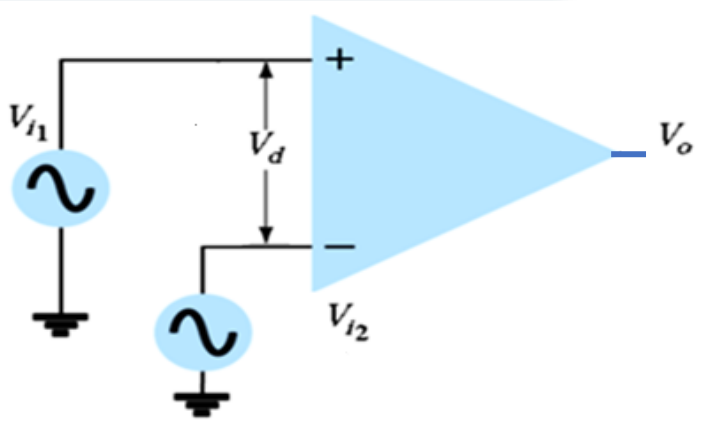
١. الرجل رقم (٢): المدخل العاكس (-) ، الرجل رقم (٣): المدخل غير العاكس (+)

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.

أ- تذكرة: حالات تشغيل مضخم العمليات 741



١- الدخل التفاضلي Differential Inputs: يتحدد الدخل التفاضلي للمضخم عند تطبيق اشارات دخل منفصلة بالعلاقة التالية، التي تمثل الفرق بين اشارات الدخل: $V_{id} = V_{i1} - V_{i2}$

٢- الدخل المشترك Common Inputs: يتحدد الدخل المشترك للمضخم عندما تكون اشارات الدخل واحدة بالعلاقة التالية، التي تمثل متوسط اشارات الدخل: $V_{ic} = \frac{1}{2}(V_{i1} + V_{i2})$

٣- جهد الخرج Output Voltage: تتحدد اشارة خرج المضخم لحالات التشغيل العامة بالعلاقة الاتية:

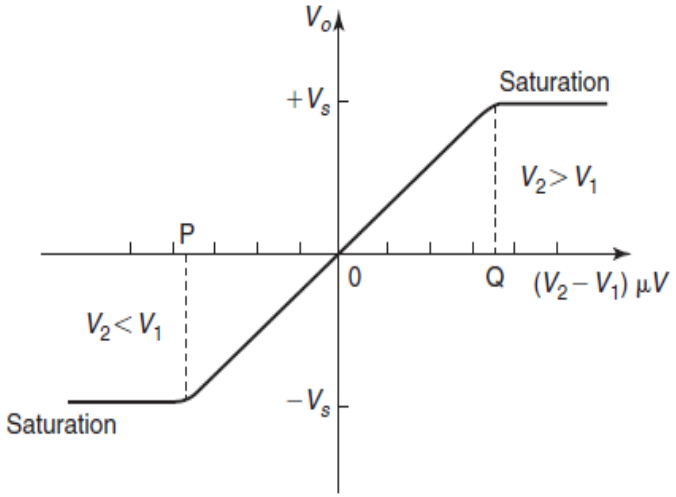
$$v_o = A_{dm}(v_{i1} - v_{i2}) + \frac{A_{cm}}{2}(v_{i1} + v_{i2})$$

$$\rightarrow \quad v_o = A_{dm}(v_{id}) + A_{cm}(v_{ic})$$

حيث: A_{dm} = Differential-mode gain ربح النمط التفاضلي

و A_{cm} = Commun-mode gain ربح النمط المشترك

ب- تذكرة: خواص النقل في الحالة العامة (النمط التفاضلي)



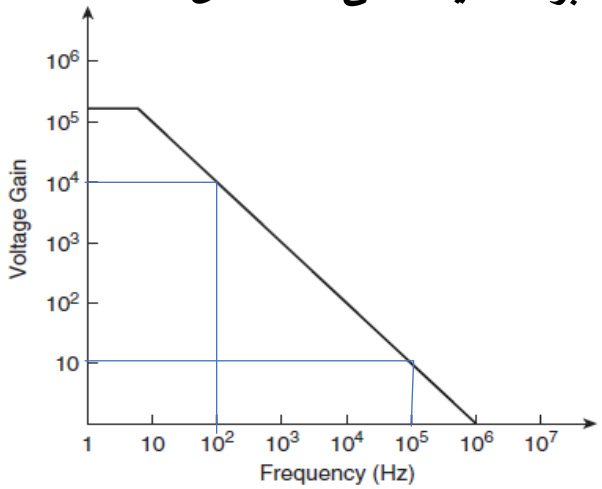
$$V_o = A_o(V_2 - V_1)$$

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

التغذية العكسية السالبة

- يستخدم مكبر العمليات التغذية العكسية السالبة *Negative Feedback* والتي نحصل عليها من التغذية العكسية لبعض أو لكل جهد الخرج إلى المدخل العاكس (-) وتنتج جهد خرج يعاكس الجهد الذي أُخذ منه.
- تقلل التغذية العكسية جهد الخرج ليتشكل ربح جهد الحلقة المغلقة A وهو أقل من ربح جهد الحلقة المفتوحة Ao.
- تعطي التغذية العكسية السالبة: ١- ربح جهد ثابت A. ٢ - تشوه أقل في جهد الخرج. ٣- استجابة ترددية أفضل.
- تتغلب التغذية العكسية على الخسارة في ربح الجهد ويمكن زيادة ربح الجهد من خلال استخدام مرحلتين أو أكثر من مكبر العمليات على التسلسل.

عرض الحزمة

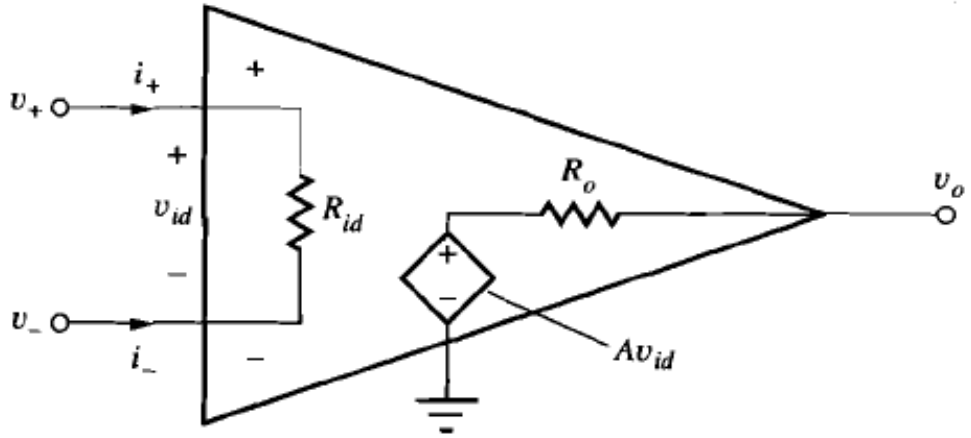


- إن ربح الجهد للحلقة المفتوحة ليس ثابتاً عند جميع الترددات حيث أنه يتناقص عند الترددات العالية.
- يظهر الشكل المجاور العلاقة بين ربح الجهد وعرض الحزمة لمكبر العمليات 741.
- عند الترددات الأقل من *10Hz* يكون الربح ثابتاً ثم يبدأ بالتناقص بمعدل ثابت (بشكل خطي) ليصل إلى 0dB.
- قيمة التردد عندما يكون ربح الحلقة المفتوحة مساوياً للواحد تقابل تردد الانتقال f_T *Transition frequency*.

تردد الانتقال f_T=*1MHz*، عند ربح 20 dB أي ($20 \log_{10} 10$) يعطي عرض حزمة قيمته 100KHz، بينما الربح ذو القيمة 80dB يعطي عرض حزمة مقدارها 100 Hz.

$$f_T = \text{closed-loop voltage gain x bandwidth}$$

الدارة المكافئة لمضخم العمليات



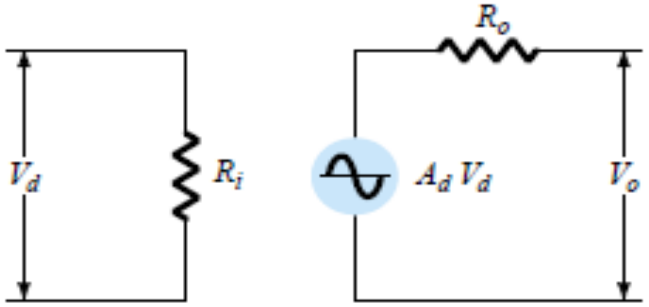
(v+ الدخل غير العاكس, و v- الدخل العاكس)

-- بهدف تحليل الاشارة يمكن تمثيل مضخم العمليات بالدارة المكافئة المبينة جانبا حيث يمثل الدخل بالمقاومة R_{id} تملك مقاومة عالية ومقاومة خرج R_o تملك مقاومة منخفضة ومنبع جهد متحكم به Av_{id}.

-- تمتلك الدارة المثالية ممانعة دخل لا نهائية، ممانعة خرج معدومة وربح جهد لا نهائي.

-- تتكون الدارة الأساسية لمكبر العمليات من مكبر تفاضلي يمتلك دخلين أساسيين (- & +) وخرج واحد على الأقل.

-- يعطي المدخل الموجب إشارة على الخرج متطابقة بالطور مع إشارة الدخل في حين أن المدخل السالب يعطي إشارة معاكسة في الطور لإشارة الدخل. يمكن تحديد البارامترات ةفق:



A = voltage gain (open-circuit voltage gain) ربح الجهد للمكبر عند الدارة مفتوحة

$v_{id} = (v_+ - v_-)$ = differential input signal voltage جهد الدخل التفاضلي

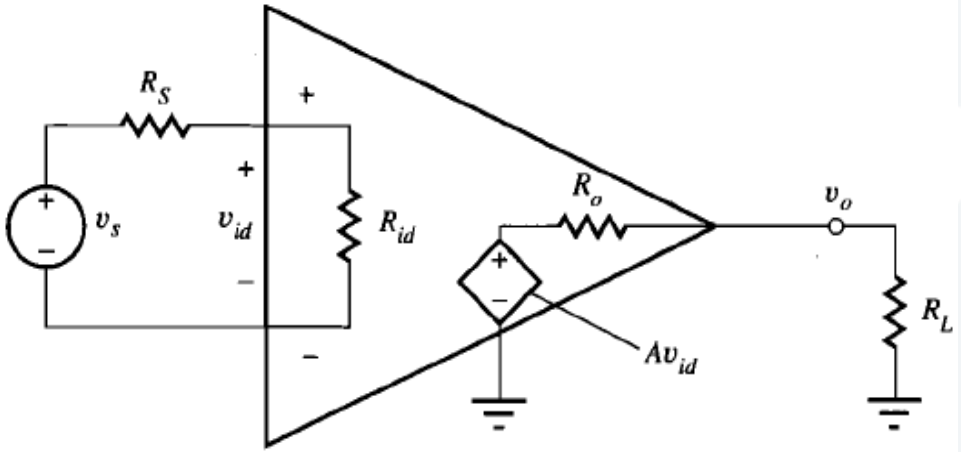
R_{id} = amplifier input resistance مقاومة الدخل للمضخم في النمط التفاضلي

R_o = amplifier output resistance مقاومة الخرج للمضخم في النمط التفاضلي

أثر كل من مقاومة المنبع والحمل على التضخيم في مكبر العمليات

-- لدراسة مكبر العمليات (في هذه الحالة) نستخدم الدارة المبينة بالشكل يطبق على الدخل جهد vs مع مقاومة R_s ويوصل إلى الخرج الحمل R_L.

Amplifier with source and load attached.



-- علاقة مقسم جهد الدخل:

$$\mathbf{v_{id}} = \mathbf{v_s}\frac{R_{id}}{R_{id} + R_S}$$

-- علاقة مقسم جهد الخرج:

$$\mathbf{v_o} = A\mathbf{v_{id}}\frac{R_L}{R_o + R_L}$$

-- علاقة تضخم الجهد:

$$A_v = \frac{\mathbf{v_o}}{\mathbf{v_s}} = A\frac{R_{id}}{R_S + R_{id}}\frac{R_L}{R_o + R_L}$$

Example:

Calculate the voltage gain for an amplifier with the following parameters:

A = 100, *Rid* =100 kΩ, and *Ro* = 100 !2, with *Rs* = 10 kΩ and *RL* = 1000 Ω. Express the result in dB.

$$A_v = 100\left(\frac{100\ \text{k}\Omega}{10\ \text{k}\Omega + 100\ \text{k}\Omega}\right)\left(\frac{1000\ \Omega}{100\ \Omega + 1000\ \Omega}\right) = 82.6$$

$$A_{v\text{dB}} = 20\log|A_v| = 20\log|82.6| = 38.3\ \text{dB}$$

بعض بارامترات مكبر العمليات

١- تيار انحياز الدخل I_B: هو متوسط تياري الدخلين عندما يكون الخرج معدوماً ويقدر بحوالي 80nA من أجل مكبر العمليات ٧٤١.يسبب تيار انحياز الدخل هبوطاً في الجهد من خلال ممانعة المنبع المكافئة والمرئية من دخل مكبر العمليات.

٢- تيار إزاحة الدخل Ios: هو الفرق بين تياري الدخلين عندما يكون الخرج معدوماً. في مكبر العمليات ٧٤١ تكون قيمة هذا التيار مساوية 20nA.

٣- جهد إزاحة الخرج Vos: في مكبر العمليات المثالي يجب أن يكون الخرج مساوياً للصفر عندما يكون دخلي المكبر معدومين، ولكن بسبب عدم مثالية مكبر العمليات فإنه يظهر جهد بقيمة صغيرة عندما يكون جهدي الدخل معدومين. للتغلب على هذا الأثر نقوم بتطبيق جهد إزاحة الدخل على المكبر. في مكبر العمليات ٧٤١تعطى قيمة هذا الجهد بـ 1mV .

٤- نسبة رفض النمط المشترك: يتناسب جهد الخرج لمكبر عمليات مع الفرق بين قيمتي الجهدين المطبقين على مدخليه. بالشكل المثالي، عندما يكون هذين الجهدين متساويين فإن جهد الخرج يجب أن يساوي الصفر. تسمى الإشارة المطبقة على مداخل مكبر العمليات إشارة النمط المشترك والتي تكون عادة عبارة عن ضجيج غير مرغوب به. تسمى قدرة مكبر العمليات على حذف هذه الإشارة بنسبة رفض النمط المشترك وتعطى بالعلاقة:

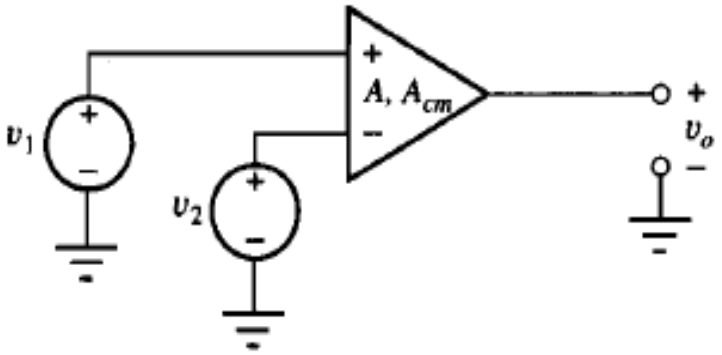
$$\mathrm{CMRR} = 20\log_{10}\left(\frac{\text{differential voltage gain}}{\text{common mode gain}}\right)\mathrm{dB}$$

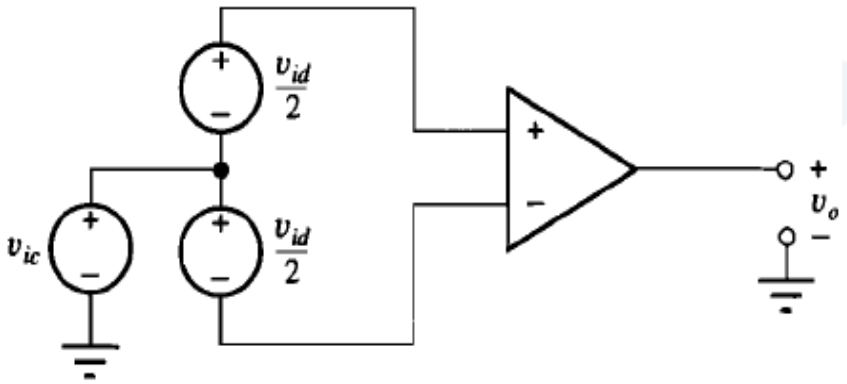
٥- ربح النمط المشترك Acom : هو النسبة بين جهد الخرج وجهد الدخل المشترك.

$$A_{com} = \frac{V_o}{V_{com}}$$

نسبة رفض النمط المشترك

-- يعرف بارامتر نسبة رفض النمط المشترك من المرحلة الاولى لمكبر العملية وهي مرحلة التضخيم التفاضلي والتي درست سابقا ويعاد تحديدها هنا بالنسبة للمضخم ٧٤١ وفق الاستنتاج الاتي:





-- تعطى علاقة جهد خرج المضخم في الحالة العملية (غير المثالية) كما رأينا سابقا بالعلاقة:

$$v_o = A(v_{id}) + A_{cm}(v_{ic})$$

-- يمكن استنتاج نسبة رفض النمط المشترك من علاقة الخرج:

$$v_o = Av_{id}(1 + \frac{A_{cm}v_{ic}}{A_{dm}v_{id}}) = Av_{id}(1 + \frac{1}{CMRR}\frac{v_{ic}}{v_{id}})$$

$$CMRR = \frac{A_{dm}}{A_{cm}}$$

وجدنا عند دراسة المضخم الترانزستور التفاضلي والذي يمثل المرحلة الاولى لمكبر العمليات أن:

$$v_{id} = (v_1 - v_2) = \text{differential-mode input voltage}$$

$$v_{ic} = \left(\frac{v_1 + v_2}{2}\right) = \text{common-mode input voltage}$$

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

نسبة رفض النمط المشترك

-- كما رأينا: المكبر المثالي يضخم اشارة الفرق ويرفض اشارة النمط المشترك ($A_{cm} = 0$) لكن المكبر الفعلي يملك قيمة لا تساوي الصفر A_{cm}.

-- يمكن استنتاج علاقة نسبة رفض النمط المشترك *CMRR* بشكل ثان من علاقة جهد خرج المضخم في الحالة العملية :

$$v_o = A\left[v_{id} + \frac{A_{cm}v_{ic}}{A}\right] = A\left[v_{id} + \frac{v_{ic}}{\text{CMRR}}\right] \quad \Rightarrow \quad \text{CMRR} = \left|\frac{A}{A_{cm}}\right|$$

-- يمكن التعبير غالبا عن نسبة رفض النمط المشترك بالـ dB وفق:

$$\text{CMRR}_{\text{dB}} = 20\log\left|\frac{A}{A_{cm}}\right| \text{ dB}$$

-- **ملاحظات:** ١- بالنسبة للمكبر المثالي تكون نسبة رفض النمط المشترك $A_{cm} = 0$ بالنتيجة تكون الـ *CMRR* لانهائية .

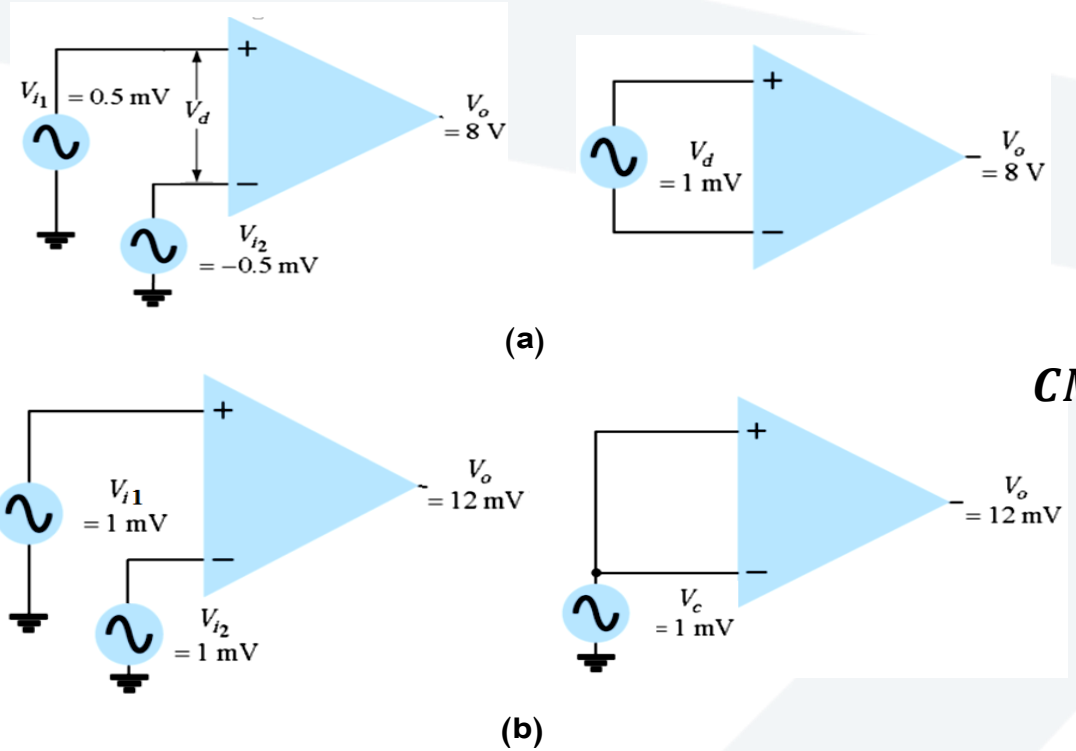
٢- بالنسبة للمضخم الفعلي يملك $A >> A_{cm}$ وتكون قيمة نسبة رفض النمط المشترك الـ *CMRR* محصورفي المجال المبين:

$$60 \text{ dB} \leq \text{CMRR}_{\text{dB}} \leq 120 \text{ dB}$$

٣- تعتبرقيمة الـ 60 dB لنسبة رفض النمط المشترك نسبيا قيمة ذات مستوا ضعيفا لأنه من الممكن الحصول على نسبة CMRR تصل للـ 120 dB أو اكثر.

٤- عند العمل على قيم كبيرلـ CMRR فان الخرج ينتج فقط عن تضخيم الدخل التفاضلي لاننا نهمل المركبة الخاصة بالدخل المشترك في المعادلة.

مثال: احسب $CMRR$ لقياسات الدارة المبينة على الشكل.



الحل:

من نتائج القياس الاول في الشكل a نحدد عامل الربح التفاضلي A_d

$$A_d = \frac{V_o}{V_d} = \frac{8}{1\ mV} = 8000$$

من نتائج القياس الثاني في الشكل b نحدد عامل الربح المشترك A_c

$$A_c = \frac{V_o}{V_c} = \frac{12\ mV}{1\ mV} = 12$$

وبالتاي يكون نسبة رفض الحالة المشتركة: $CMRR = \frac{A_d}{A_c} = \frac{8000}{12} = 666.7$

كما يمكن التعبيرعن نسبة رفض الحالة المشتركة بالديسبيل وفق ما يلي:

$$CMRR\ (log) = 20\ log_{10}\ \frac{A_d}{A_c}$$

$$= 20\ log_{10}\ \frac{8000}{12} = 56.48\ \ (dB)$$

نلاحظ ان عامل الربح التفاضلي عالي وعامل الربح المشترك منخفض، وهذا يعود لسبب انه في حالة العمل على اشارات دخل متعاكسة، فان اشارة الخرج سوف تكون مرتفعة بشكل كبير (A_d مرتفع)، في حين، عند العمل على اشارات متو افقة (حالة العمل المشترك) تكون اشارة الخرج منخفضة (A_c منخفض).

مثال 1: حدد ربح النمط المشترك لمكبر عمليات لديه ربح جهد تفاضلي قيمته ١٥٠٠٠٠ونسبة رفض النمط المشترك CMRR تساوي 90 dB.

من المعادلة

$$\text{CMRR} = 20\log_{10}\left(\frac{\text{differential voltage gain}}{\text{common-mode gain}}\right)\text{dB}$$

بالتالي:

$$90 = 20\log_{10}\left(\frac{150\times10^3}{\text{common-mode gain}}\right) \leftarrow 4.5 = \log_{10}\left(\frac{150\times10^3}{\text{common-mode gain}}\right) \leftarrow 10^{4.5} = \left(\frac{150\times10^3}{\text{common-mode gain}}\right)$$

ربح النمط المشترك

$$\rightarrow \quad \textbf{common-mode gain} = \frac{150\times10^3}{10^{4.5}} = \textbf{4.74}$$

مثال2: مكبر عمليات يمتلك ربح حلقة مفتوحة يساوي ١٢٠وإشارة دخل مشترك بقيمة 3V مطبقة على مدخلي المكبر. إشارة الخرج الناتجة تساوي 24mV.

احسب ربح النمط المشترك ونسبة رفض النمط المشترك

ربح النمط المشترك

$$A_{\text{com}} = \frac{V_o}{V_{\text{com}}} = \frac{24\times10^{-3}}{3.0} = 8\times10^{-3} = 0.008$$

نسبة رفض النمط المشترك

$$\text{CMRR} = 20\log_{10}\left(\frac{\text{differential voltage gain}}{\text{common-mode gain}}\right)\text{dB} \quad \rightarrow \quad \text{CMRR} = 20\log_{10}\left(\frac{120}{0.008}\right) = 20\log_{10}15000 = \textbf{83.52 dB}$$

مثال:

حدد جهد الخرج لمضخم عملياتي عندما تكون اشارات جهود الدخل $V_{i2} = 140\ \mu V$ و $V_{i1} = 150\ \mu V$. و $A_d = 4000$ وذلك عند قيمتي الاتيتين 10^5 & $CMRR = 100$ ثم قارن النتيجة.

الحل:

$$V_d = V_{i_1} - V_{i_2} = (150 - 140)\ \mu\text{V} = 10\ \mu\text{V}$$

$$V_c = \frac{1}{2}(V_{i_1} + V_{i_2}) = \frac{150\ \mu\text{V} + 140\ \mu\text{V}}{2} = 145\ \mu\text{V}$$

$$V_o = A_d V_d\left(1 + \frac{1}{\text{CMRR}}\frac{V_c}{V_d}\right) = (4000)(10\ \mu\text{V})\left(1 + \frac{1}{100}\frac{145\ \mu\text{V}}{10\ \mu\text{V}}\right) = 40\ \text{mV}(1.145) = \mathbf{45.8\ mV}$$

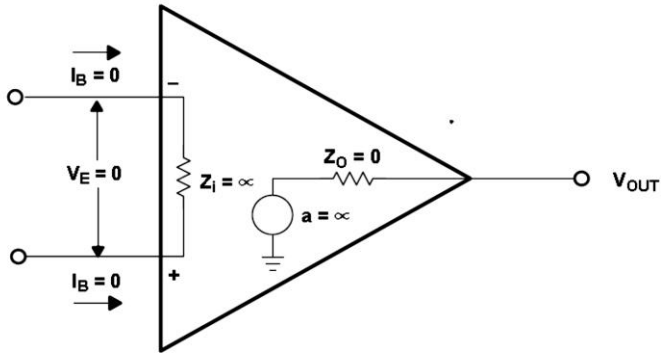
$$V_o = (4000)(10\ \mu\text{V})\left(1 + \frac{1}{10^5}\frac{145\ \mu\text{V}}{10\ \mu\text{V}}\right) = 40\ \text{mV}(1.000145) = \mathbf{40.006\ mV}$$

مميزات مكبر العمليات المثالي

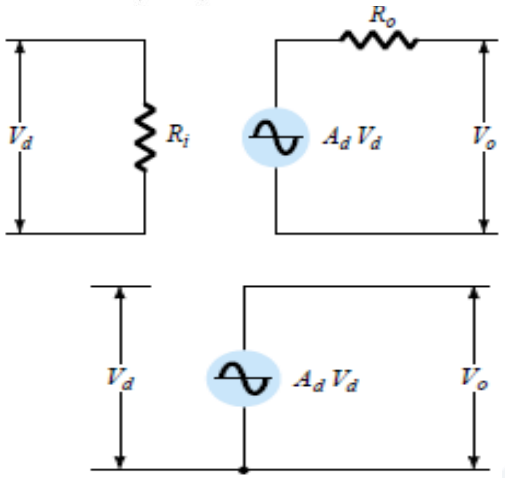
-- ينتج مكبر العمليات المثالي خرجا معتمدا فقط على فرق الجهد بين مدخليه (العاكس وغير العاكس) v_{id} ويكون هذا الجهد مستقلا عن المنبع ومقاومة الحمل.

-- يضخم اشارة الفرق ويرفض اشارة النمط المشارك ($A_{cm} = 0$) أما الفعلي فتكون ($A_{cm} \neq 0$).

-- مقاومة دخل مضخم العمليات المثالي لانهائية ومقاومة خرجه تساوي الصفر.



1. The Ideal Op Amp



$Rid = \infty \quad and \quad Ro = 0$ ⟹ $v_o = A v_{id}$ or $A_v = \frac{v_o}{v_{id}} = A$

-- ربح المكبر يساوي الى ربح الحلقة المفتوحة وهو يعبر عن القيمة العظمى التي يمكن الحصول عليها من مكبر العمليات

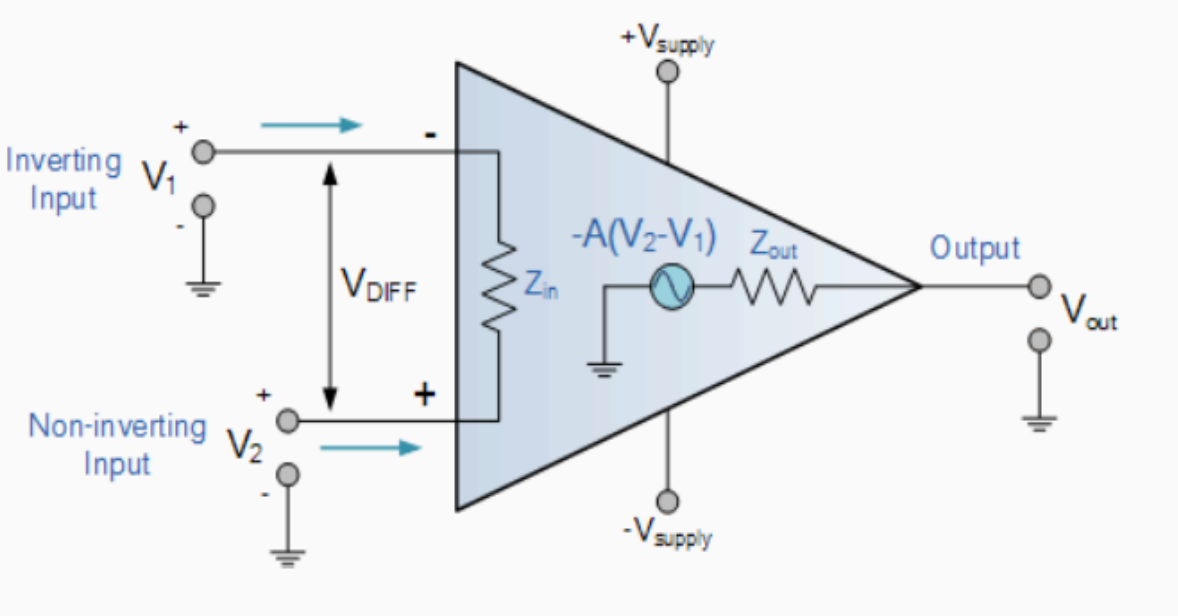
-- الجهد المطبق على المدخل العاكس يساوي الى الجهد المطبق على المدخل غير العاكس $v+ = v-$ هذا يؤدي الى:

$$v_{id} = v_+ - v_- = 0 \longrightarrow A_v = v_o / v_{id} = \infty$$

يمكن أن نلخص:

1. $A \longrightarrow \infty \Rightarrow v_E = v_{id} = 0 \quad (v+ = v-)$
2. $Z_{in} \longrightarrow \infty \Rightarrow i+ = i-$
3. $R_o = 0$
4. $CMRR \longrightarrow \infty$

بعض تطبيقات مكبر العمليات



- المكبر العاكس
- المكبر غير العاكس
- متتبع الجهد
- المكبر الجامع
- مقارن الجهد
- المكبر التكاملي
- المكبر التفاضلي
- مرشح تمرير ترددات منخفضة
- مرشح تمرير ترددات عالية
- مرشح تمرير حزمة
- مبدل رقمي تشابهي
- مبدل تشابهي رقمي

المكبر العملياتي العاكس (Op amp inverting amplifier)

المدخل غير العاكس موصول إلى الأرضي والمدخل العاكس يطبق عليه جهد الدخل المراد تضخيمه

من حلقة الخرج- دخل نكتب: $v_s - i_s R_1 - i_2 R_2 - v_o = 0$

من عقدة المدخل العاكس نكتب:

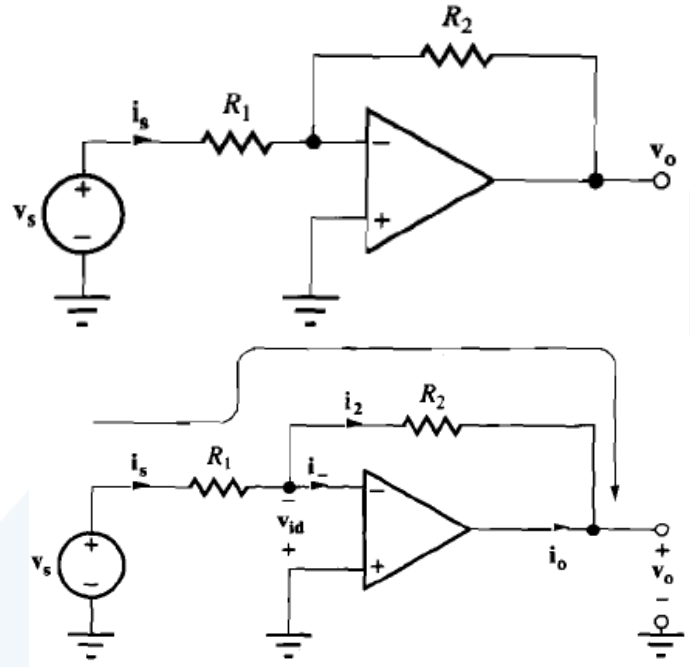
But $i_s = i_- + i_2$ & $i_- = 0 \rightarrow i_s = i_2$

and $v_{id} = v_+ - v_- = 0 \quad v_+ = 0 \Rightarrow v_- = 0$

$\rightarrow v_s - i_s R_1 - i_s R_2 - v_o = 0$ (*) But $i_s = \dfrac{v_s - v_-}{R_1} = \dfrac{v_s}{R_1}$

نعوض قيمة التيار i_s بالعلاقة (*) فنحصل:

$\Rightarrow \quad -v_s \dfrac{R_2}{R_1} - v_o = 0 \quad$ or $\quad v_o = -v_s \dfrac{R_2}{R_1}$



$$A_v = \frac{v_o}{v_s} = -\frac{R_2}{R_1}$$

-- تظهر العلاقة أن ربح الحلقة المغلقة يتعلق فقط بالمقاومتين R_2 و R_1 وليس بخصائص مكبر العمليات.

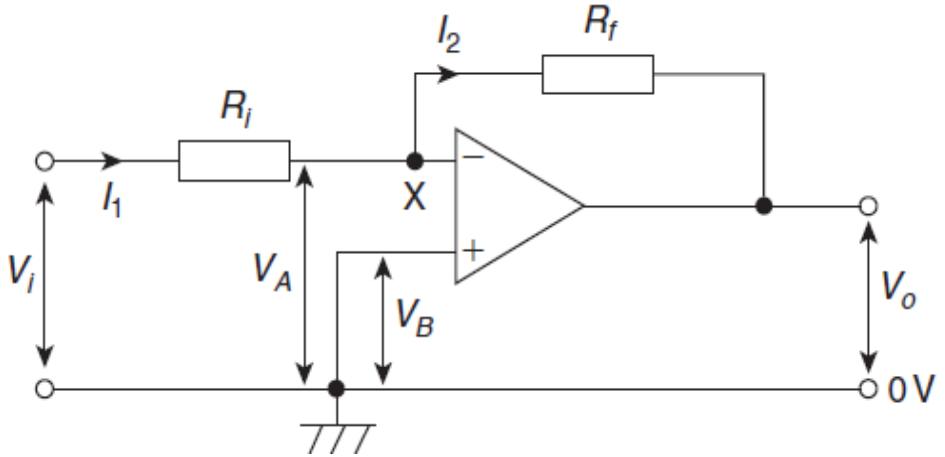
-- فرق طور = 180 درجة.

-- ربح الجهد بمكن أن يكون أكبر أو أصغر من الواحد حسب قيم المقاومات المدخل العاكس يعتبر أرض وهمية (التيار =صفر) وهو غير موصول إلى الأرضي.

بعض تطبيقات مكبر العمليات

المكبر العملياتي العاكس (Op amp inverting amplifier)

حل دارة المكبر العاكس بطريقة أخرى



- يبين الشكل المجاور الدارة الأساسية للمكبر العاكس والتي فيها يطبق جهد الدخل Vi المراد تكبيره من خلال المقاومة Ri على المدخل العاكس (-) ولذلك فإن جهد الخرج Vo يعاكس بالطور جهد الدخل.
- جهد المدخل غير العاكس يساوي الصفر .
- تنفذ التغذية العكسية السالبة من خلال المقاومة R_f وذلك بنقل أجزاء من جهد الخرج إلى الدخل العاكس

ربح التكبير في حالة مكبر العمليات المثالي، تطرح فرضيتين أساسيتين:

١. ممانعة الدخل لمداخل مكبر العمليات لا نهائية (لا يوجد تيار مستجر من المنبع) إذا $I_1=I_2$ من عقدة المدخل العاكس.

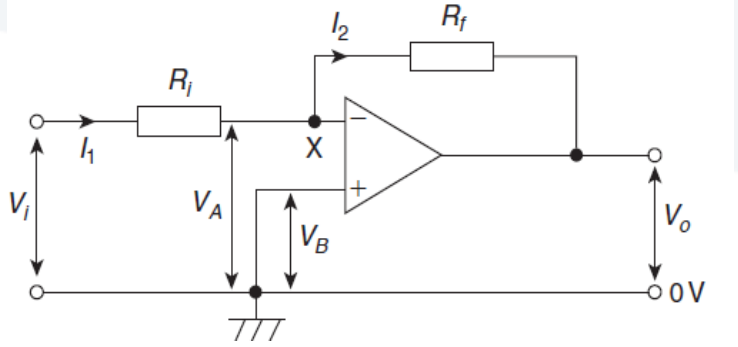
٢. يمتلك مدخلي مكبر العمليات نفس قيمة الجهد وذلك في حالة أن هذا المكبر غير مشبع ($V_A=V_B$)

من الشكل أعلاه: $V_B=0$ وبالتالي $V_A=0$ ومن الفرضية الأولى تكون نسبة التضخيم معطاة بالعلاقة:

$$I_1 = \frac{V_i - 0}{R_i} \text{ and } I_2 = \frac{0 - V_o}{R_f}$$

$$\frac{V_i}{R_i} = -\frac{V_o}{R_f},$$

المكبر العملياتي العاكس (Op amp inverting amplifier)



ربح التكبير: تظهر العلاقة $\frac{V_i}{R_i} = -\frac{V_o}{R_f}$، أن Vo يكون سالباً عندما Vi يكون موجباً والعكس صحيح.

ربح الحلقة المغلقة A يعطى بالعلاقة :

$$A = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-R_f}{R_i}$$

نلاحظ: أن A يتعلق فقط بالمقاومتين R_f و R_i وليس بخصائص مكبر العمليات.

مثال: ليكن لدينا المكبر العاكس المبين سابقاً والذي فيه Ri=1 kΩ و Rf= 2kΩ. حدد جهد الخرج عندما يكون جهد الدخل (١) +0.4 V (٢) -1.2 V

الحل: من المعادلة المبينة أعلاه يمكن أن نكتب

$$V_o = \left(\frac{-R_f}{R_i}\right) V_i$$

(١)

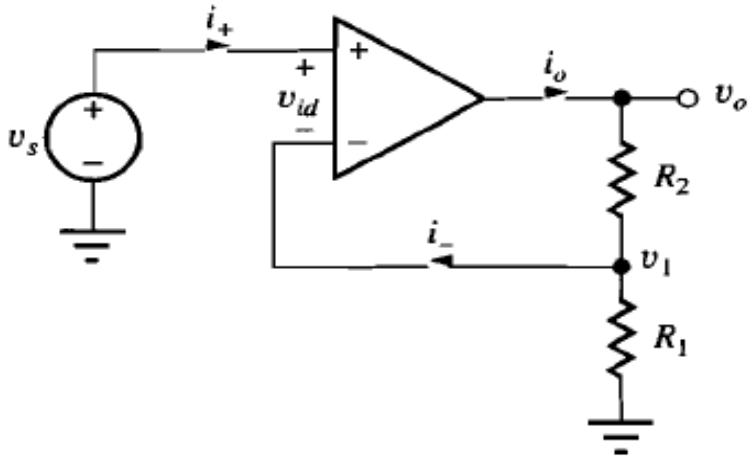
$$V_o = \left(\frac{-2000}{1000}\right)(+0.4) = -0.8\,\text{V}$$

(٢)

$$V_o = \left(\frac{-2000}{1000}\right)(-1.2) = +2.4\,\text{V}$$

المكبر غير العاكس

Op amp non-inverting amplifier



- يظهر الشكل الدارة الأساسية للمكبر غير العاكس حيث يطبق جهد الدخلِ *Vs* (مستمر أو متناوب) على المدخل غير العاكس (+) وبالتالي فإن جهد الخرج يماثل في الطور جهد الدخل.
- يمكننا الحصول على التغذية العكسية السالبة من خلال التغذية العكسية للمدخل العاكس.
- يمكن استنتاج علاقة التكبير وفق:

-- علاقة مقسم جهد:

$$\mathbf{v_1} = \mathbf{v_o}\frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

-- باستخدام الحلقة التي تحوي كل من V_s و V_{id} كذلك V_1 نحصل على :

$$\mathbf{v_s} - \mathbf{v_{id}} = \mathbf{v_1} \qquad \mathbf{v_{id}} = 0 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{v_s} = \mathbf{v_1}$$

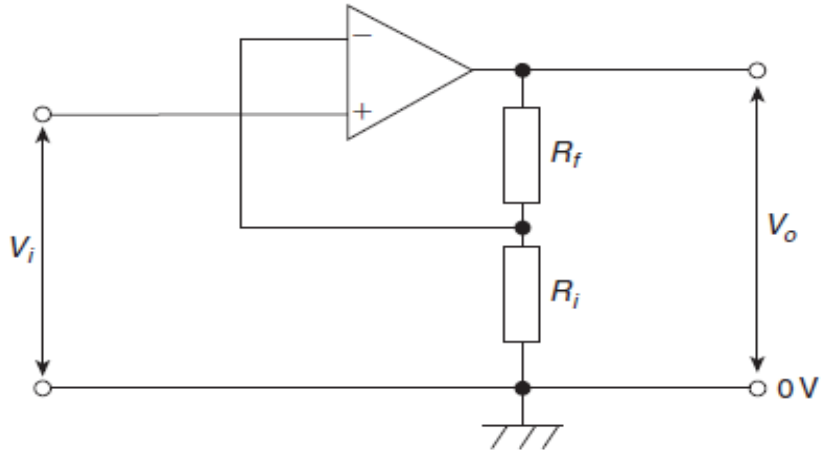
-- بالتعويض في علاقة مقسم جهد السابقة فنحصل على ربح الجهد وهو أكبر من الواحد:

$$A_v = \frac{\mathbf{v_o}}{\mathbf{v_s}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

$$R_{in} = \frac{\mathbf{v_s}}{\mathbf{i_+}} = \infty \qquad \text{because } \mathbf{i_+} = 0$$

$$R_{out} = 0$$

- يظهر الشكل تصميم اخر للمكبر غير العاكس حيث يطبق جهد الدخل *Vi* (مستمر أو متناوب) على المدخل غير العاكس (+) وبالتالي فإن جهد الخرج يماثل في الطور جهد الدخل.
- يصرف جزء من جهد الخرج *Vo* ضمن المقاومة R_i وذلك من خلال مقسم الجهد المكون من R_f , R_i , *Vo*.



ربح التكبير

ليكن لدينا معامل التغذية العكسية: $\beta = \frac{R_i}{R_i + R_f}$

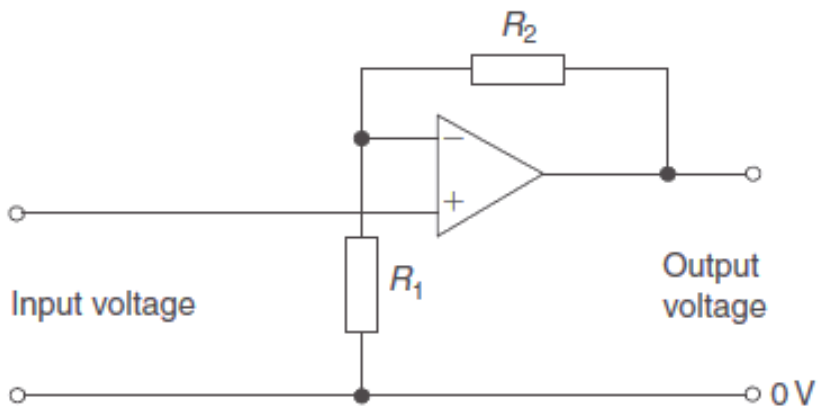
علاقة ربح جهد الحلقة المغلقة لمكبر عمليات بربح جهد حلقة مفتوحة Ao يعطى بالعلاقة: $A = \frac{A_o}{1 + \beta A_o}$

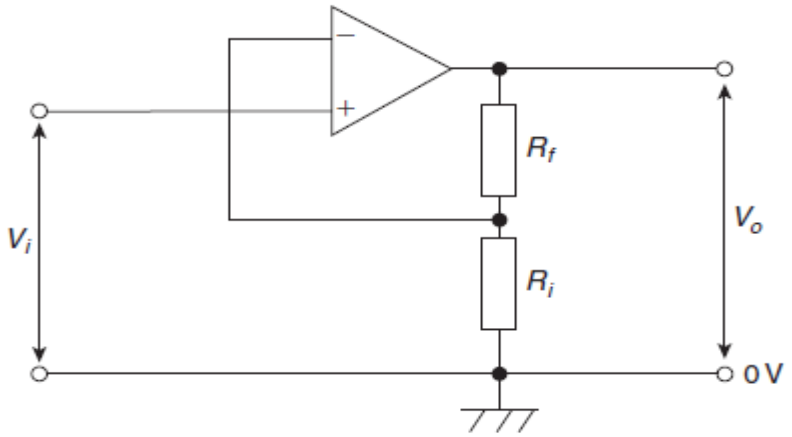
من أجل مكبر عمليات مثالي يكون $A_o = 10^5$ وبالتالي βAo كبير مقارنة مع *1* وبالتالي:

$$A = \frac{A_o}{\beta A_o} = \frac{1}{\beta} \quad \Rightarrow \quad A = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_i + R_f}{R_i} = 1 + \frac{R_f}{R_i}$$

المكبر غير العاكس

Op amp non-inverting amplifier





مثال: ليكن لدينا المكبر المبين في الشكل المجاور فيه $R_1=4.7\,k\Omega$ و $R_2=10\,k\Omega$، إذا كان جهد الدخل يساوي $-0.4V$ حدد (١) ربح الجهد (٢) جهد الخرج.

الحل: يمثل المكبر المبين أعلاه مكبر غير عاكس حيث أنه يطابق الشكل المبين جانباً والذي يمثل مكبر غير عاكس

(١) يعطى ربح الجهد بالعلاقة:

$$A = 1 + \frac{R_f}{R_i} \Rightarrow A = 1 + \frac{R_2}{R_1} = 1 + \frac{10 \times 10^3}{4.7 \times 10^3}$$

$$= 1 + 2.13 = \mathbf{3.13}$$

(٢) جهد الخرج يعطى بالعلاقة:

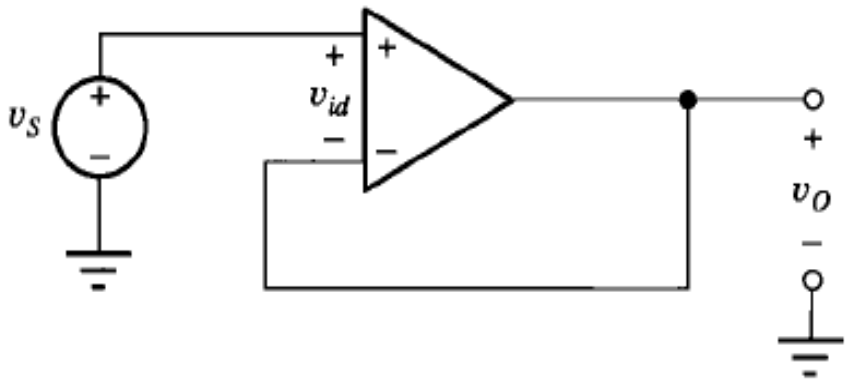
$$V_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_i$$

$$V_o = (3.13)(-0.4) = \mathbf{-1.25\,V}$$

المكبر ذو الربح الواحدي أو متتبع الجهد

Op amp voltage-follower

-- متتبع الجهد هو حالة خاصة من المكبر غير العاكس والذي نحصل فيه على تغذية عكسية كاملة (100%) وذلك من خلال وصل الخرج مباشرة مع المدخل العاكس لمكبر العمليات وبالتالي فإن R_f الموجودة في المكبر غير العاكس تقابل في حالة متتبع الجهد قيمة الصفر في حين أن R_i تكون لا نهائية.

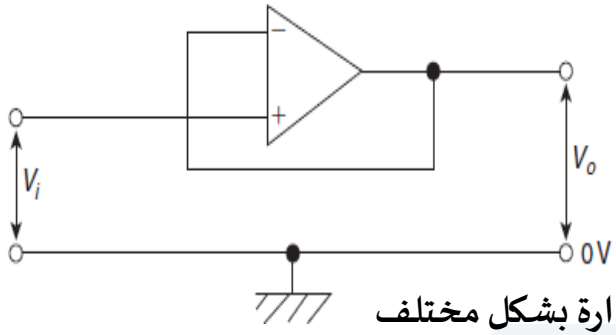


$$\mathbf{v_s - v_{id} = v_o} \quad \text{or} \quad \mathbf{v_o = v_s} \text{ and } A_v = 1$$

$$R_{in} \rightarrow \infty \qquad R_{out} = 0$$

-- يعطى ربح الحلقة المغلقة A (عندما يكون ربح الحلقة المفتوحة كبيراً جداً) بالعلاقة $A=1/\beta$ وبما أن كل الخرج يغذى به عكسياً فإن $\beta=1$ و $A\approx1$ تسمى الدارة المبينة في الشكل أعلاه دارة متتبع جهد حيث أن Vo يتتبع Vi. تستخدم هذه الدارة بشكل أساسي كمكبر عازل (Buffer Amplifier) تصل بين منبع بممانعة عالية مع حمل بممانعة منخفضة.

<u>على سبيل المثال:</u> تستخدم هذه الدارة كمرحلة دخل لمقياس جهد تشابهي حيث يجب أن تكون ممانعة الدخل أكبر ما يمكن كي لا تسبب اضطراب في الدارة المقاسة.



الدارة بشكل مختلف