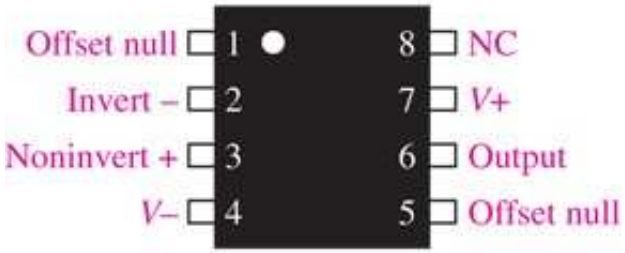
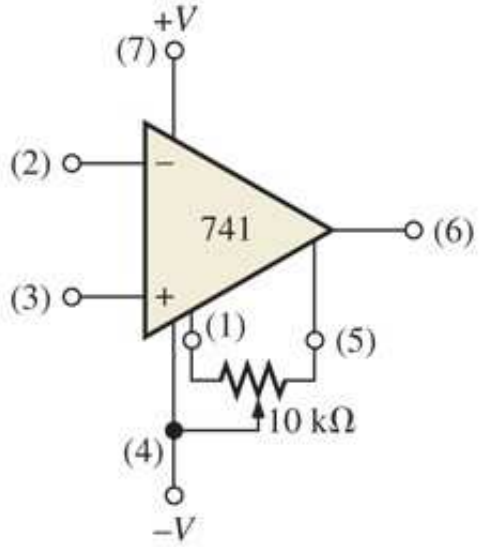
CHAPTER 7

The Ideal Operational Amplifiers





1. مقدمة: Introduction

- هو دارة إلكترونية تماثلية استخدمت في البداية لتحقيق العديد من التطبيقات الهامة كالحاسبات التماثلية وأجهزة المعقدة.

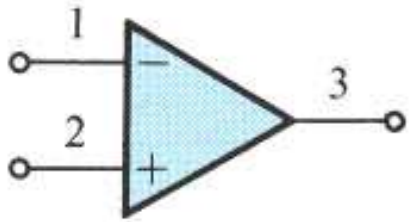
- صُممت مكبرات العمليات البدائية باستخدام العناصر المنفردة وبكلفة عالية تسبياً.

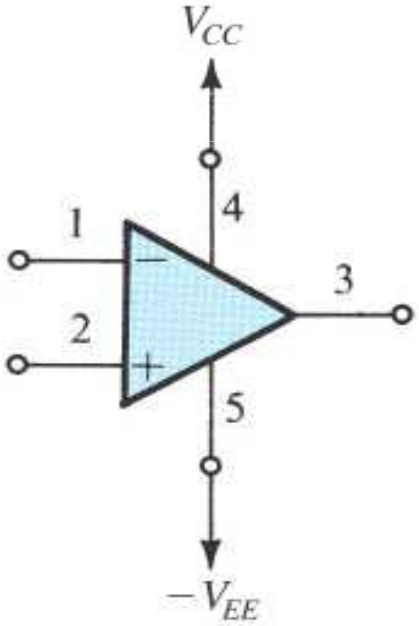
- في منتصف الستينات من القرن الماضي كان الظهور الأول لمكبر العمليات التكاملي بخصائص متواضعة وكلفة عالية. ونتيجة للاستثمار الواسع لهذه الدارة، طوَّرها مصنعو أنصاف النواقل لتصبح ذات جودة عالية وتكلفة منخفضة.

- يستخدم مكبر العمليات في الوقت الراهن لتصميم الكثير من الدارات التماثلية ذات الاداء المميز نتيجة خصائصه القريبة من المثالية ونتيجة تصنيعه بشكل تكاملي

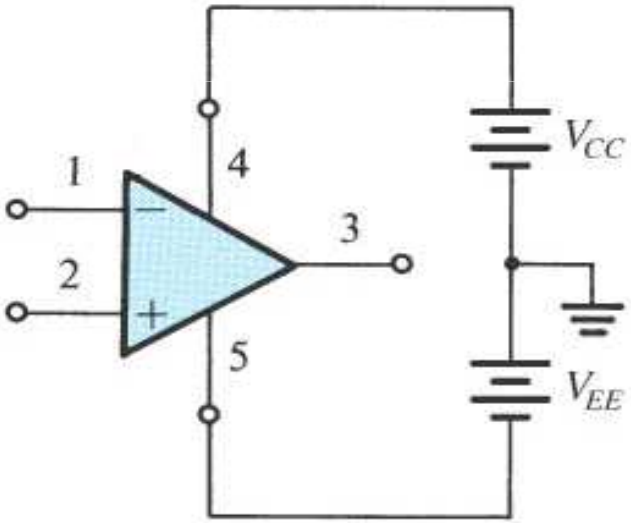
- تتألف دارة مكبر العمليات من العشرات من الترانزستورات والمقاومات، وعادةً ما يضاف مكثفة وحيدة له.

2. مكبر العمليات المثالي: The Ideal Op-Amps



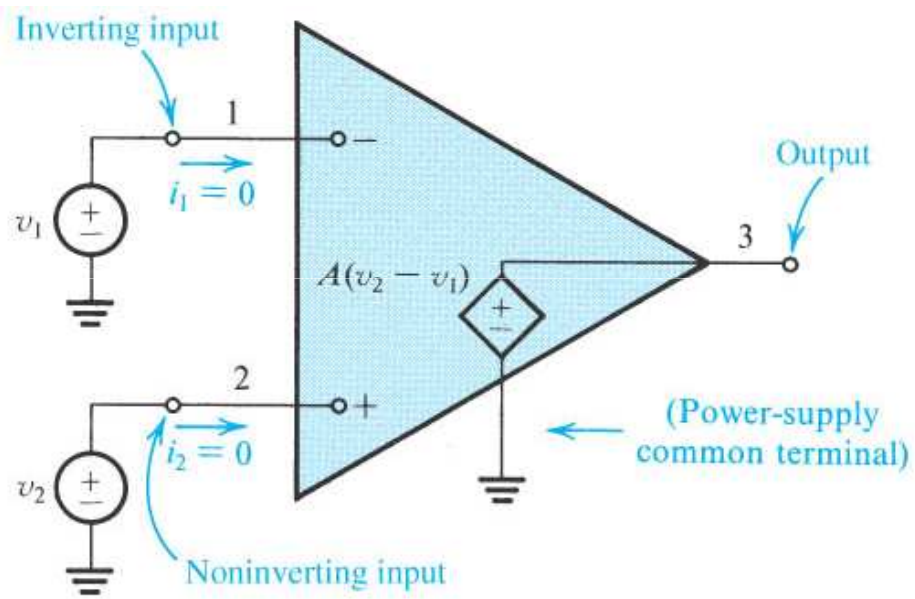


(a)



(b)

3. عمل وخصائص مكبر العمليات المثالي:
Function and Characteristics of the Ideal Op-Amp

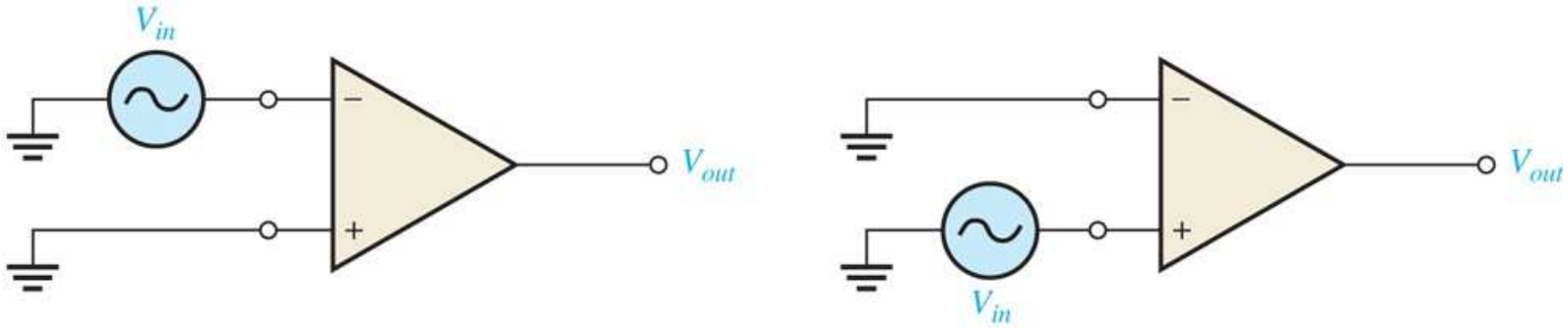


Equivalent circuit of the ideal op-amp.

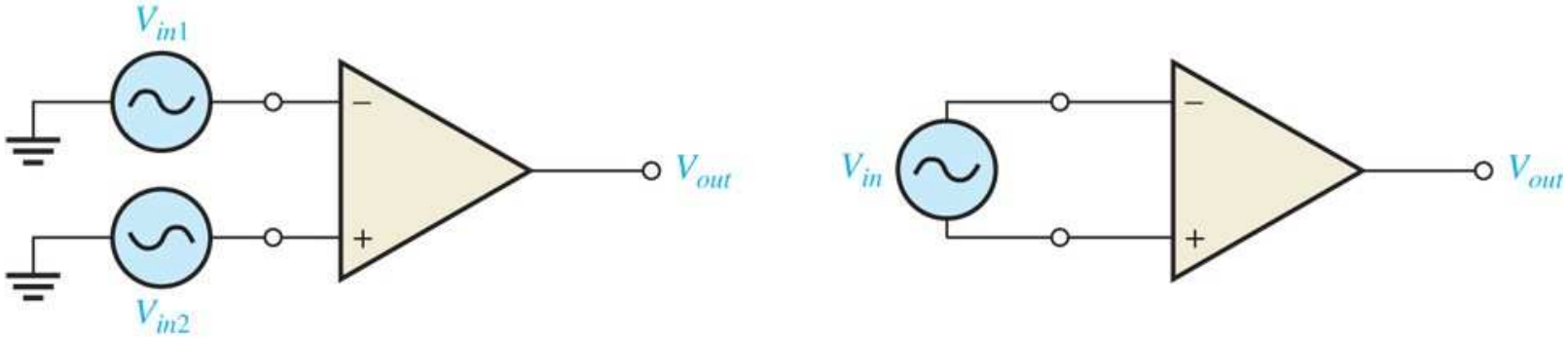
- ممانعة الدخل لا نهائية
- ممانعة الخرج معدومة
- ربح النمط المشترك معدوم
- الحلقة المفتوحة لا نهائي
- عرض المجال الترددي لا نهائي

4. أنماط الإشارة: Signal Modes

1.4 إشارة النمط التفاضلي: Differential-Mode Signal



إشارات النمط التفاضلي تُطبق على أحد المدخلين حيث يكون المدخل الثاني مؤرض

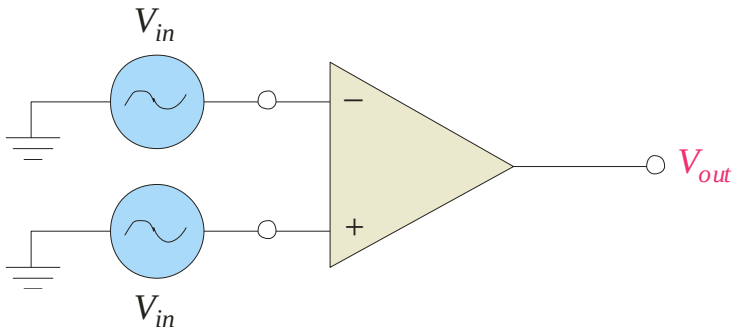


إشارات النمط التفاضلي تُطبق على المدخلين إشارتين متعاكستين بالصفحة

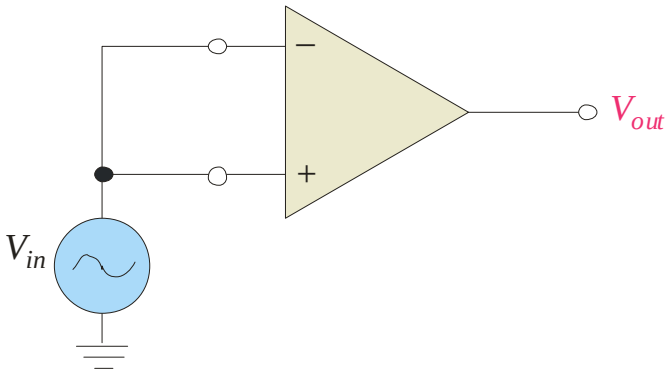
إشارة الدخل التفاضلي الفرق بين الإشارتين المطبقتين على مدخلي مكبر العمليات:

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

2.4 إشارة النمط المشترك: Common-Mode Signal

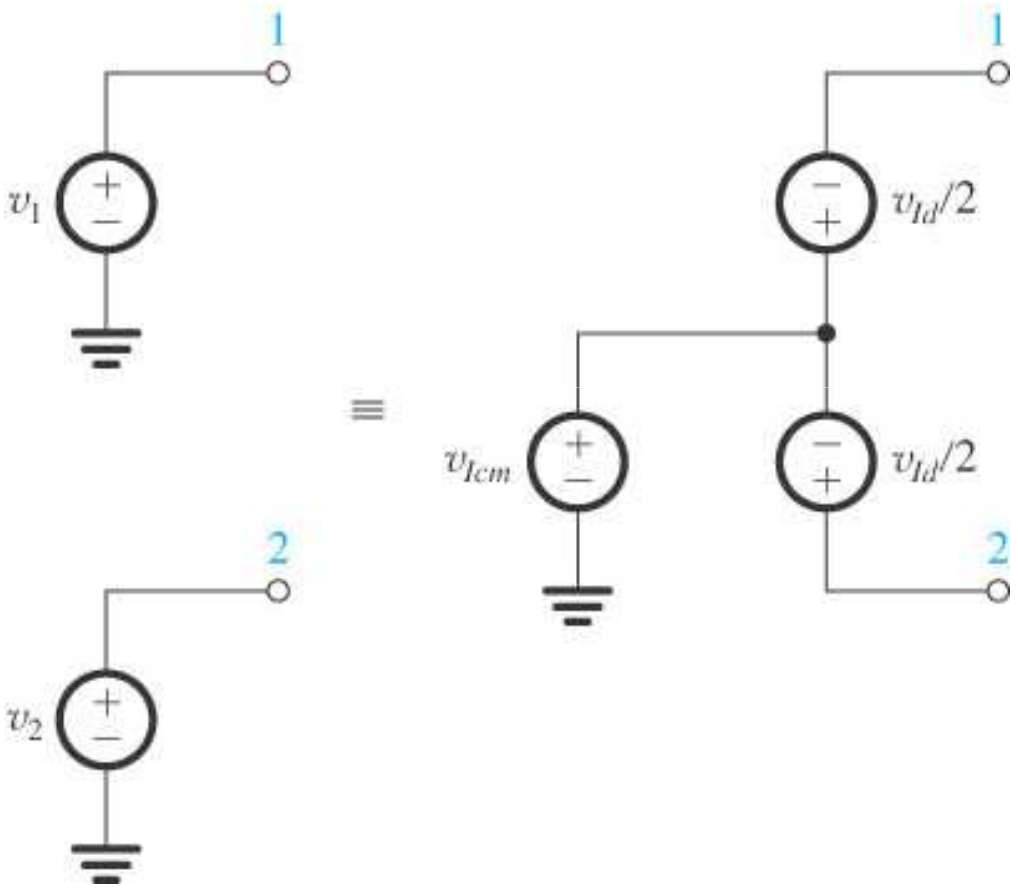


إشارات النمط المشترك: نطبق على كلا المدخلين إشارتين متماثلتين، أو نفس الإشارة بعد ربط المدخلين معاً



$$v_{Icm} = \frac{1}{2}(v_2 + v_1)$$

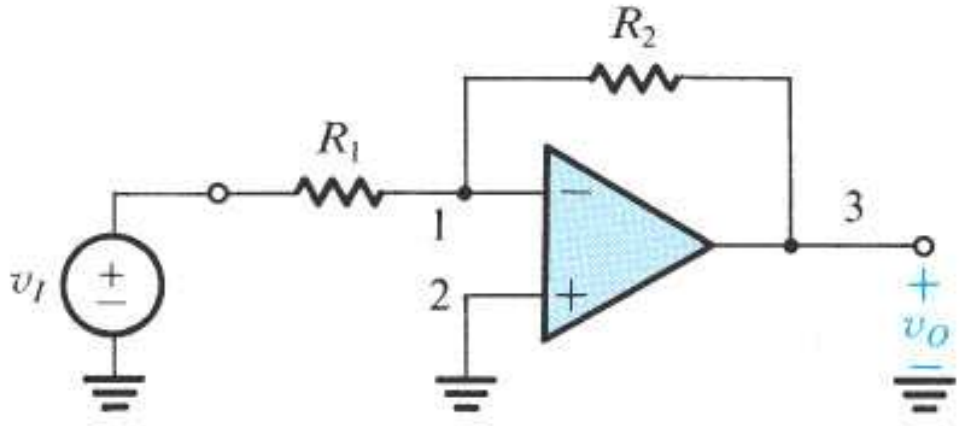
يمكن إعادة كتابة إشارتي الدخل $v1, v2$ باستخدام المعادلتين الواصفتين لإشارة الدخل التفاضلي والنمط المشترك على النحو التالي:



$$v_1 = v_{Icm} - v_{Id}/2$$

$$v_2 = v_{Icm} + v_{Id}/2$$

5. المكبر العاكس: The Inverting Amplifier



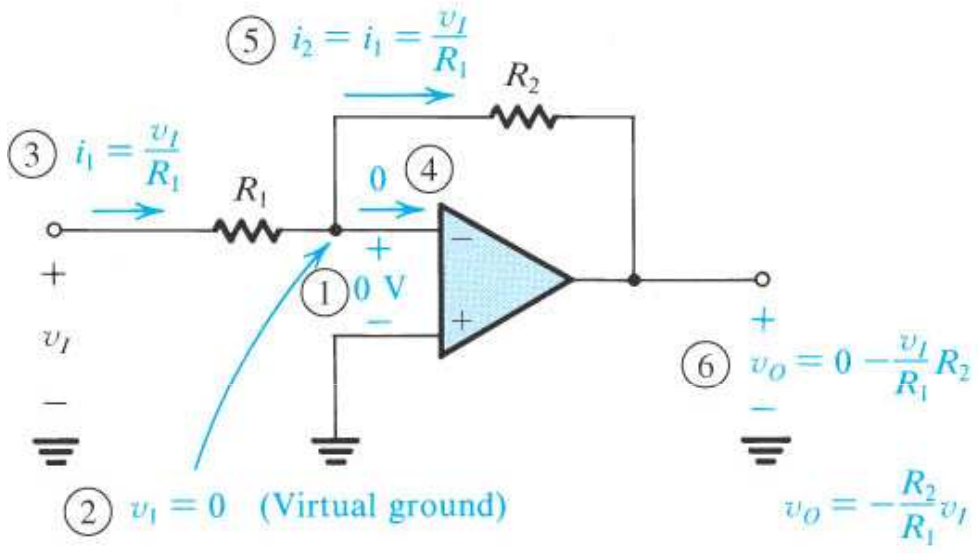
نعرف ربح الحلقة المغلقة للمكبر closed loop gain G $G = \frac{v_O}{v_I}$

بما أنَّ ربح المكبر A كبير جداً، يمكن كتابة:

$$v_2 - v_1 = \frac{v_O}{A} = 0$$

وبالتالي يمكن أن نستنتج أنَّ: $v_2 = v_1$

يمكن حساب قيمة التيار الذي يتدفق في المقاومة R1 على النحو التتالي:



$$i_1 = \frac{v_I - v_1}{R_1} = \frac{v_I - 0}{R_1} = \frac{v_I}{R_1}$$

وبما أنَّ مقاومة الدخل لمكبر العمليات لا نهائية، يمكن حساب جهد الخرج كما يلي:

$$v_O = v_1 - i_1 R_2 = 0 - \frac{v_I}{R_1} R_2$$

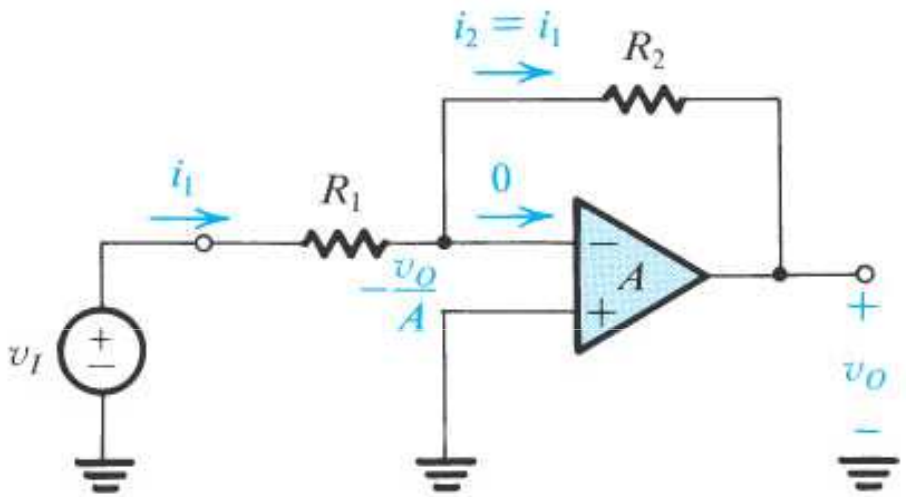
إذاً

$$\frac{v_O}{v_I} = -\frac{R_2}{R_1}$$

1.5 أثر A المحدود: Effect of Finite Open-Loop Gain

بما أنَّ A محدود القيمة، فإنَّ الجهد عند المدخل العاكس يصبح: $-\frac{v_O}{A}$

وبالتالي فالتيار الذي يتدفق في المقاومة R1:



$$i_1 = \frac{v_I - v_1}{R_1} = \frac{v_I - (-v_o/A)}{R_1}$$

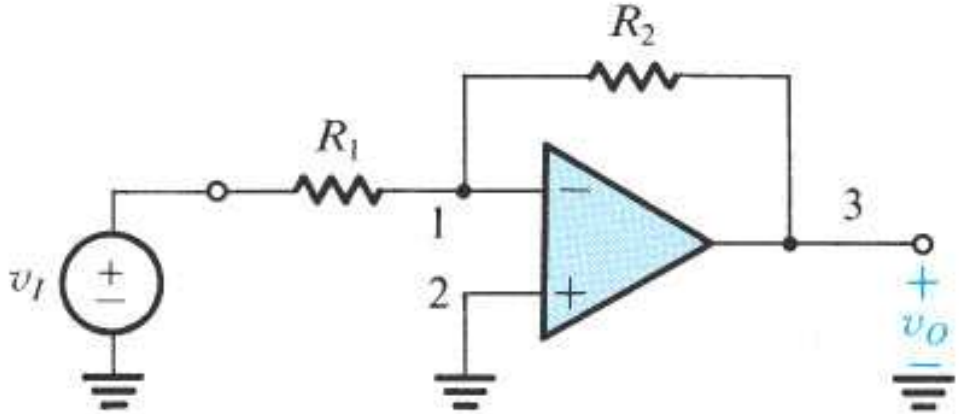
وبما أنَّ مقاومة الدخل لمكبر العمليات لا نهائية:

$$v_O = v_1 - i_1 R_2 = -\frac{v_O}{A} - \left(\frac{v_I + v_O/A}{R_1}\right) R_2$$

$$G \equiv \frac{v_O}{v_I} = \frac{-R_2/R_1}{1 + (1 + R_2/R_1)/A}$$

2.5 مقاومتي الدخل والخرج: Input and Output Resistances

بفرض أنَّ مكبر العمليات مثالي، فربح الحلقة المفتوحة لا نهائي:



$$R_i \equiv \frac{v_I}{i_i} = \frac{v_I}{v_I / R_1} = R_1$$

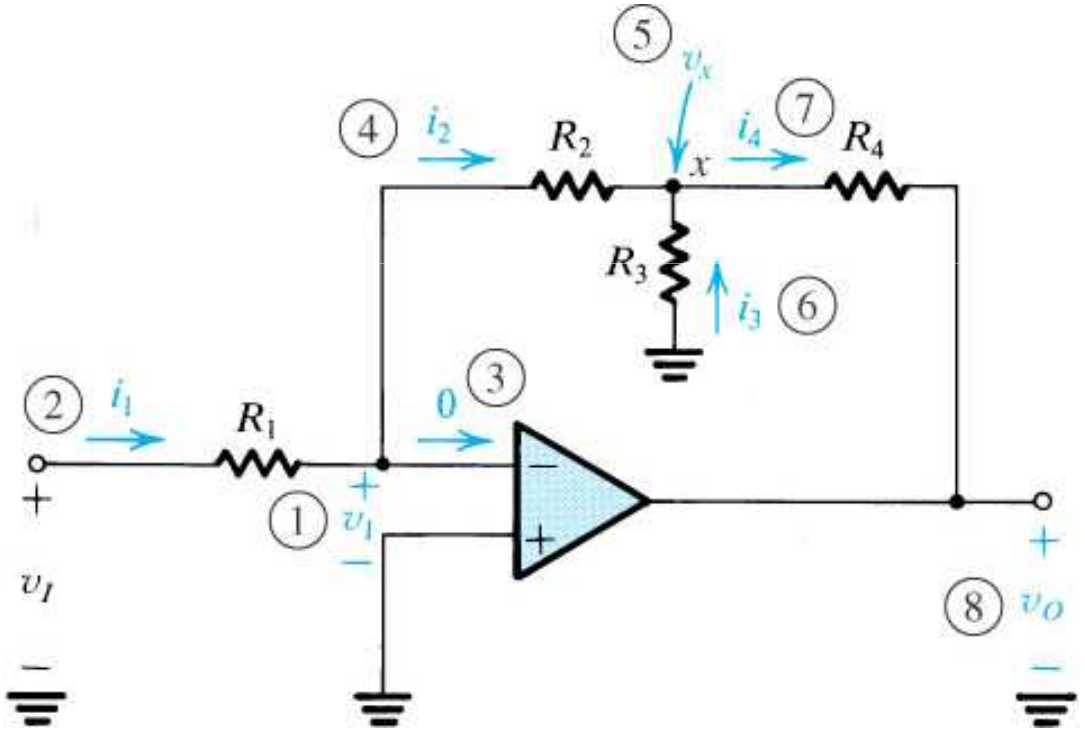
بما أنَّ مقاومة الخرج تُأخذ من النهاية رقم 3 حيث جهد الخرج:

$$v_O = A(v_2 - v_1)$$

إذاً مقاومة الخرج تكون معدومة

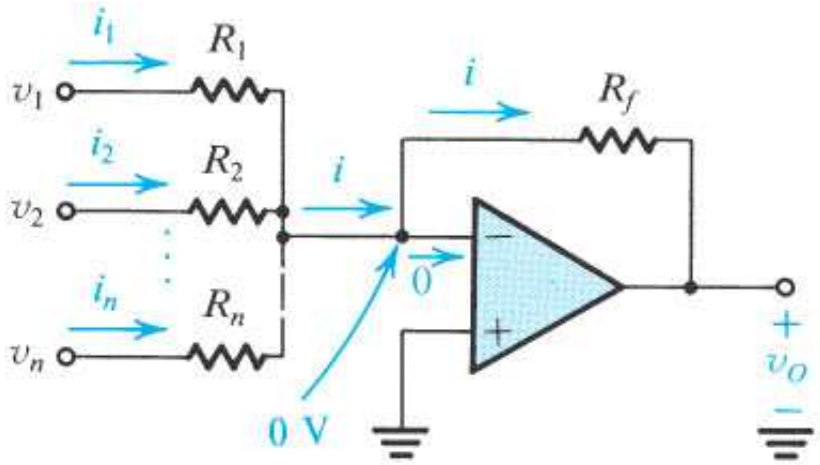
مثال 1

في الدارة المبينة أدناه، المطلوب استنتاج علاقة ربح الحلقة المغلقة v_O/v_I ، علماً أنَّ مكبر العمليات المستخدم مثالي.



الحل

3.5 المكبر الجامع: The Summing Amplifier



$$v_O = -\left(\frac{R_f}{R_1}v_1 + \frac{R_f}{R_2}v_2 + \cdots + \frac{R_f}{R_n}v_n\right)$$

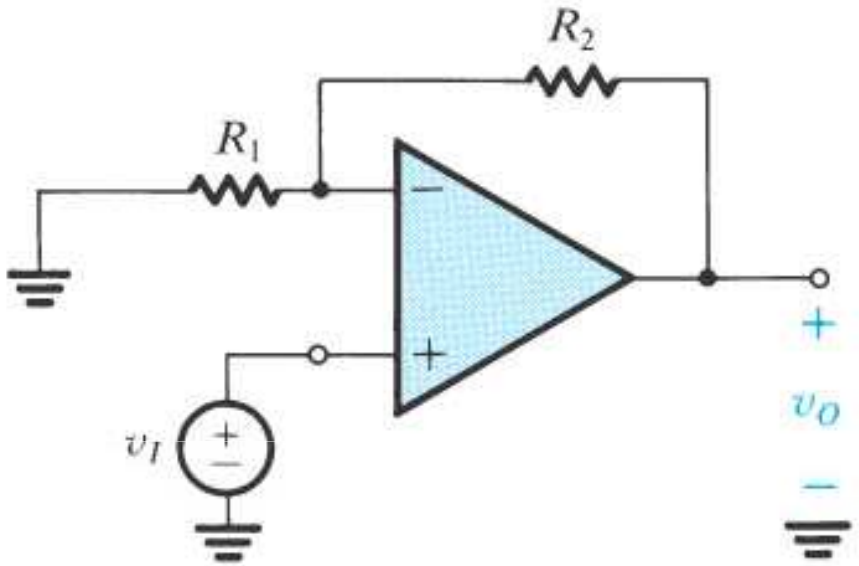
$$i_1 = \frac{v_1}{R_1}, \quad i_2 = \frac{v_2}{R_2}, \qquad i_n = \frac{v_n}{R_n}$$

$$i = i_1 + i_2 + ... + i_n$$

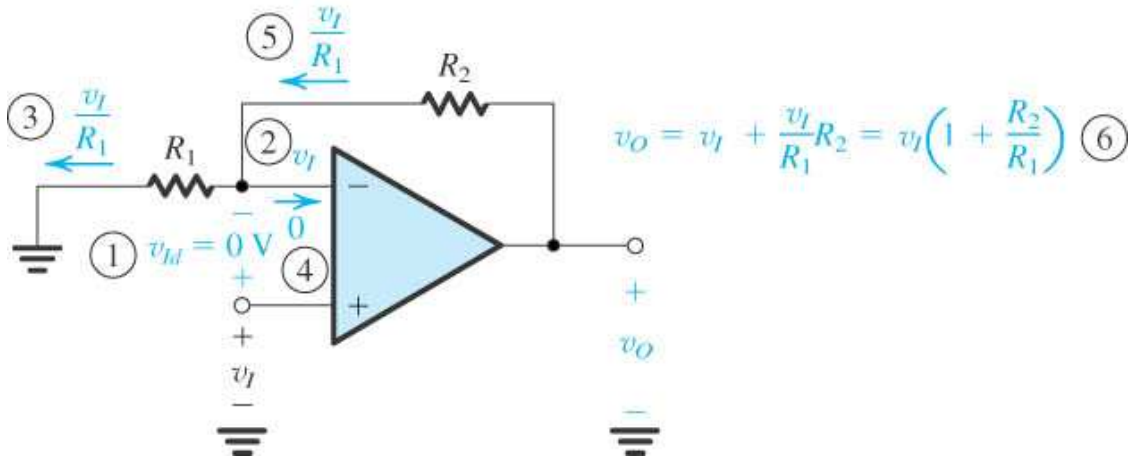
$$v_O = 0 - iR_f = -iR_f$$

$$v_O = -\left(\frac{R_f}{R_1}v_1 = \frac{R_f}{R_2}v_2 + ... + \frac{R_f}{R_n}v_n\right)$$

6. المكبر غير العاكس: The Noninverting Amplifier



$$G = \frac{v_O}{v_I}$$ closed loop gain G نعرف ربح الحلقة المغلقة للمكبر



بما أنَّ ربح المكبر A كبير جداً، يمكن كتابة:

$$v_{Id} = v_2 - v_1 = \frac{v_O}{A} = 0$$

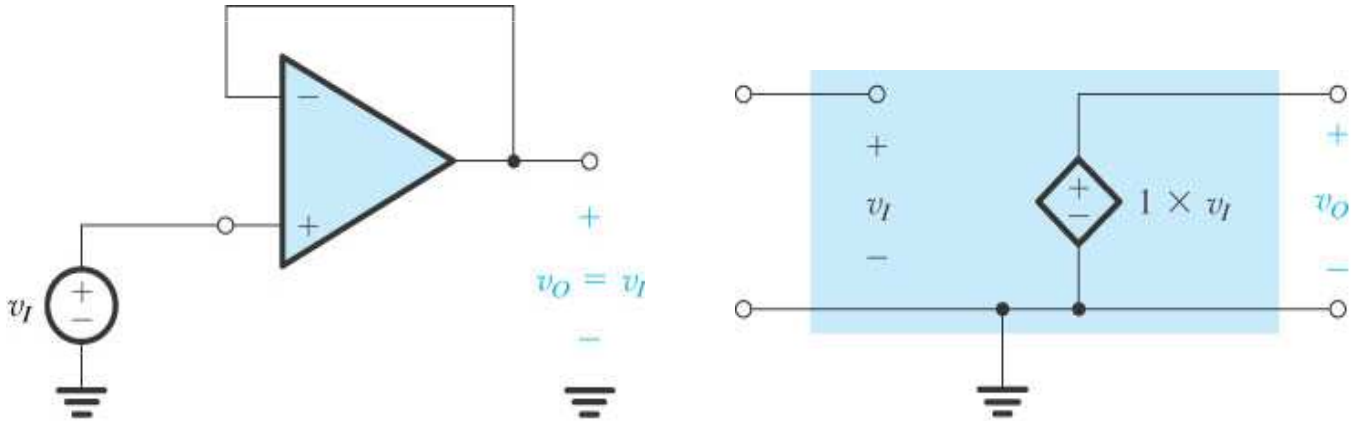
$$v_O = v_I + i_I R_2 = v_I + \frac{v_I}{R_1} R_2$$

$$\frac{v_O}{v_I} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

1.6 أثر A المحدود: Effect of Finite Open-Loop Gain

$$G \equiv \frac{v_O}{v_I} = \frac{1+(R_2/R_1)}{1+\dfrac{(1+R_2/R_1)}{A}}$$

2.6 تابع الجهد: The Voltage Follower



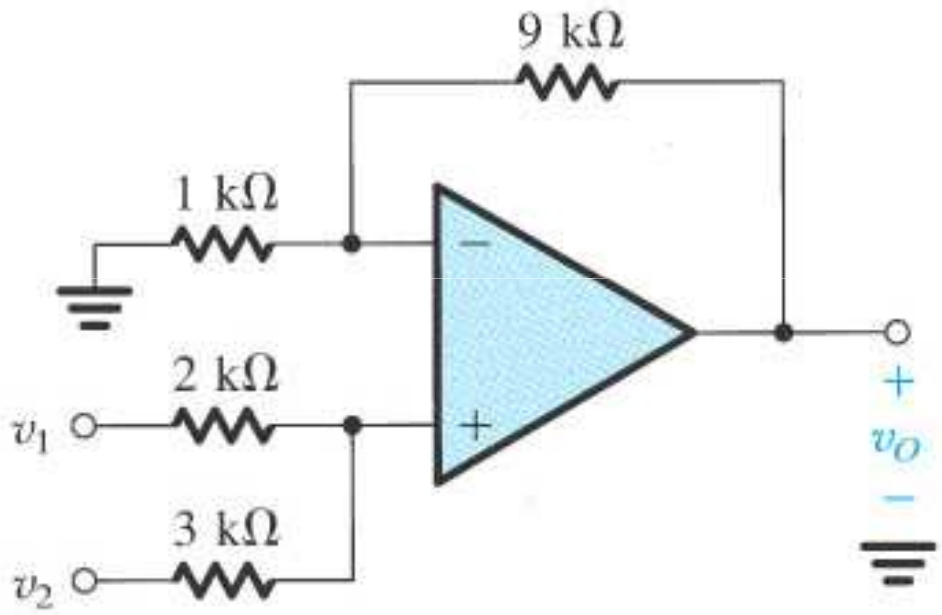
(a) (b)

في الحالة المثالية:

$$v_O = v_I, \quad R_{in} = \infty, \quad R_{out} = 0$$

مثال 2

في الدارة المبينة أدناه، المطلوب استنتاج علاقة جهد الخرج.



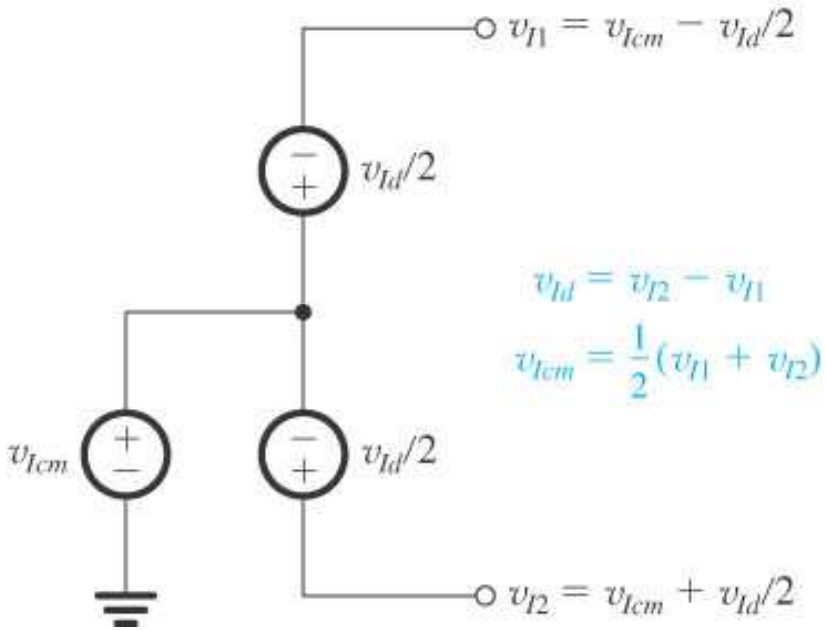
الحل

7. المكبر التفاضلي: Difference Amplifier

هو المكبر الذي يتجاوب مع الفرق بين الإشارتين المطبقتين على كلا دخليه بينما يرفض إشارات النمط المشترك.

جهد خرج المكبر في هذه الحالة يُعطى بالعلاقة:

$$v_O = A_d v_{Id} + A_{cm} v_{Icm}$$

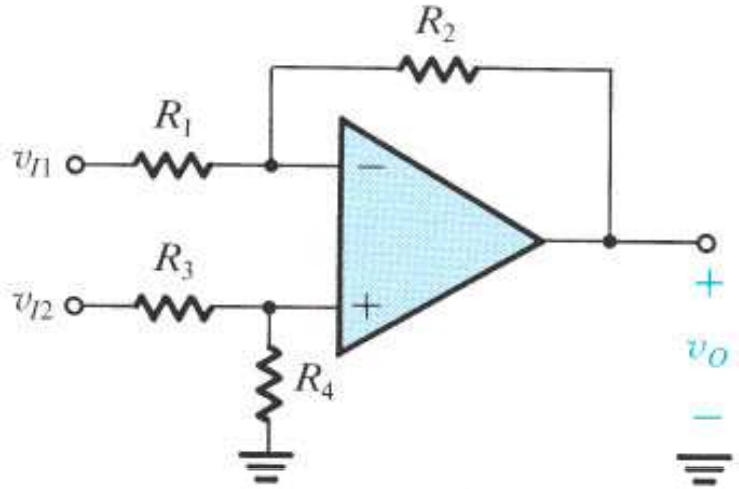


Common-Mode Rejection Ration, defined as:

$$CMRR = 20\log\frac{|A_d|}{|A_{cm}|}$$

السؤال الذي يطرح نفسه: لماذا نسعى لتصميم مكبر تفاضلي طالما أن مكبر العمليات بحد ذاته مكبر تفاضلي؟

من الضروري بداية جعل ربح كلا المدخلين متساوٍ وذلك بغية رفض إشارات النمط المشترك. وعليه نجعل ربح المدخل الغير عاكس مساوٍ لربح المخل العاكس

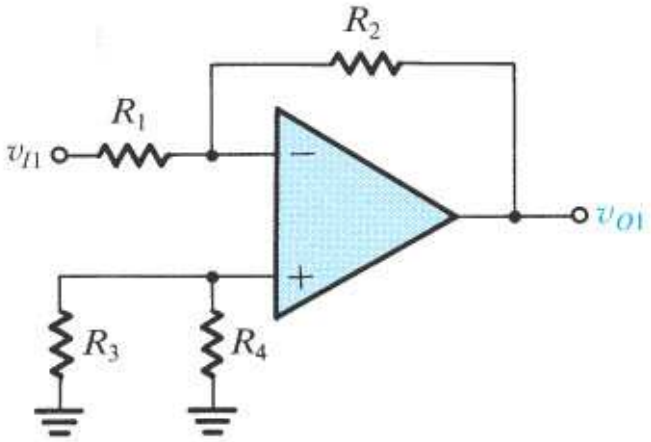


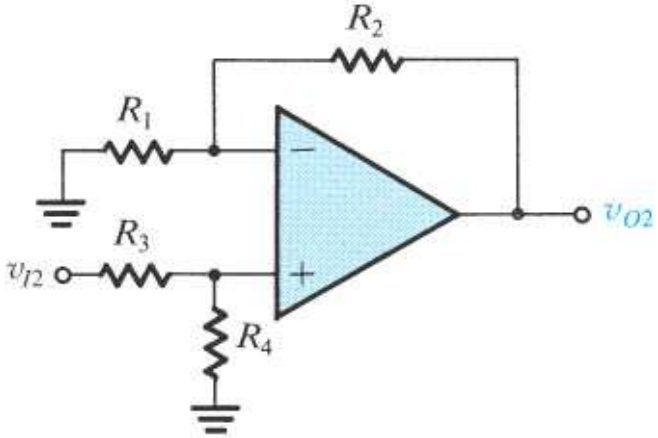
نجعل ربح المدخل غير العاكس مساوٍ لربح المدخل العاكس

$$\frac{R_4}{R_4+R_3}\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)=\frac{R_2}{R_1}$$

$$\frac{R_4}{R_3}=\frac{R_2}{R_1}$$

باستخدام مبدأ التراكم:





$$v_{O1} = -\frac{R_2}{R_1} v_{I1}$$

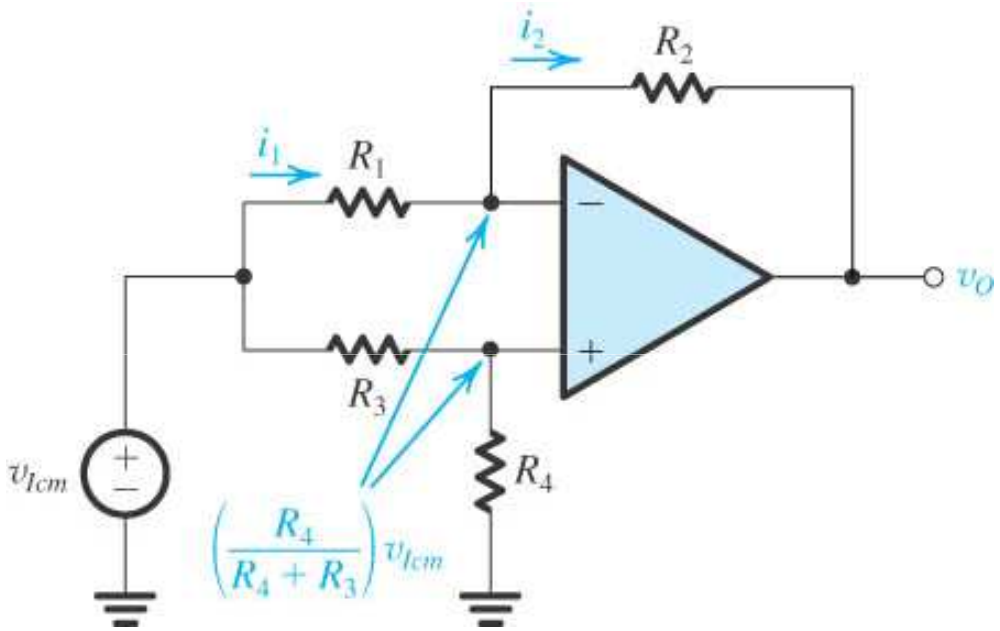
$$v_{O1} = v_{I2} \frac{R_4}{R_4 + R_3} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) = \frac{R_2}{R_1} v_{I2}$$

$$v_O = v_{O1} + v_{O2} = \frac{R_2}{R_1}(v_{I1} - v_{I2}) = \frac{R_2}{R_1} v_{Id}$$

إذاً الدارة السابقة تسلك سلوك مكبر تفاضلي بربح تفاضلي مقداره:

$$A_d = \frac{R_2}{R_1}$$

عندما تعمل الدارة السابقة بالنمط المشترك، أي عندما نطبق على مدخليها نفس الإشارة، فإنَّ جهد الخرج يساوي:



$$i_1 = \frac{1}{R_1}\left(v_{Icm} - \frac{R_4}{R_4+R_3}v_{Icm}\right)$$

$$i_1 = v_{Icm}\frac{R_3}{R_4+R_3}\frac{1}{R_1}$$

$$v_O = \frac{R_4}{R_4+R_3}v_{Icm} - i_2 R_2$$

$$v_O = \frac{R_4}{R_4+R_3}v_{Icm} - \frac{R_2}{R_1}\frac{R_3}{R_4+R_3}v_{Icm}$$

$$v_O = \frac{R_4}{R_4 + R_3}\left(1 - \frac{R_2}{R_1}\frac{R_3}{R_4}\right)v_{Icm}$$

$$A_{cm} = \frac{v_O}{v_{Icm}} = \frac{R_4}{R_4 + R_3}\left(1 - \frac{R_2}{R_1}\frac{R_3}{R_4}\right)$$

وبالاستناد إلى الشرط التصميمي لتساوي ربح كلا مدخلي المكبر أي: $\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1}$

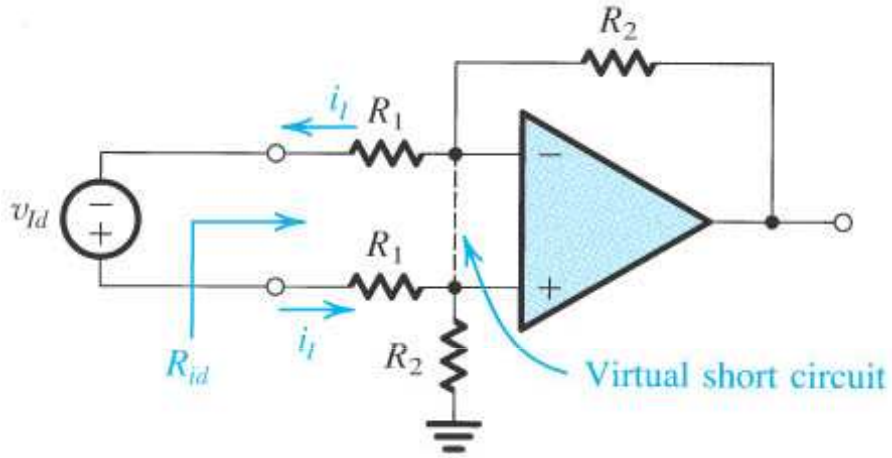
نجد:

$$A_{cm} = \frac{v_O}{v_{Icm}} = 0$$

بالإضافة لرفض إشارات النمط المشترك، يُصمم المكبر التفاضلي بحيث تكون مقاومة دخله عالية جداً

لإيجاد مقاومة الدخل للمكبر التفاضلي أي المقاومة المنظورة من خلال دخليه، وبعد اختيار قيم المقاومات بحيث:

$$R_1 = R_3 \quad and \quad R_2 = R_4$$



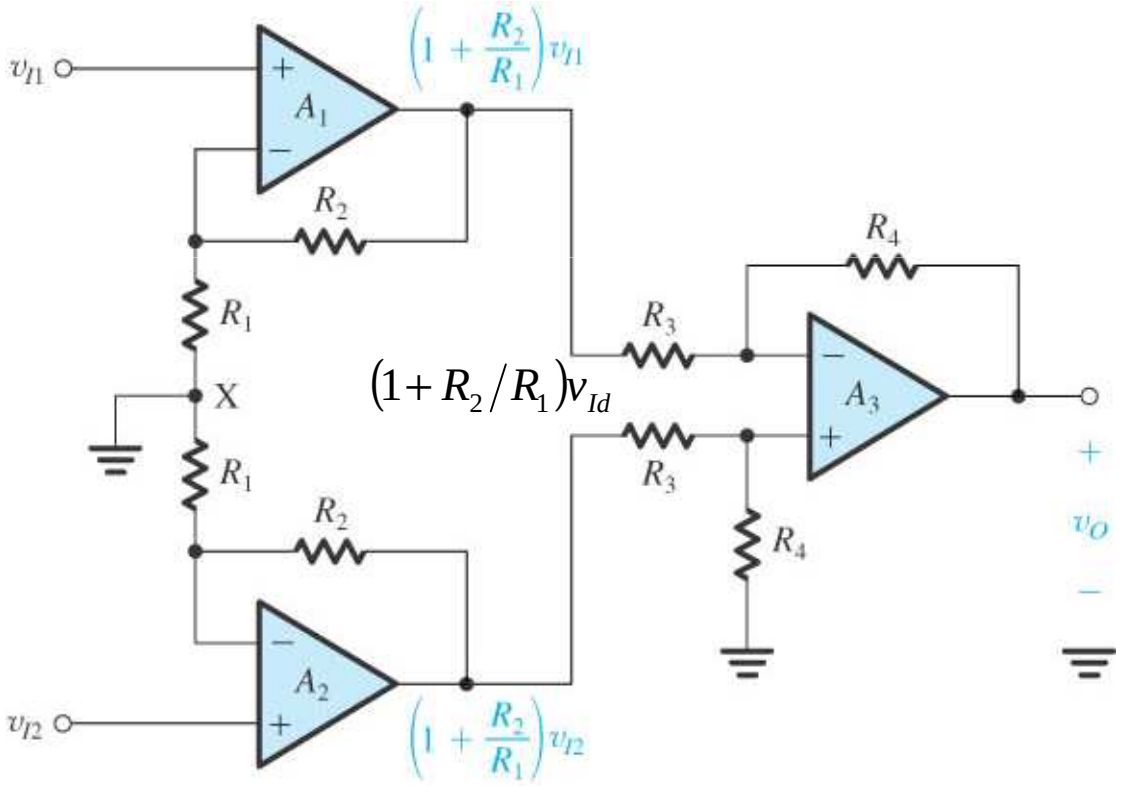
$$R_{id} = \frac{v_{Id}}{i_1} = \frac{R_1 i_1 + 0 + R_1 i_1}{i_1}$$

$$R_{id} = \frac{v_{Id}}{i_1} = 2R_1$$

7.1 A Superior Circuit-The Instrumentation Amplifier

يمكن حل مشكلة مقاومة الدخل المنخفضة للمكبر التفاضلي من خلال إضافة دارة عازل على كلا مدخليه.

هل يمكن الحصول على مكاسب إضافية من إضافة دارة ذات ممانعة دخل عالية؟



$$v_O = \frac{R_4}{R_3}\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)v_{Id}$$

$$A_d = \frac{R_4}{R_3}\left(1+\frac{R_2}{R_1}\right)$$

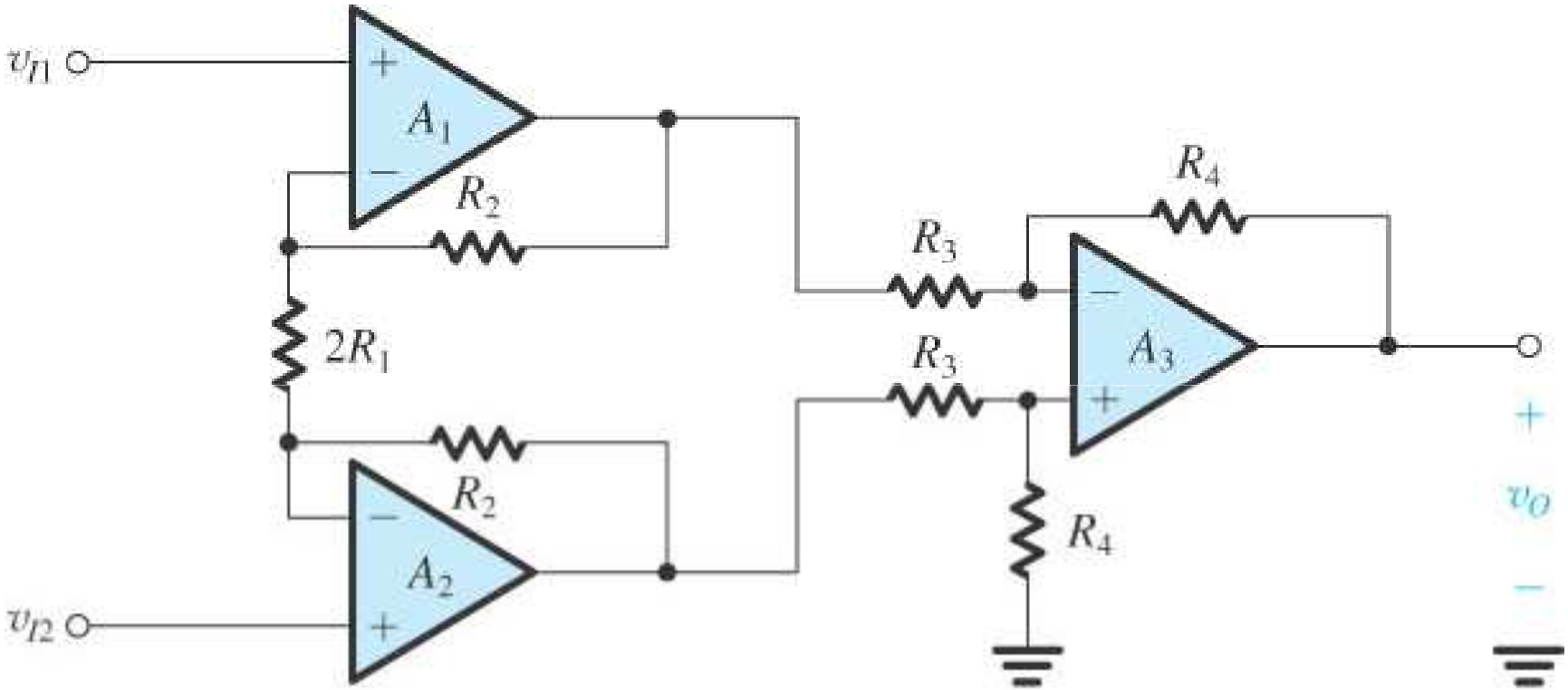
$$A_{cm} = 0$$

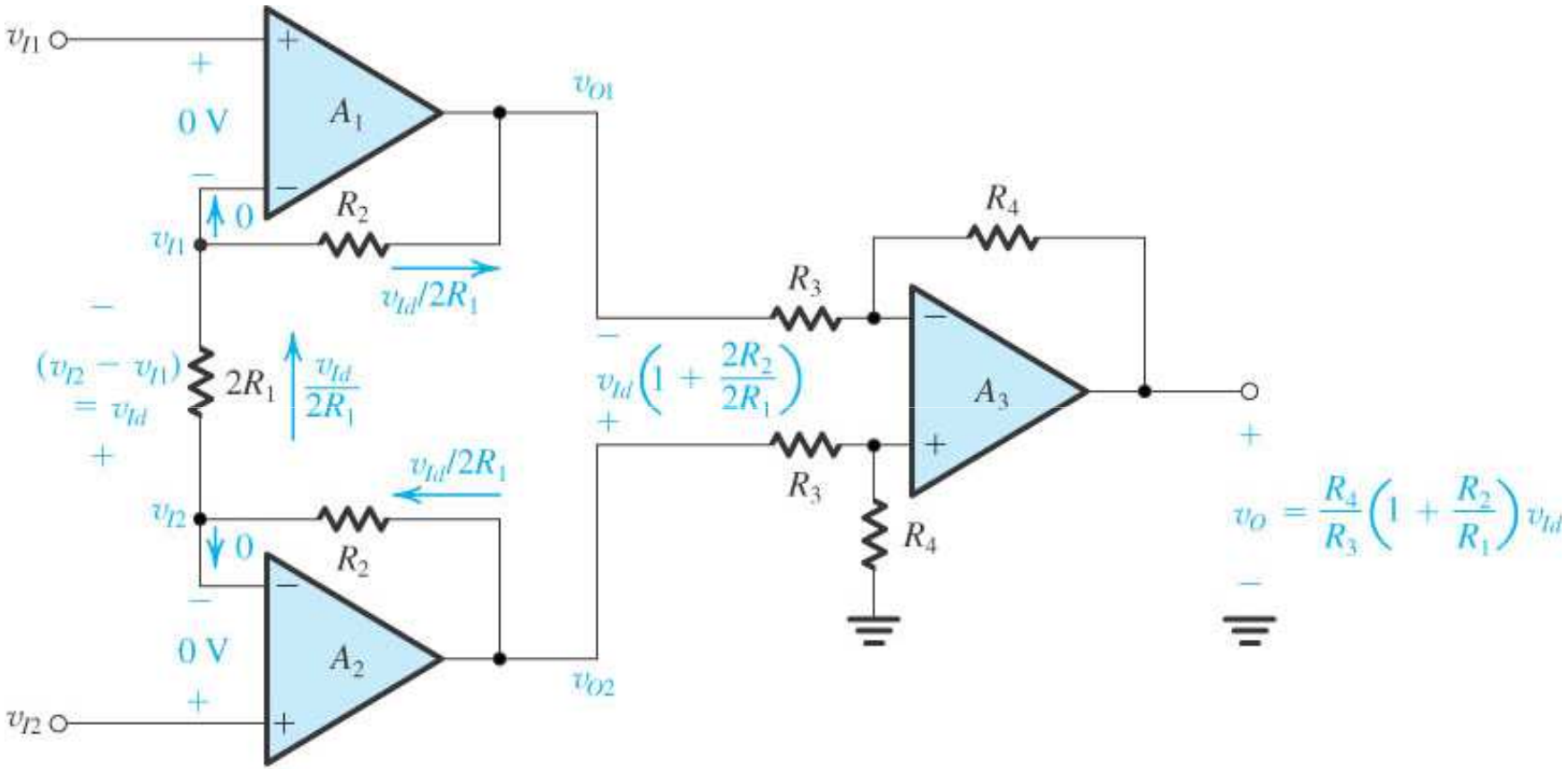
مزايا:

- مقاومة الدخل العالية جداً (اللانهائية مثالياً)
- مسار إشارتي الدخل متماثلين، وهذا يعتبر من المحاسن الحتمية في تصميم المكبر التفاضلي

مساوئ:

- انخفاض في قيمة CMMR نتيجة تكبير إشارة النمط المشترك
- ظهور إشارة زائفة بين خرجي المكبرين A1 and A2 التي يمكن أن تكبر بالمكبر التفاضلي في المرحلة الثانية
- تغير قيمة تكبير إشارة التفاضل تقضي بالتغير المتماثل للمقاومتين R1 وهذا يتطلب تماثل هاتين المقاومتين

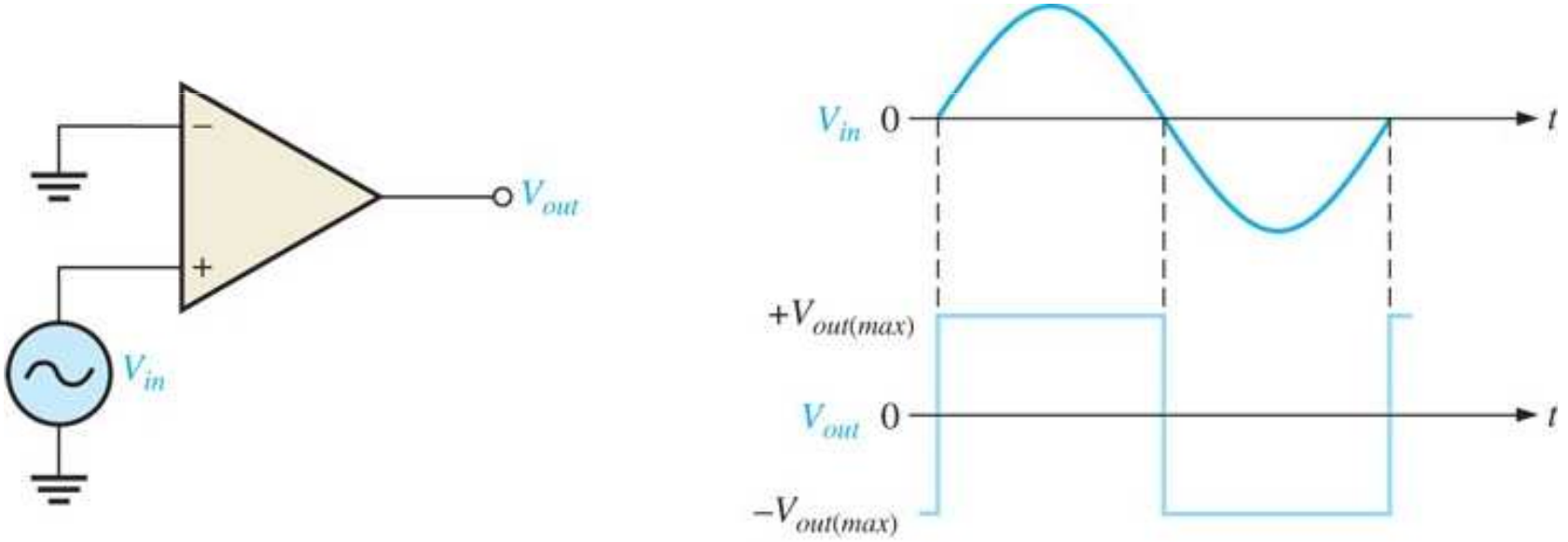

v_{I1}
v_{I2}
A_1
A_2
A_3
R_2
R_2
$2R_1$
R_3
R_3
R_4
R_4
+
v_O
−


v_{I1}
+
0 V
−
A_1
v_{O1}
0
R_2
v_{I1}
$v_{Id}/2R_1$
R_4
R_3
−
$(v_{I2} - v_{I1})$
$= v_{Id}$
+
$2R_1$
$\frac{v_{Id}}{2R_1}$
$v_{Id}\left(1 + \frac{2R_2}{2R_1}\right)$
+
A_3
+
$v_{Id}/2R_1$
R_3
v_{I2}
R_4
0
R_2
−
0 V
+
A_2
v_{O2}
v_{I2}
+
$v_O = \frac{R_4}{R_3}\left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)v_{Id}$
−

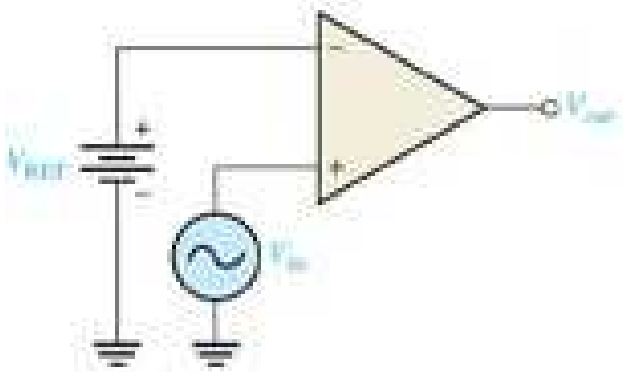
8.دارات مكبر العمليات الأساسية: Basic Op-Amp Circuits

1.8 المقارن: Comparator

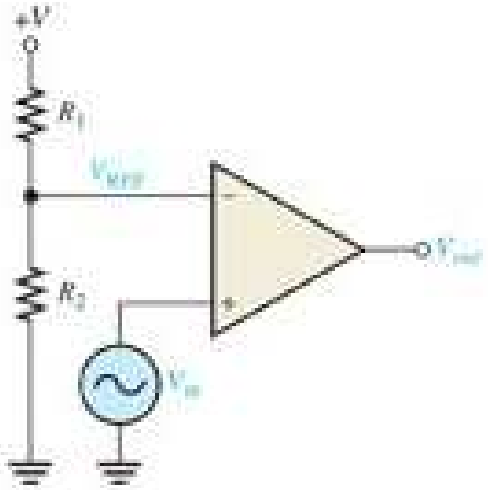
هو إحدى الدارات الأساسية لمكبر العمليات، يقارن بين الجهد المطبق على مدخليها لينتج في خرجه إحدى حالتين الإشباع، حيث يمثل الجهد على أحد مدخليه جهداً مرجعياً ذو قيمة ثابتة على حين نطبق على المدخل الآخر جهداً متغير القيمة.



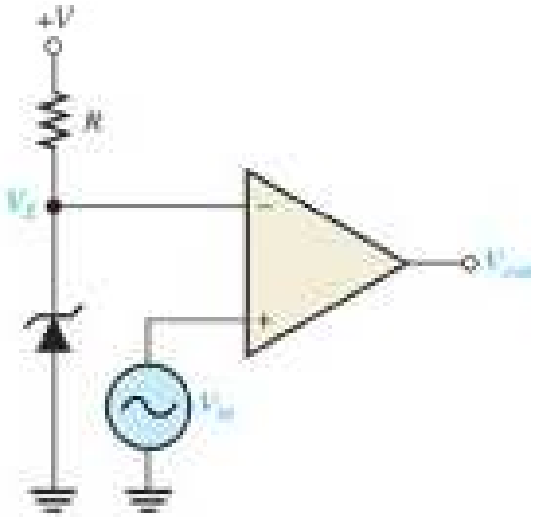
Zero-Level Detection



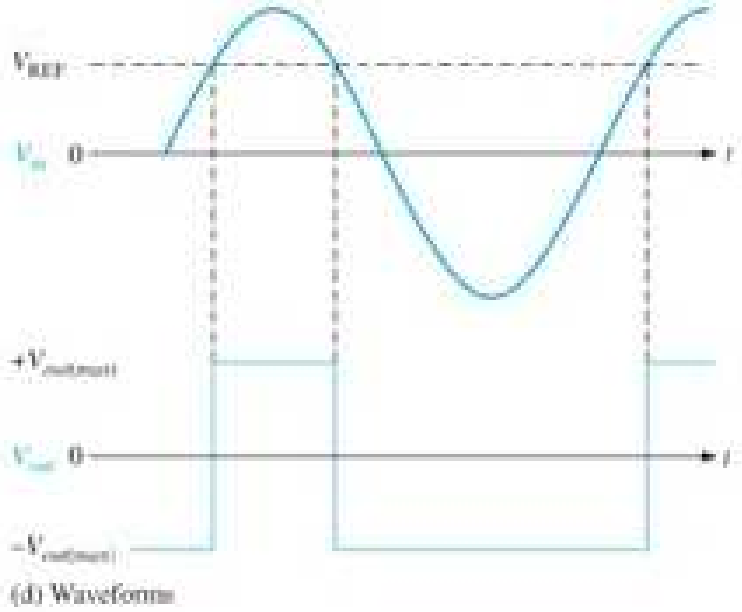
(a) Battery reference



(b) Voltage-divider reference



(c) Zener diode sets reference voltage

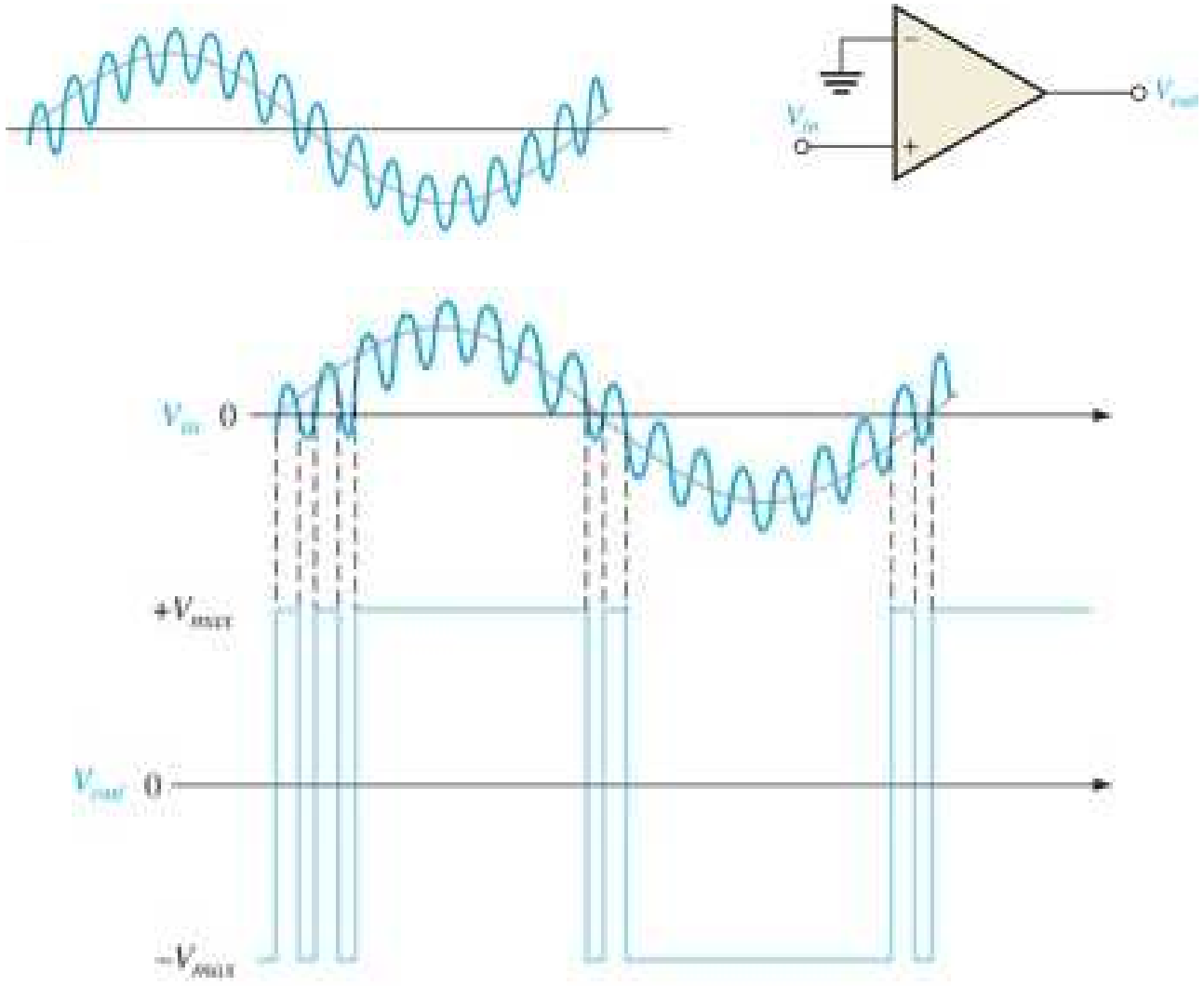


(d) Waveforms

Nonzero-Level Detection

اثر ضجيج الدخل على عمل المقارن:

Effects of Input Noise on Comparator Operation



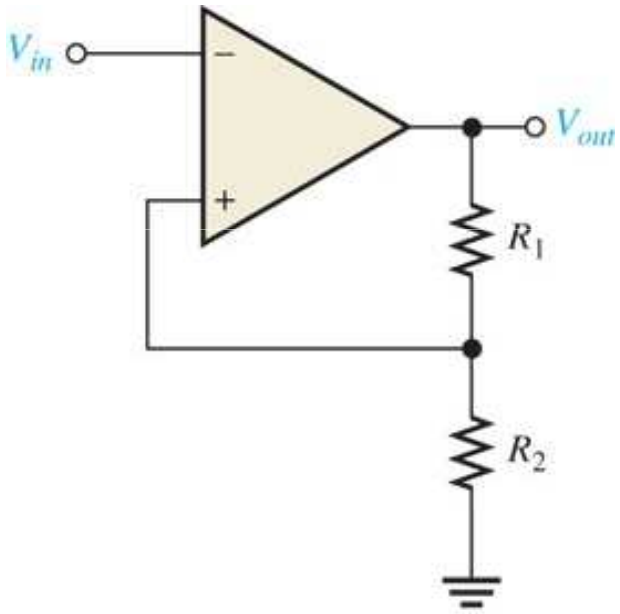
تخفيض أثر الضجيج المسبب للتأرجح:

Reducing Noise Effects With Hysteresis

لإنقاص التأرجح الناتج عن ضجيج الدخل نلجأ إلى اعتماد مستويي مقارنة:

مستوى القدح المرتفع Upper Trigger Point (UTP)

مستوى القدح المنخفض Lower Trigger Point (LTP)

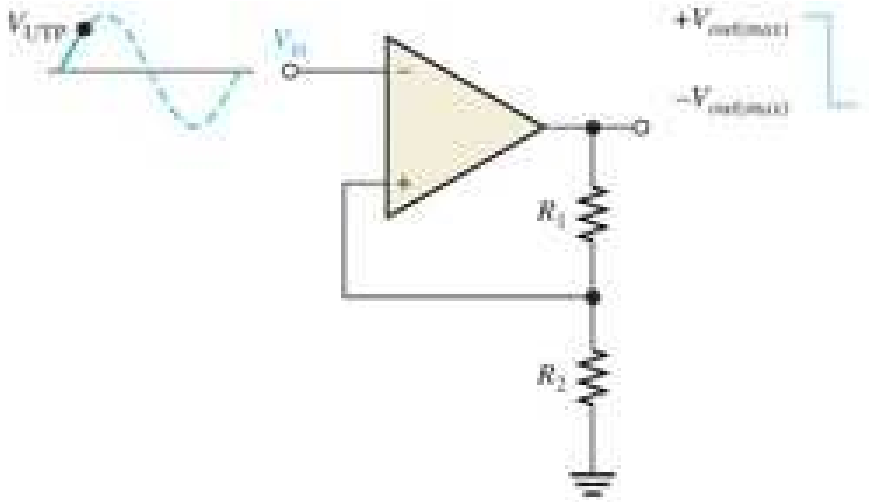


Schmitt Trigger

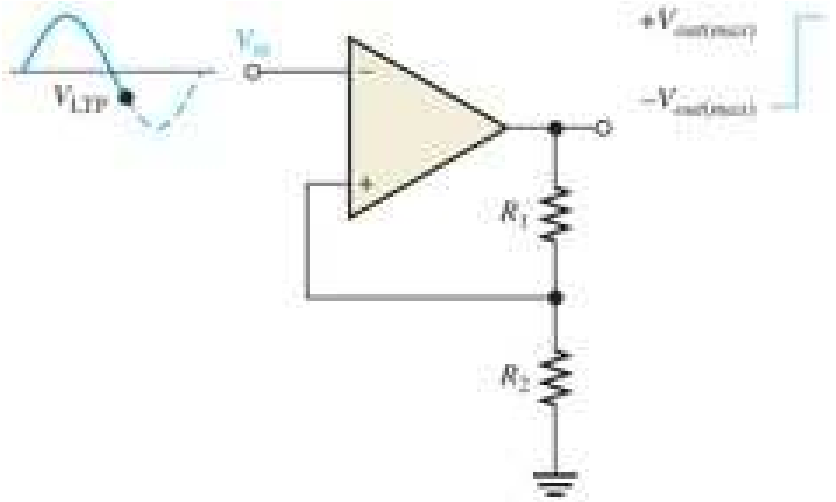
$$V_{UTP} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}(+V_{out(\max)})$$

$$V_{LTP} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}(-V_{out(\max)})$$

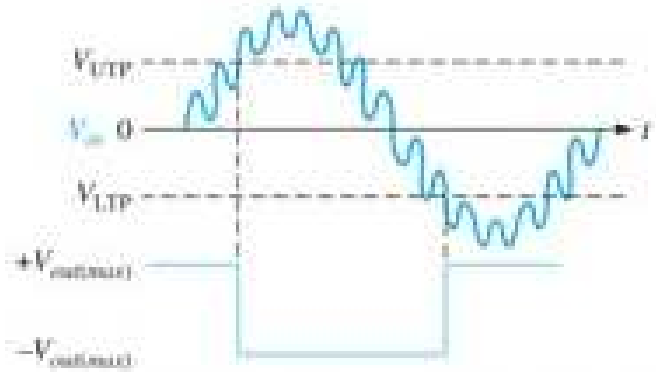
$$V_{HYS} = V_{UTP} - V_{LTP}$$



(a) When the output is at the maximum positive voltage and the input exceeds UTP, the output switches to the maximum negative voltage.

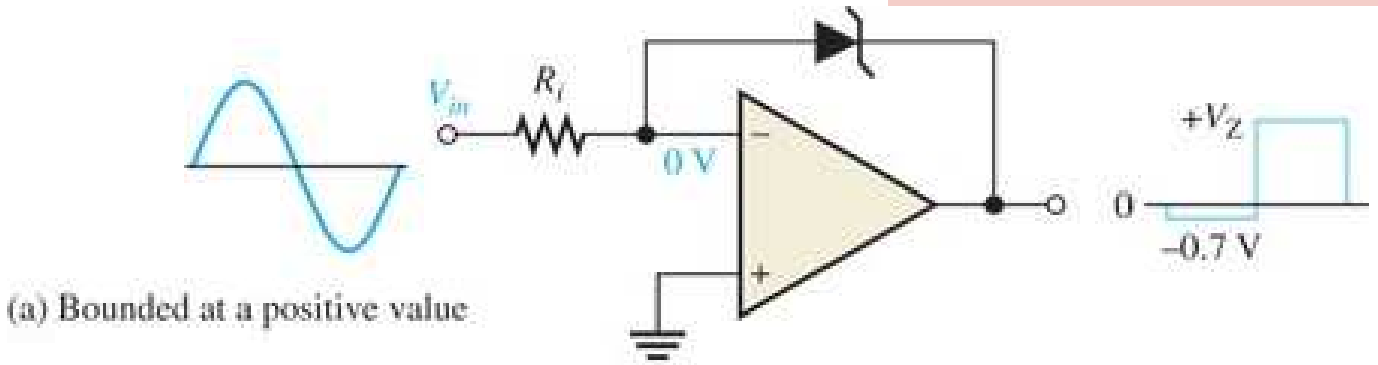


(b) When the output is at the maximum negative voltage and the input goes below LTP, the output switches back to the maximum positive voltage.

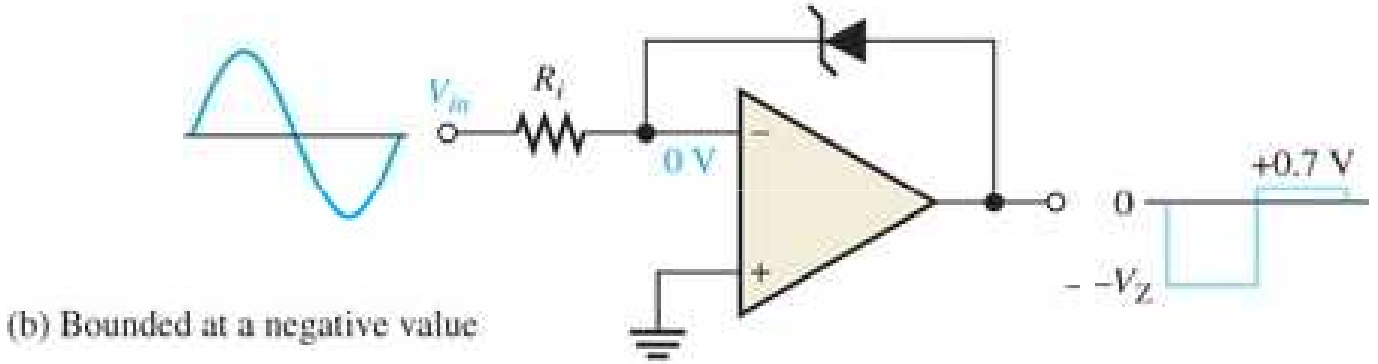


(c) Device triggers only once when UTP or LTP is reached; thus, there is immunity to noise that is riding on the input signal.

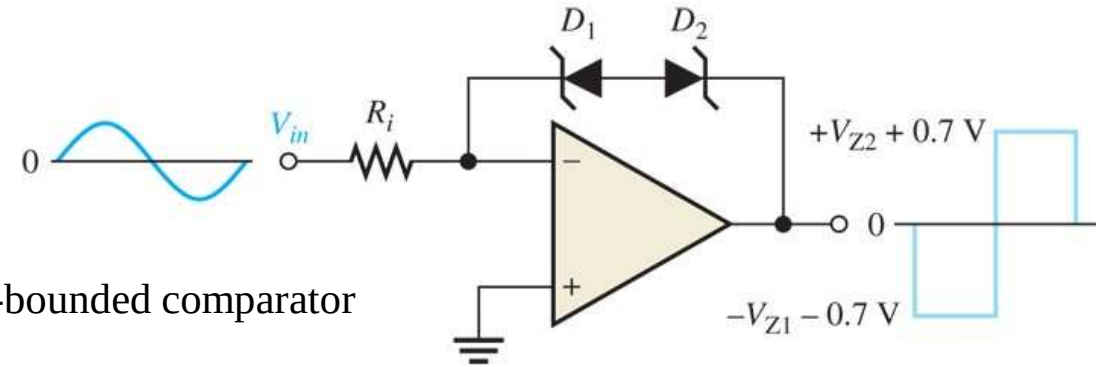
Output Bounding :حدود الخرج



(a) Bounded at a positive value

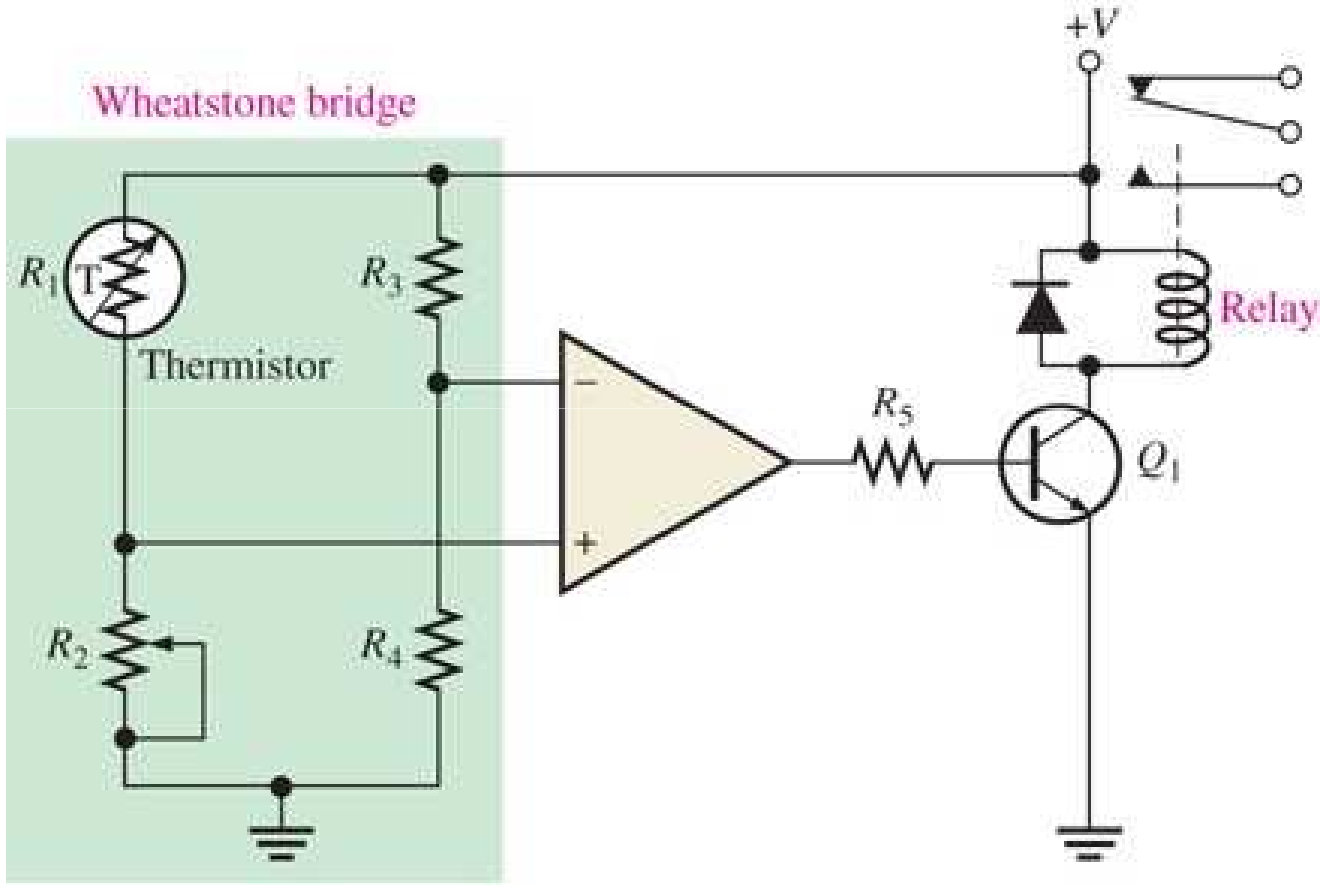


(b) Bounded at a negative value

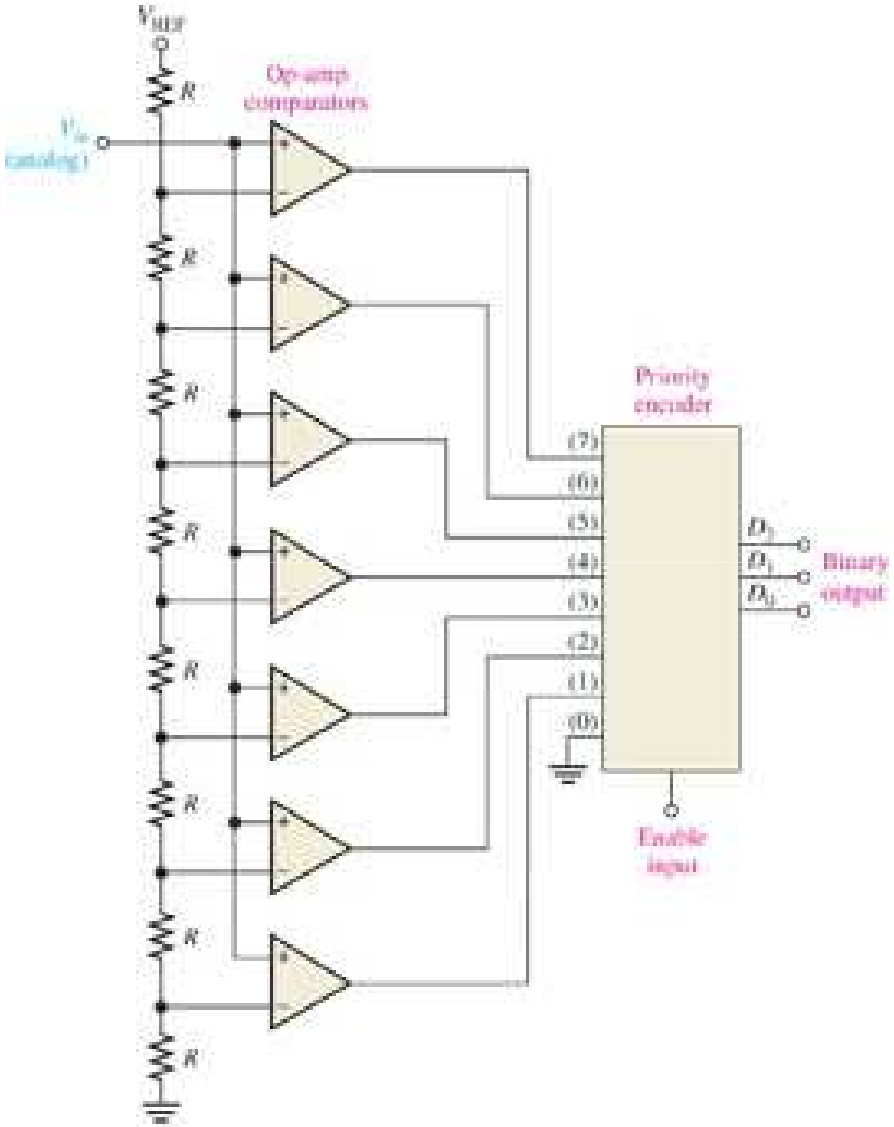


Double-bounded comparator

1. Over-temperature Sensing Circuit

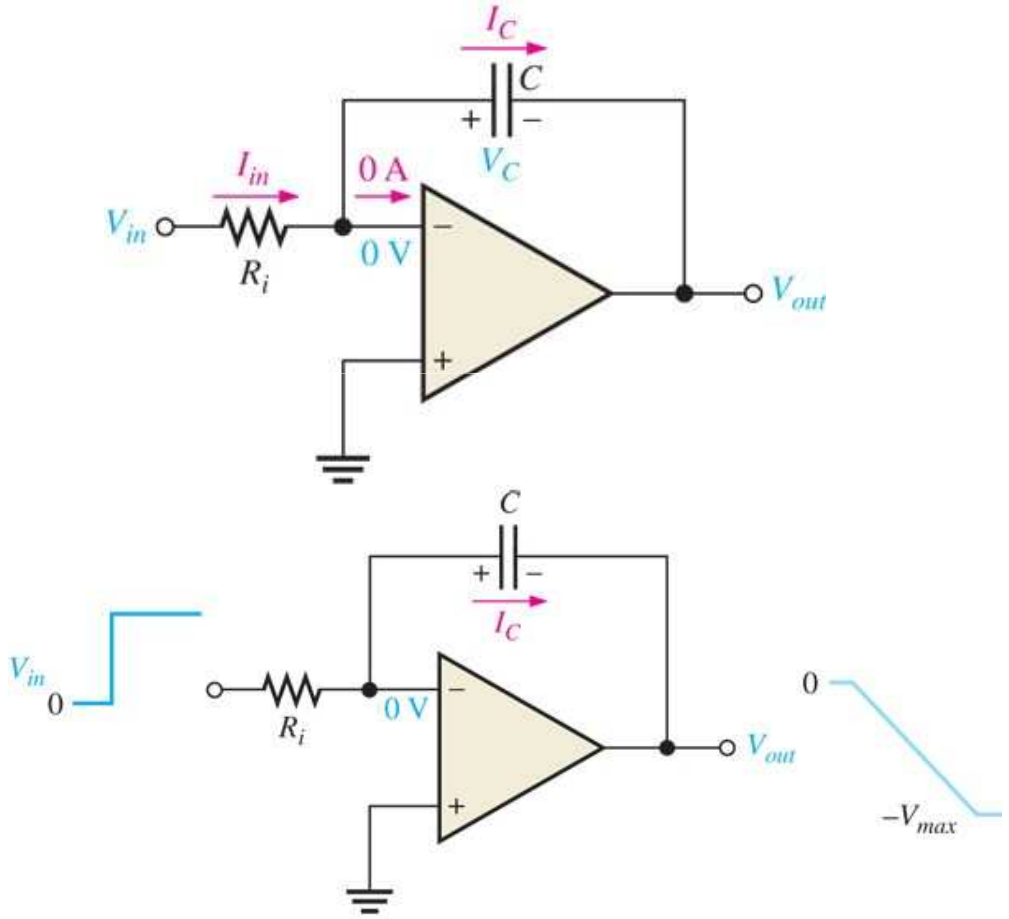


2. Analog-to-Digital Converter (A/D)



2.8 المكامل : The Op-Amp Integrator

المكامل المثالي: *The Ideal Integrator*



$$I_{in} = \frac{V_{in}}{R_i}$$

$$I_C = I_{in}$$

$$V_C = \left(\frac{I_C}{C}\right)t$$

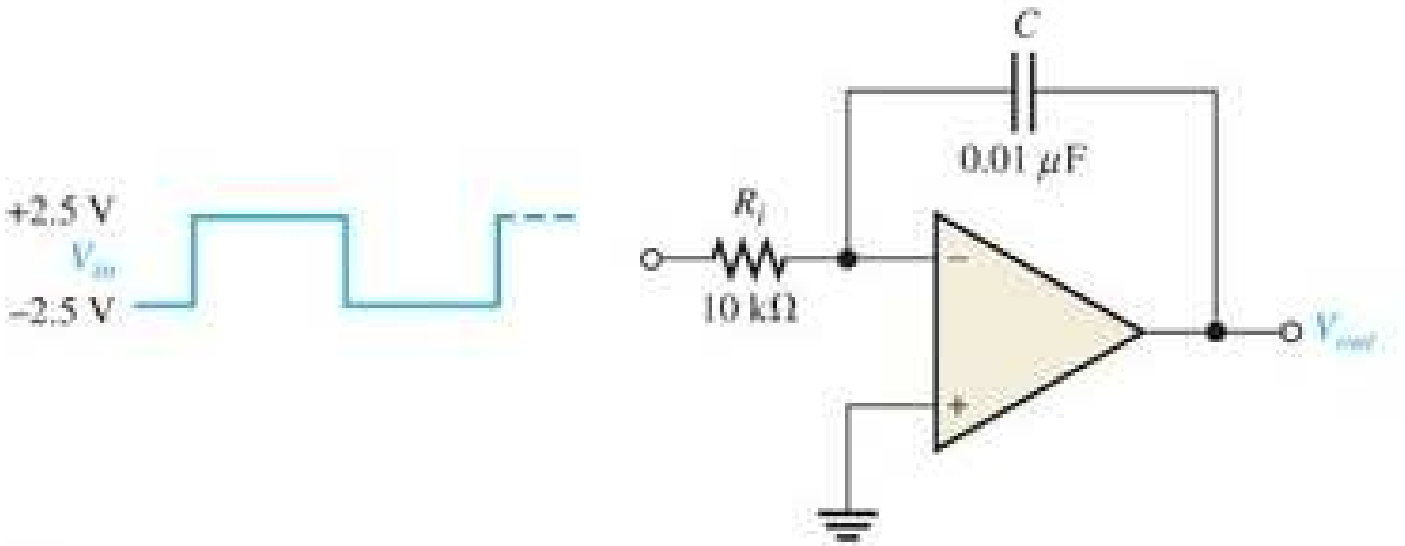
يُعطى التغير بجهد الخرج من العلاقة:

$$\frac{\Delta V_{out}}{\Delta t} = -\frac{V_{in}}{R_i C}$$

مثال 3

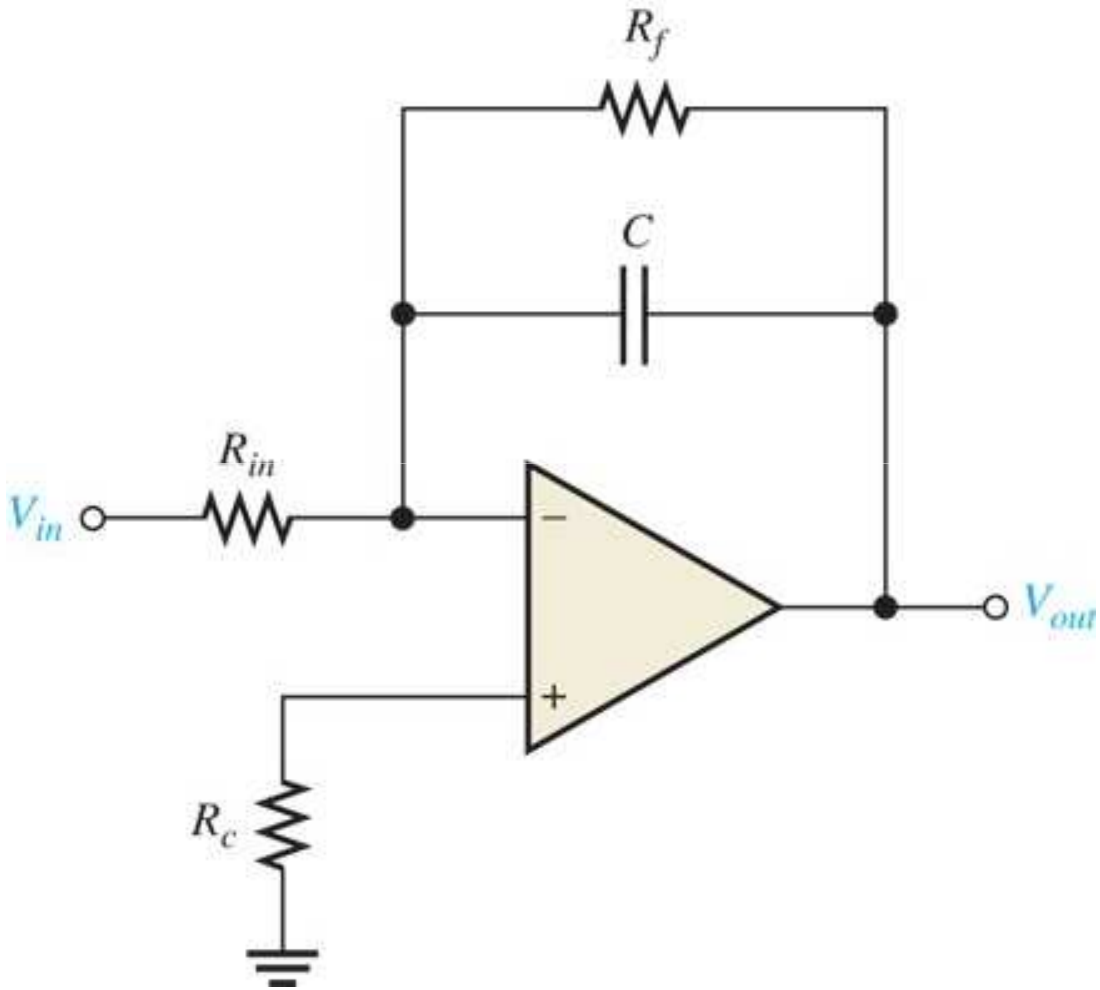
في الدارة المبينة أدناه وبفرض جهد الخرج الابتدائي للمكامل يساوي الصفر، المطلوب:

- أوجد معدل تغير جهد الخرج للمكامل عندما نطبق على دخله الإشارة المربعة الموضحة جانبه ذات العرض 100 µs.
- ناقش ثم ارسم شكل إشارة الخرج.



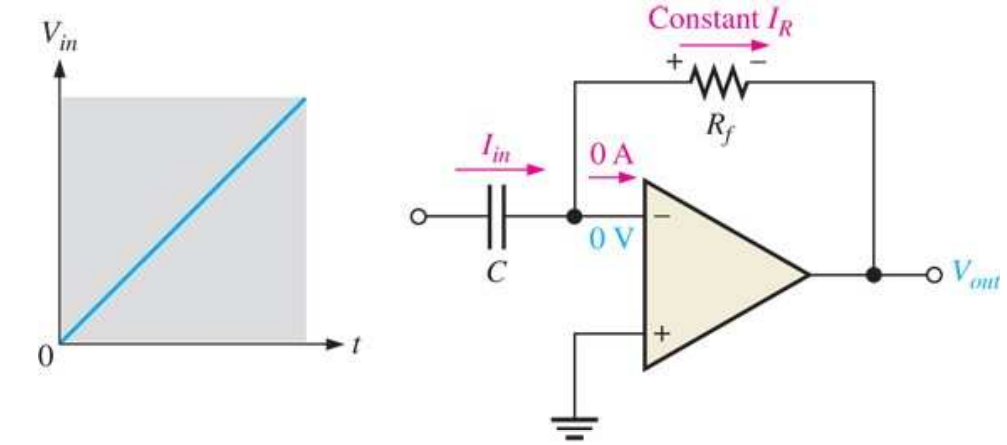
الحل:

The Practical Integrator :المكامل العملي



3.8 المفاضل: The Op-Amp Differentiator

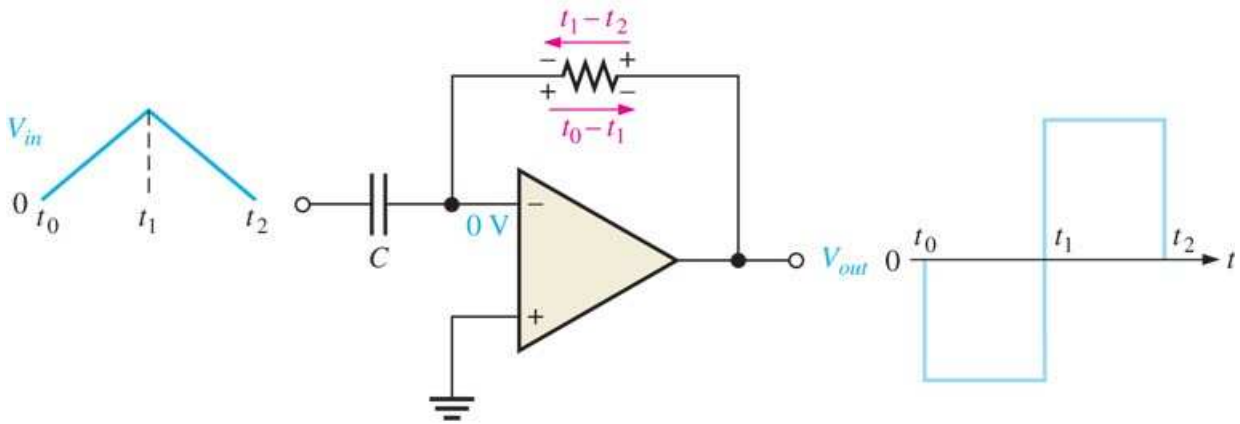
المفاضل المثالي: *The Ideal Differentiator*



$$I_C = I_{in} \quad and \quad V_C = V_{in}$$

$$V_C = \left(\frac{I_C}{C}\right)t \Rightarrow I_C = \left(\frac{V_C}{t}\right)C$$

بما أنَّ تغير جهد الدخل ثابت فالتيارين المارين في المكثف والمقاومة يكونان متساويين أيضاً أي: $I_C = I_R$



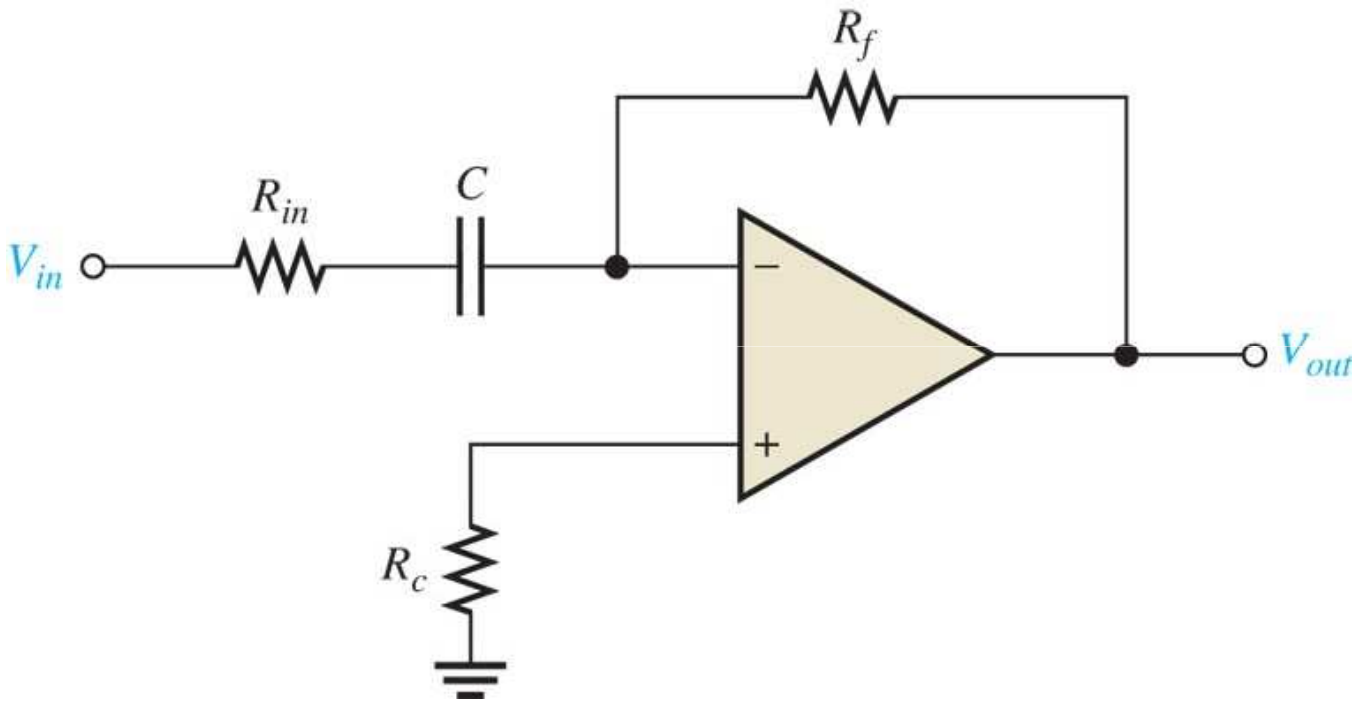
$$V_{out} = I_R R_f = I_C R_f$$

$$V_{out} = -\left(\frac{V_C}{t}\right)R_f C$$

مثال 4

الحل:

The Practical Differentiator :المفاضل العملي



ERROR: undefined
OFFENDING COMMAND: Ideal

STACK:

(c)
/Title
()
/Subject
(D:20170509195431+03’00’)
/ModDate
()
/Keywords
(PDFCreator Version 0.9.5)
/Creator
(D:20170509195431+03’00’)
/CreationDate
(Nawar)
/Author
-mark-