تطبيقات مكبرات العمليات

الجدارة: التعرف على التطبيقات العملية لمكبرات العمليات وكيفية اختيارها لاستخدامها بالشكل المناسب.

الأهداف: بعد تدريب هذه الوحدة يكون المتدرب قادراً على:

- أن يتعرف المتدرب على التطبيقات العملية لمكبر العمليات .
- أن يحلل المتدرب عمل المكبر المقارن بدوائره المختلفة.
- أن يحلل المتدرب على المكبر الجامع.
- أن يتعرف المتدرب على مكبر التكامل.
- أن يتعرف المتدرب على مكبر الاشتقاق.

الوقت المتوقع للتدريب: 4 ساعات.

2- تطبيقات مكبرات العمليات

Applications of Operational Amplifiers

مقدمة:

تطرقنا في الوحدة السابقة لدراسة مكبرات العمليات من ناحية أساسياتها، ومبدأ عملها وخصائصها الفنية. وسوف نتناول في هذه الوحدة التطبيقات المهمة لمكبرات العمليات وهي:

- المكبر المقارن Comparator.
- المكبر الجامع Summing Amplifier .
- مكبر التكامل Integrators .
- مكبر الاشتقاق Differentiators.

2- 1 المكبر المقارن Comparator :

غالباً ما تستخدم مكبرات العمليات كدائرة مقارن لمقارنة قيمة جهد معين مع قيمة مرجعية أخرى. في هذه الحالة يستخدم مكبر العمليات في حالة المسار المفتوح (Open Loop) بدون وجود التغذية الراجعة السلبية حيث يتم توصيل الجهد المراد مقارنته على أحد المدخلين والقيمة المرجعية (Reference Voltage) على المدخل الآخر.

سوف نتعرف على أربع دوائر للمقارن وهي:

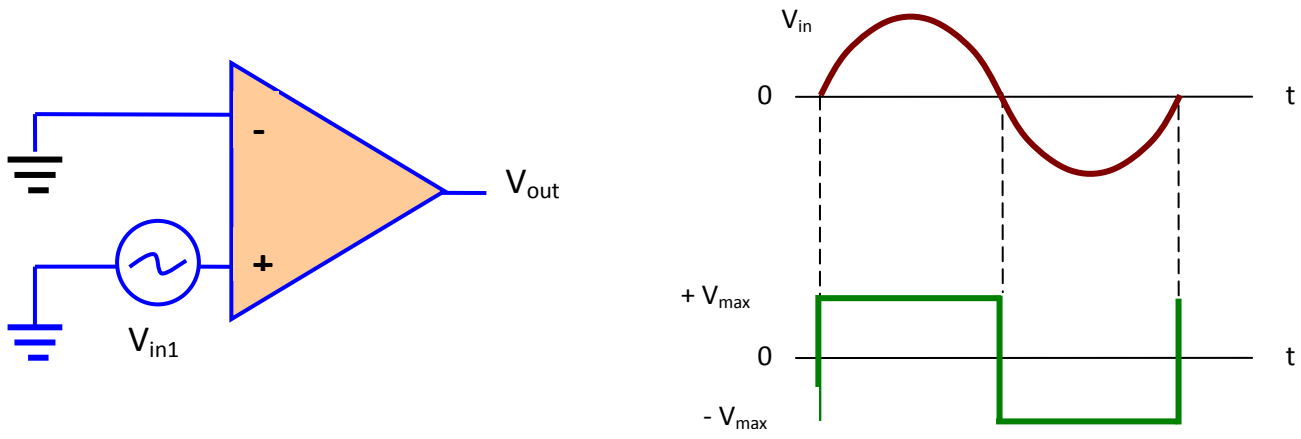
- المقارن ذو قيمة مرجعية صفرية Zero-Level Detection .
- المقارن مع البطارية كقيمة مرجعية Battery Reference Comparator .

- المقارن مع مقسم الجهد كقيمة مرجعية Comparator Voltage-divider Reference .

- المقارن مع دايود زينر كقيمة مرجعية Comparator Zener diode Reference .

2- 1- 1 المقارن ذو قيمة مرجعية صفرية Zero-Level Detection :

في هذه الحالة نقوم بتوصيل الجهد على أحد طرفي الدخل للمكبر بينما يتم توصيل الطرف الآخر مع الأرضي للحصول على قيمة صفرية للجهد (الشكل 2- 1).



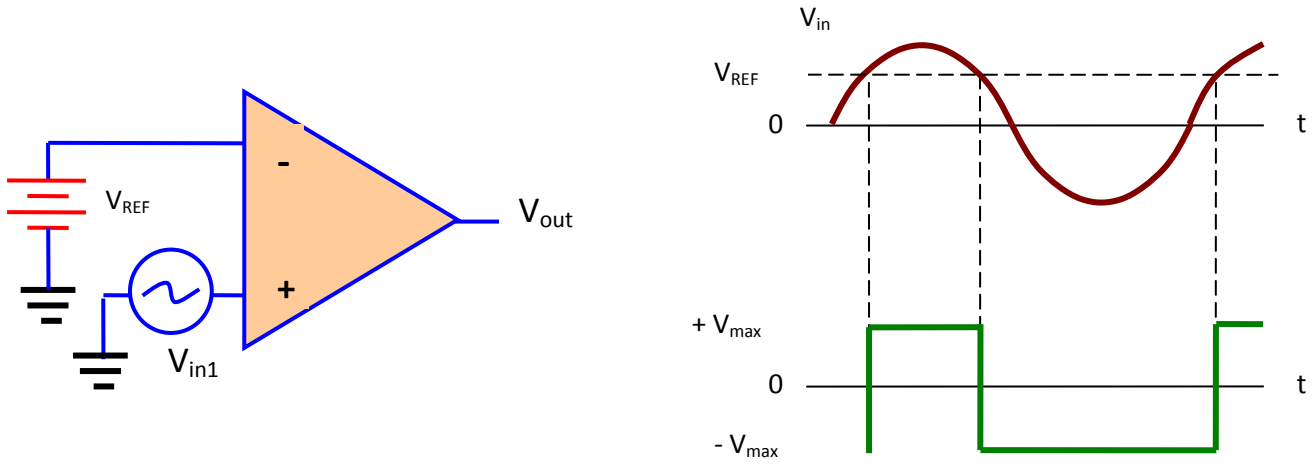
الشكل (2- 1) المقارن ذو قيمة مرجعية صفرية

بسبب معامل التكبير الهائل لمكبر العمليات في حالة المسار المفتوح فإن أقل قيمة للجهد بين طرفي الدخل ستعطي قيمة عالية على الخرج مما يدخل مكبر العمليات مباشرة في حالة الإشباع (Saturation) مما يثبت قيمة جهد الخرج على مستوى $V_{max} \pm$ والتي تكون معلومة للمكبر (معظم مكبرات العمليات لا تتجاوز قيمة جهد الخرج القصوى $\pm$ 15 V) . إذا ما قمنا بتوصيل الجهد للطرف العاكس والأرضي للطرف غير العاكس فسوف نحصل على موجة مربعة مقلوبة بالنسبة للموجة الجيبية.

يتضح من الرسم أعلاه أن هذا النوع من المقارنات يستخدم للحصول على موجة مربعة من الموجة الجيبية.

2- 1- 2 المقارن مع البطارية كقيمة مرجعية Battery Reference Comparator :

في هذا النوع والأنواع اللاحقة سوف تكون قيمة جهد مرجعية لا تساوي الصفر على أحد طرفي المكبر بينما يتم إدخال الجهد على الطرف الآخر. في هذه الحالة قيمة الجهد المرجعية يتم الحصول عليها باستخدام بطارية (الشكل 2- 2).



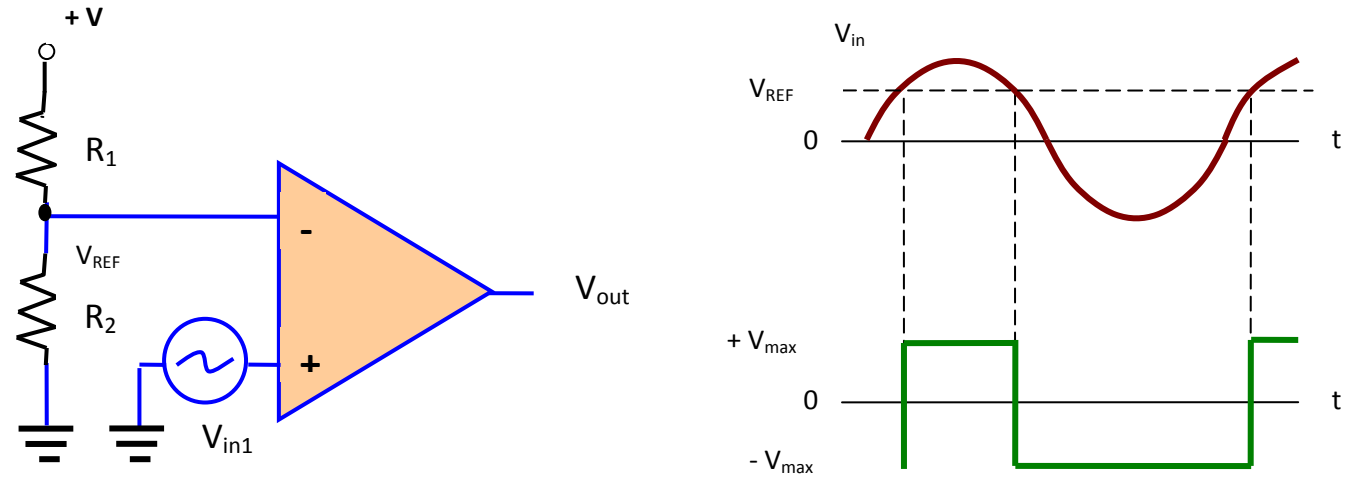
الشكل (2- 2) المقارن مع البطارية كقيمة مرجعية

2- 1- 3 المقارن مع مقسم الجهد كقيمة مرجعية Voltage-divider Reference Comparator :

كبديل للبطارية سوف نقوم بتوصيل قيمة الجهد المرجعية على الطرف العاكس بالاستعانة بمقسم الجهد (Voltage Divider) المكون من المقاومات R_1 و R_2 وفقاً للعلاقة التالية:

$$V_{REF} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}(+V) \qquad (2\text{-}1)$$

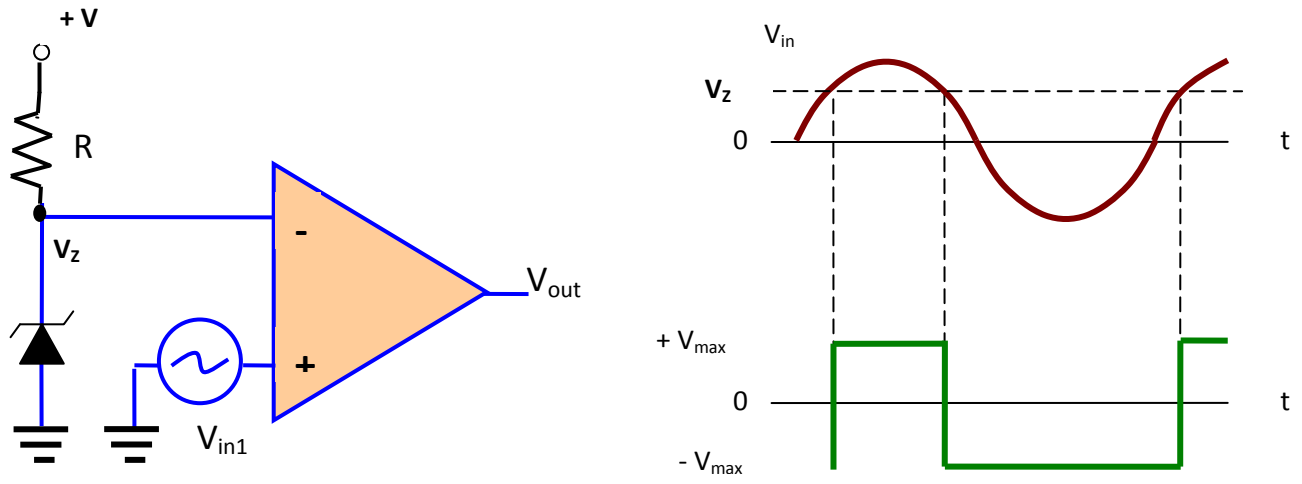
حيث إن $+V$ ترمز لجهد التغذية الموجب الذي يغذي مكبر العمليات. بعد حساب قيمة الجهد المرجعية من العلاقة (2- 1) يتم تحديدها على إشارة الدخل ومن ثم متابعة الرسم كما هو على الشكل (2- 3).



الشكل (2- 3) المقارن مع مقسم الجهد كقيمة مرجعية

2- 1- 4 المقارن مع دايود زينر كقيمة مرجعية Zener diode Reference Comparator :

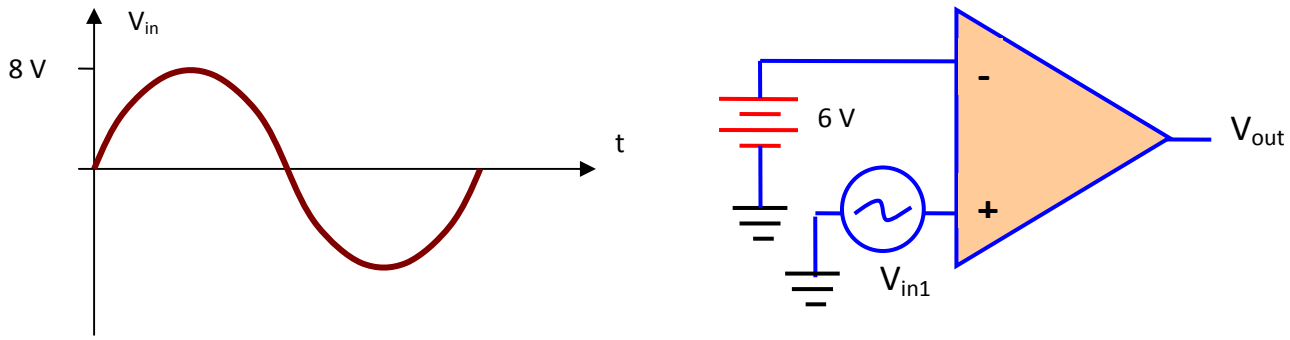
تتميز هذه الدائرة باستخدام دايود زينر لتثبيت وتوصيل قيمة الجهد المرجعية حيث إن $V_{REF} = V_Z$ كما هو موضح على الشكل (2- 4).



الشكل (2- 4) المقارن مع دايود زينر كقيمة مرجعية

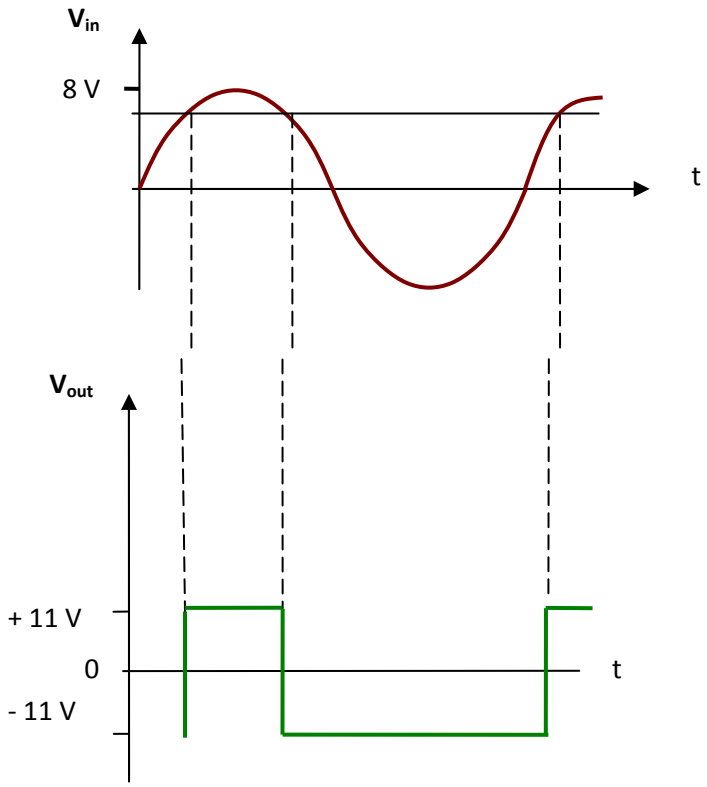
مثال 2- 1:

أرسم الموجة على مخرج المقارن التالي علماً بأن قيمة الجهد القصوى للمكبر ($V_{max} = \pm 11$ V).



الشكل (2- 5)

الحل:



الشكل (2- 6)

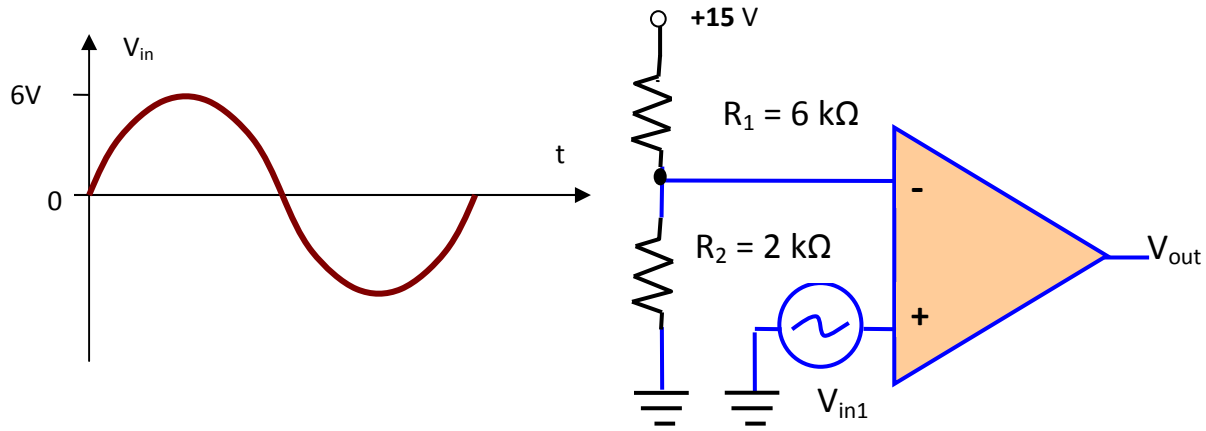
مثال 2=2 :

أرسم الموجة على مخرج المقارن التالي علماً بأن قيمة الجهد القصوى للمكبر ($V_{max} = \pm 14\ V$).

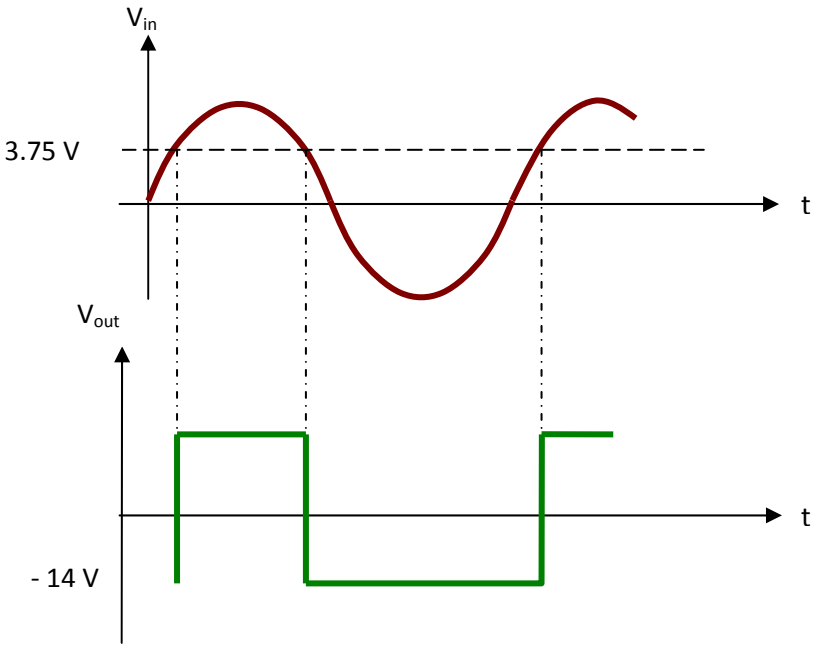
الحل:

باستخدام العلاقة (2- 1) نقوم بحساب قيمة الجهد المرجعية:

$$V_{REF} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}(+V) = \frac{2k}{6k + 2k}(+15) = 3.75\ V.$$



الشكل (2- 7)



الشكل (2- 8)

2- 2 المكبر الجامع Summing Amplifier

المكبر الجامع عبارة عن مكبر عمليات في وضع التشغيل العاكس (Inverting) ويمكن أن يكون له أكثر من مدخل موصولة على المدخل العاكس بينما يبقى المدخل غير العاكس موصلاً بالأرضي حيث يقوم بعملية الجمع بين جميع المداخل ويمكننا التحكم بقيمة معامل التكبير لكل مدخل على حده. سوف نتعامل مع ثلاث حالات للمكبر الجامع:

- المكبر الجامع ذو معامل تكبير يساوي الوحدة Summing Amplifier with Unity Gain.
- المكبر الجامع ذو معامل تكبير أكبر من واحد Summing Amplifier with Gain Greater than Unity.
- المكبر الجامع لإيجاد المتوسط الحسابي Averaging Amplifier.
- المكبر الجامع متغير التكبير Scaling Adder.

في جميع الحالات السابقة يمكننا إيجاد قيم الجهد الناتج على مخرج المكبر وفقاً للعلاقة التالية:

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R_1}V_{in1} - \frac{R_f}{R_2}V_{in2} - \frac{R_f}{R_3}V_{in3} - \ldots \frac{R_f}{R_N}V_{inN}$$
$$= -R_f\left(\frac{V_{in1}}{R_1} + \frac{V_{in2}}{R_2} + \frac{V_{in3}}{R_3} + \ldots + \frac{V_{inN}}{R_N}\right) \qquad (2\text{-}2)$$

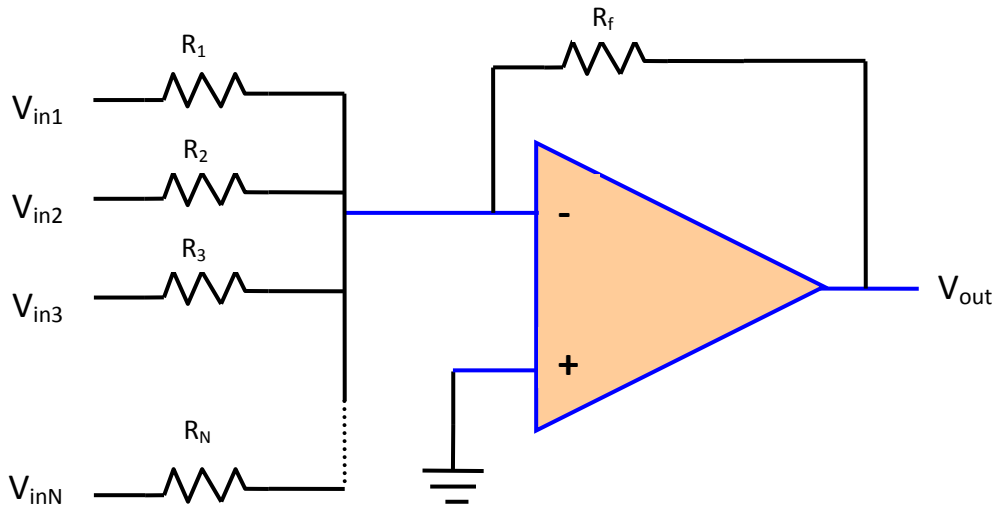
2- 2- 1 المكبر الجامع ذو معامل تكبير يساوي الوحدة Summing Amplifier with Unity Gain.

يوضح الشكل (2- 9) دائرة مكبر جامع ذي عدد مداخل (N). حتى نحصل على معامل تكبير يساوي واحد يجب أن يتحقق الشرط التالي:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_N = R_N = R_f \qquad (2\text{-}3)$$

يمكننا إيجاد قيمة الجهد على مخرج المكبر كمجموع جميع القيم المدخلة على الطرف العاكس وفقاً للعلاقة التالية:

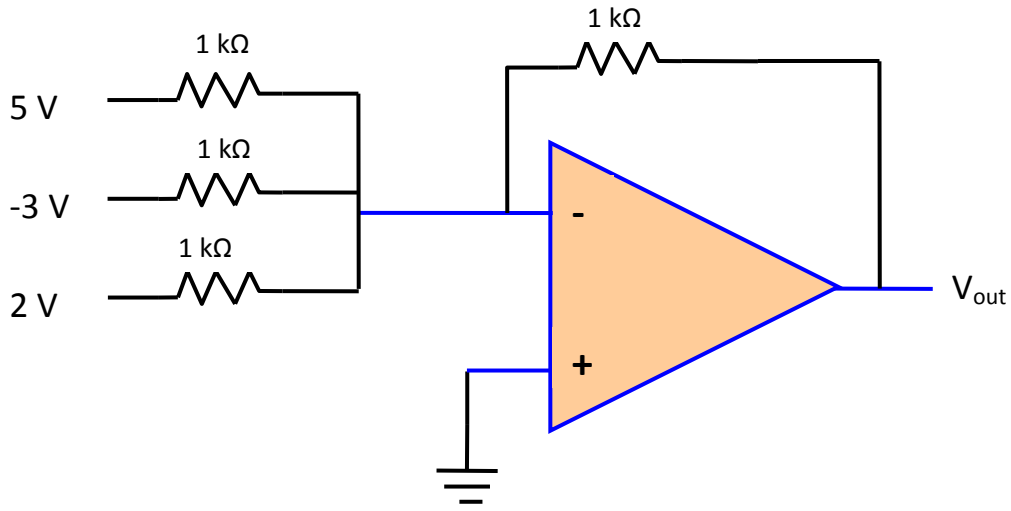
$$V_{out} = -\left(V_{in1} + V_{in2} + V_{in3} + \ldots + V_{inN}\right) \qquad (2\text{-}4)$$



الشكل (2- 9) المكبر الجامع ذو معامل تكبير يساوي الوحدة

مثال 2- 3:

أوجد الجهد الناتج على مخرج دائرة المجمع التالية (الشكل 2- 10):



الشكل (2- 10)

الحل:

يتضح من الشكل أعلاه أن معامل التكبير يساوي واحد كون جميع المقاومات متساوية القيمة.

$$V_{out} = -\left(V_{in1} + V_{in2} + V_{in3} + \ldots + V_{inN}\right)$$

$$V_{out} = -[5V + (-3V) + 2V] = -4V$$

2- 2- 2 المكبر الجامع ذو معامل تكبير أكبر من واحد Summing Amplifier with Gain Greater Than Unity:

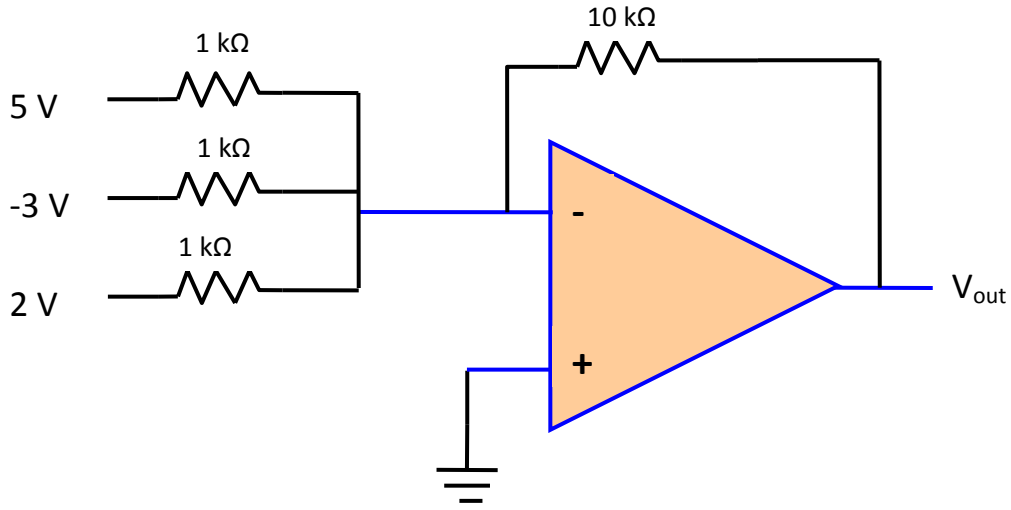
يوضح الشكل (2- 11) دائرة مكبر جامع ذي عدد مداخل (N). حتى نحصل على معامل تكبير لا يساوي واحد يجب أن تكون R_f أكبر من قيمة مقاومة الدخل R_{in} .

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_N = R_N \neq R_f \qquad (2\text{-}5)$$

مزيد من التوضيح في المثال التالي:

مثال 2- 4:

أوجد الجهد الناتج على مخرج دائرة المجمع التالية (الشكل 2- 11):



الشكل (2- 11)

الحل:

يتضح من الشكل أعلاه أن معامل التكبير لا يساوي واحد كون جميع المقاومات متساوية القيمة ولكنها لا تساوي R_f .

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R}\left(V_{in1} + V_{in2} + V_{in3}\right)$$

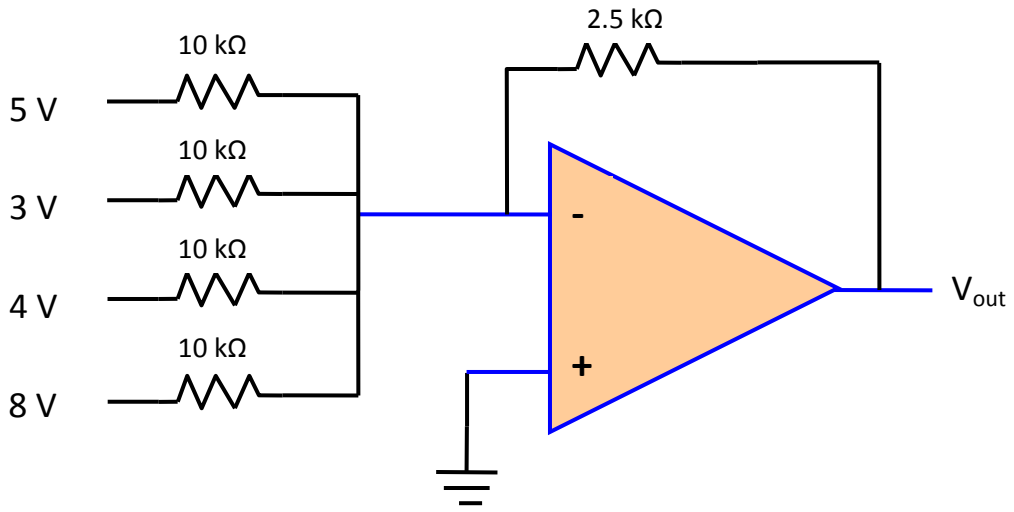
$$V_{out} = -\frac{10k\Omega}{1k\Omega}[5V + (-3V) + 2V] = -40V$$

2- 2- 3 المكبر الجامع لإيجاد المتوسط الحسابي Averaging Amplifier:

تتميز هذه الدائرة بمعامل تكبير أقل من واحد للتمكن من إيجاد المتوسط الحسابي لمجموعة قيم الجهد المدخلة بحيث أن قيمة معامل التكبير تساوي مقلوب عدد المداخل. مزيد من التوضيح في المثال التالي:

مثال 2- 5

أوجد الجهد الناتج على مخرج دائرة المجمع التالية (الشكل 2- 12):



الشكل (2- 12)

الحل:

يتضح من الشكل أعلاه أن معامل التكبير لا يساوي واحد كون جميع المقاومات متساوية القيمة ولكنها لا تساوي R_f .

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R}\left(V_{in1} + V_{in2} + V_{in3} + V_{in4}\right)$$

$$V_{out} = -\frac{2.5\,k\Omega}{10\,k\Omega}\left[5V + 3V + 4V + 8V\right] = \frac{-20V}{4} = -5V$$

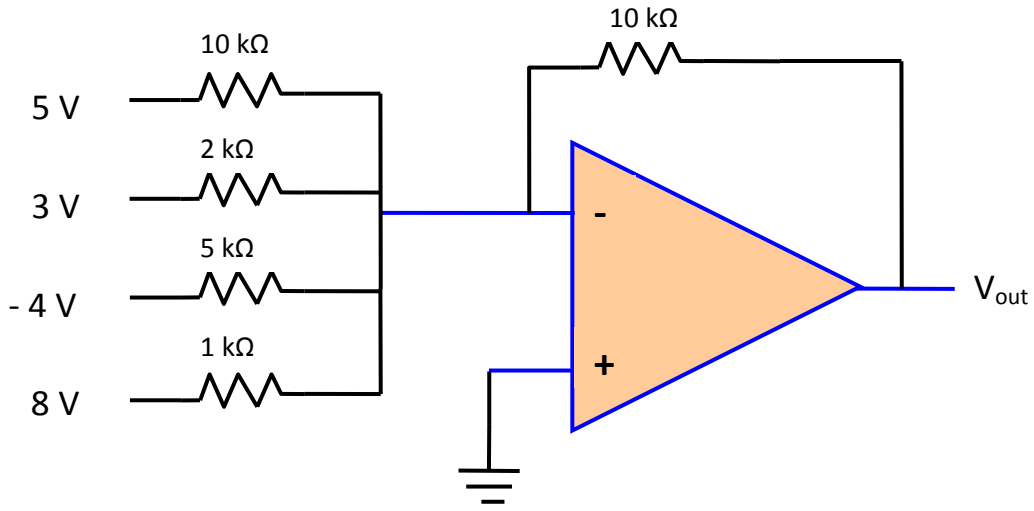
2- 2- 4 المكبر الجامع متغير التكبير Scaling Adder:

تتميز هذه الدائرة بمعامل تكبير متغير حيث يتم تعديل كل جهد على المداخل بمعامل مختلف عن الآخر ولتحقيق ذلك تكون قيم المقاومات على المداخل مختلفة القيمة.

$$R_1 \neq R_2 \neq R_3 \neq R_N \neq R_N \neq R_f$$

مثال 2- 6

أوجد الجهد الناتج على مخرج دائرة المجمع التالية (الشكل 2- 13):



الشكل (2- 13)

الحل:

يتضح من الشكل أعلاه أن معامل التكبير لا يساوي واحد كون جميع المقاومات غير متساوية القيمة.

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R_1}V_{in1} - \frac{R_f}{R_2}V_{in2} - \frac{R_f}{R_3}V_{in3} - \frac{R_f}{R_4}V_{in4}$$

$$= -R_f\left(\frac{V_{in1}}{R_1} + \frac{V_{in2}}{R_2} + \frac{V_{in3}}{R_3} + \frac{V_{inN}}{R_N}\right)$$

$$= -10k\left(\frac{5V}{10k} + \frac{3V}{2k} + \frac{-4V}{5k} + \frac{8V}{1k}\right) =$$

$$= -5V - 15\,V + 8V - 80V = -92\,V.$$

2- 3 مكبرات التكامل Op-Amp Integrators:

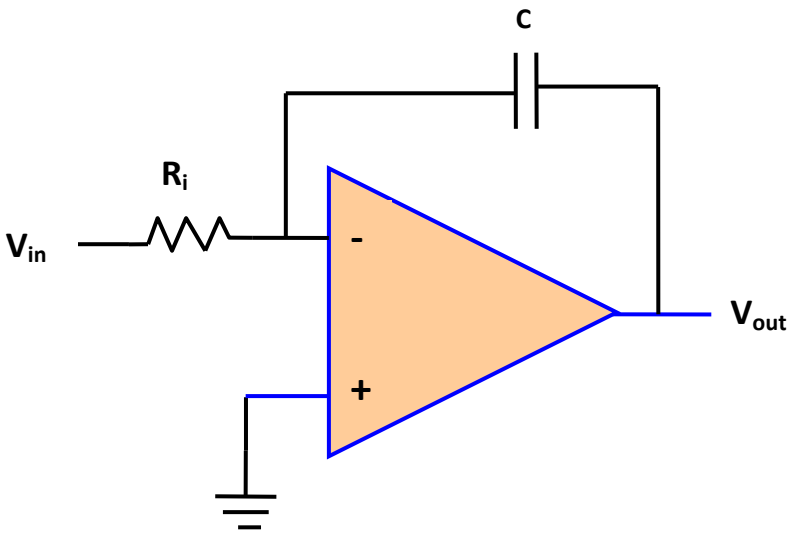
يقوم مكبر التكامل بنمذجة عملية التكامل في الرياضيات أي يقوم بإيجاد التكامل للقيمة المدخلة عليه والذي يعني حساب المساحة تحت المنحنى أو الدالة. يظهر الشكل (2- 14) الشكل المثالي لدائرة مكبر التكامل والذي هو عبارة عن مكبر عاكس مع توصيل مكثف في دائرة التغذية الراجعة يشكل

دائرة RC مع المقاومة الموجودة عند المدخل. كما هو معلوم من الدوائر الكهربائية فإن المكثف يقوم بالشحن وذلك وفقاً للعلاقة:

$$Q = I_C\, t = CV_C \qquad (2\text{-}6)$$

من العلاقة السابقة يمكننا استنتاج العلاقة التالية للجهد على المكثف V_C :

$$V_C = \left(\frac{I_C}{C}\right)t \qquad (2\text{-}7)$$

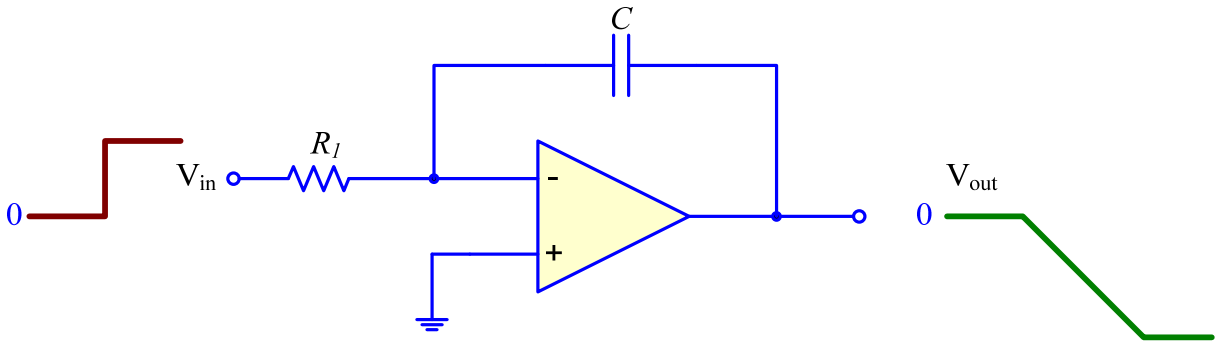


الشكل (2- 14) مكبر التكامل

العلاقة (2- 7) تعتبر علاقة خطية بالنسبة للمتغير t تعطينا خطاً مستقيماً يبدأ من الصفر وبميل ثابت يساوي I_C/C .

فإذا ما أدخلنا جهداً مستمراً والذي يمثل رقماً ثابتاً، فإن ناتج التكامل هو عبارة عن خط مائل كما في الشكل (2-15). وبذلك يمكن تحويل الموجة المربعة إلى موجة مثلثة ويكون معدل التغير في الخرج هو:

$$\frac{\Delta V_{out}}{\Delta t} = -\frac{V_{in}}{RC} \qquad (2\text{-}8)$$

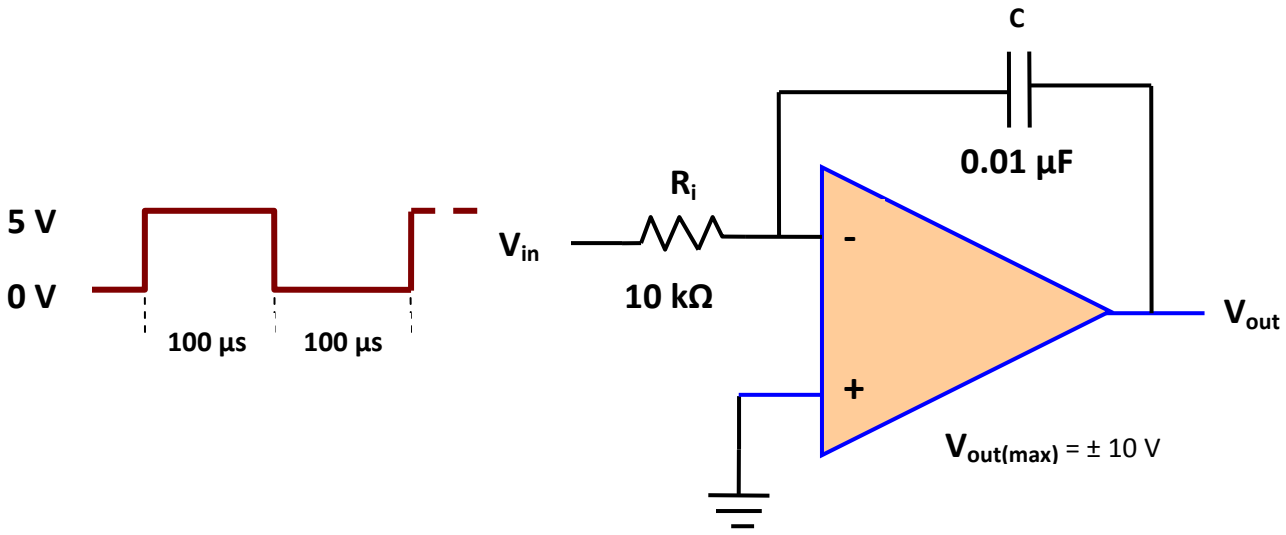


الشكل (2- 15) تكامل قيمة ثابتة

مزيد من التوضيح عن عمل مكبر التكامل انظر مثال 2- 7.

مثال 2- 7:

أرسم موجة الخرج لدائرة مكبر التكامل على الشكل (2- 16).



الشكل (2- 16)

الحل:

نحسب أولاً معدل تغيير الجهد على الخرج باستخدام العلاقة (2- 8):

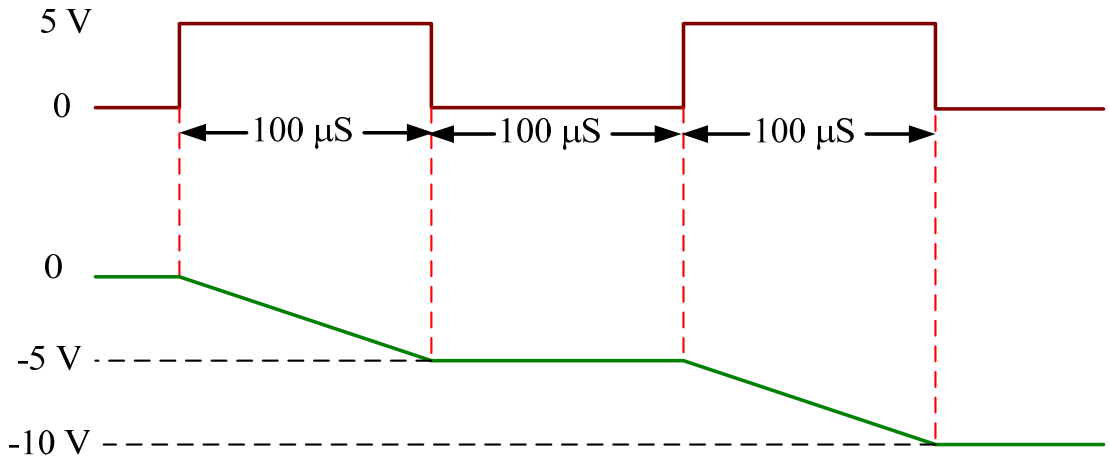
$$\frac{\Delta V_{out}}{\Delta t} = -\frac{V_{in}}{RC}$$

$$= -\frac{5V}{10k\Omega \times 0.01\mu F} = -50kV/s = -50mV/\mu s$$

أي أن معدل التغيير لقيمة 100 µs تصبح:

$$-50\ mV/\mu s \times 100\ \mu s = -5\ V$$

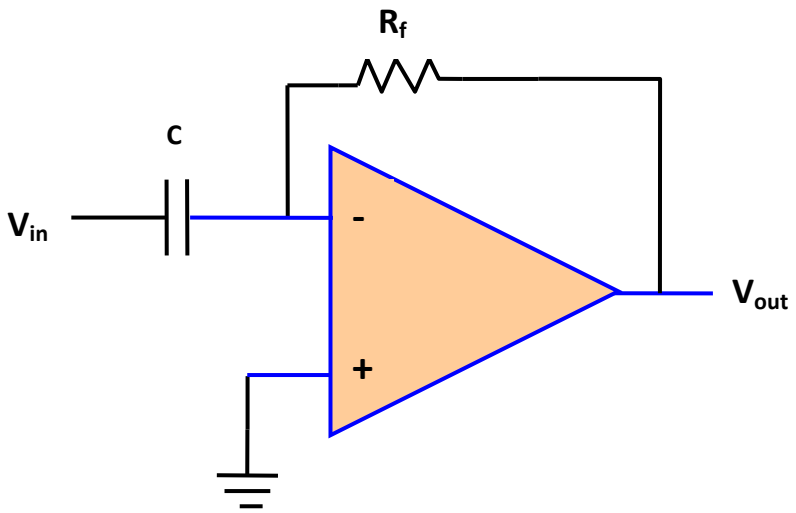
ويكون شكل الموجة الناتجة على مخرج الدائرة كما هو على الشكل أدناه:



الشكل (2-17)

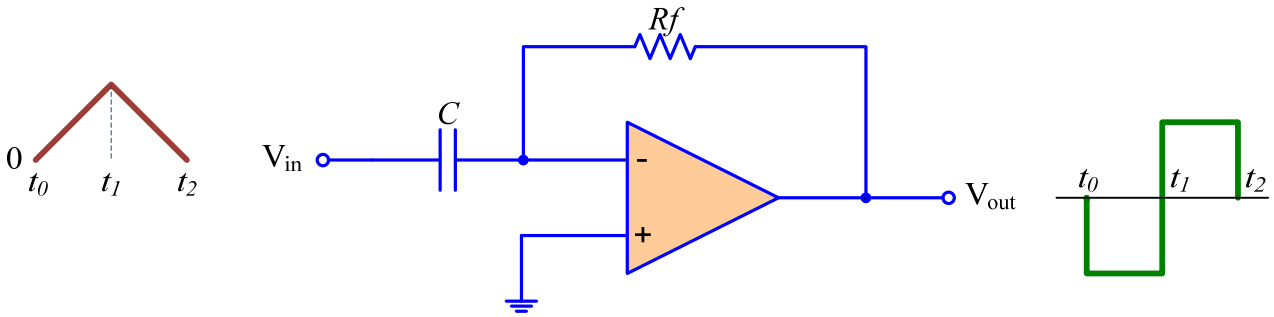
2- 4 مكبرات الاشتقاق Op-Amp Differentiators

يقوم مكبر الاشتقاق بنمذجة عملية الاشتقاق أو التفاضل في الرياضيات والتي تعني إيجاد القيمة اللحظية لمعدل تغيير الدالة أو الاقتران (الميل). يظهر الشكل (2- 18) مكبر الاشتقاق حيث يتم تبديل مواقع المقاومة والمكثف مقارنة مع دائرة مكبر التكامل.



الشكل (2- 18) مكبر الاشتقاق

إذا كانت الإشارة على الدخل عبارة عن خط مستقيم بميل معين، فإن ناتج الاشتقاق هو رقم ثابت يعبر عن مقدار الميل. ولذلك يمكن استخدام مكبر الاشتقاق في تحويل الموجة المثلثة إلى موجة مربعة كما في الشكل (2-19).



الشكل (2- 19) عملية اشتقاق خط مائل والناتج على الخرج

ويُعبر عن قيمة جهد الخرج بالمعادلة التالية:

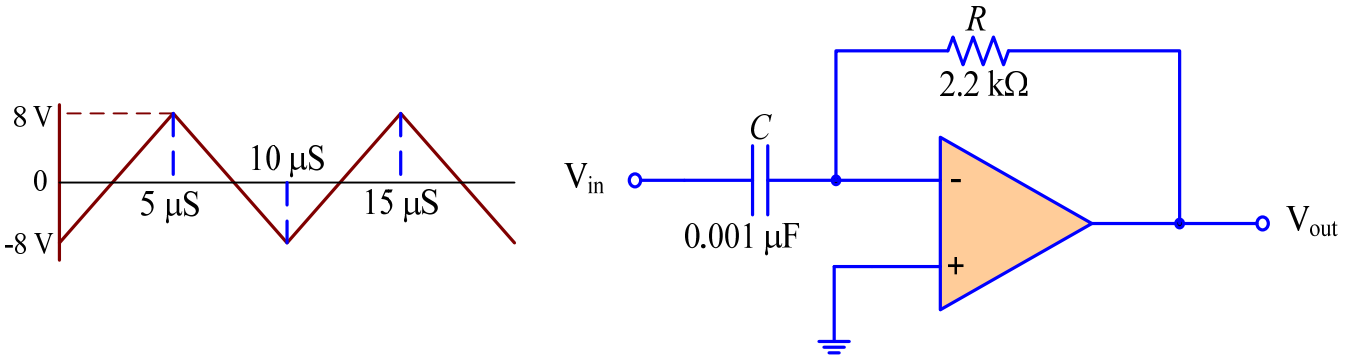
$$V_{out} = I_R R_f = I_C R_f$$

$$V_{out} = -\left(\frac{V_{in}}{t}\right) R_f C \qquad (2\text{-}9)$$

مزيد من التوضيح عن عمل مكبر التكامل انظر مثال 2- 8.

مثال 2- 8

ارسم موجة الخرج لدائرة مكبر الاشتقاق التالية:



الشكل (2- 20)

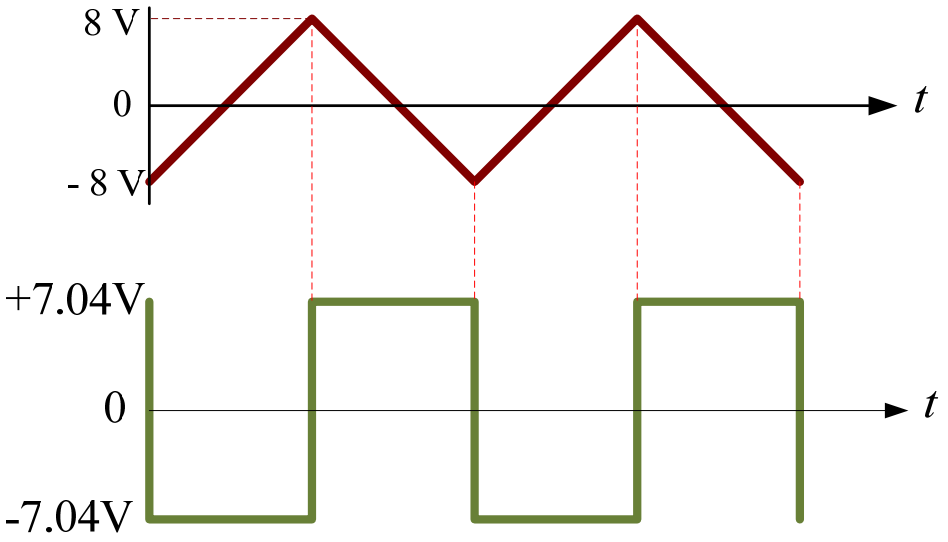
قيمة جهد الخرج في حالة الميل الصاعد:

$$V_{out} = -\left(\frac{V_{in}}{t}\right) R_f C = -\left(\frac{16}{5\,\mu}\right) 2.2\,\text{k} \times 0.001\,\mu = -7.04\,\text{V}$$

وفي حالة الميل السالب (نزول):

$$V_{out} = -\left(\frac{V_{in}}{t}\right) R_f C = -\left(-\frac{16}{5\,\mu}\right) 2.2\,\text{k} \times 0.001\,\mu = +7.04\,\text{V}$$

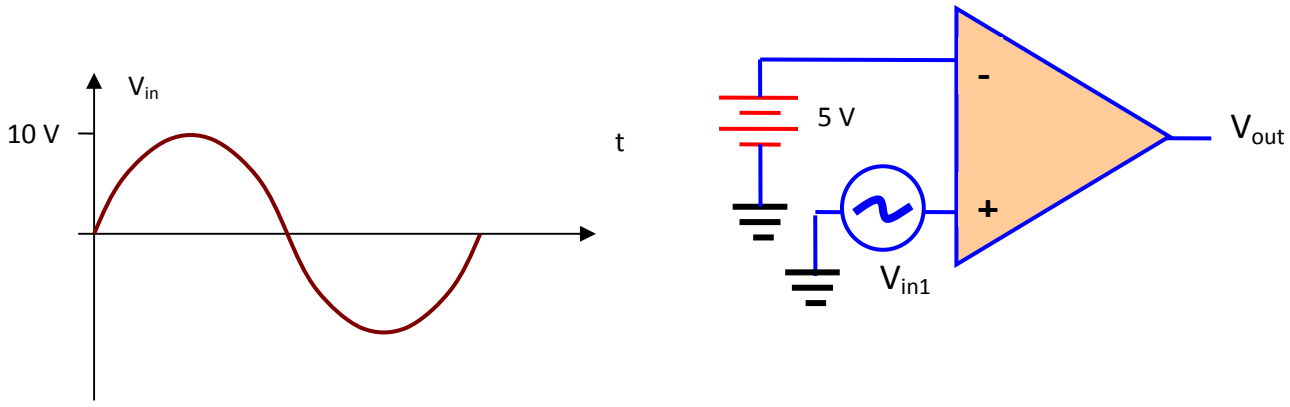
فيكون شكل موجة الخرج على النحو التالي:



الشكل (2- 21)

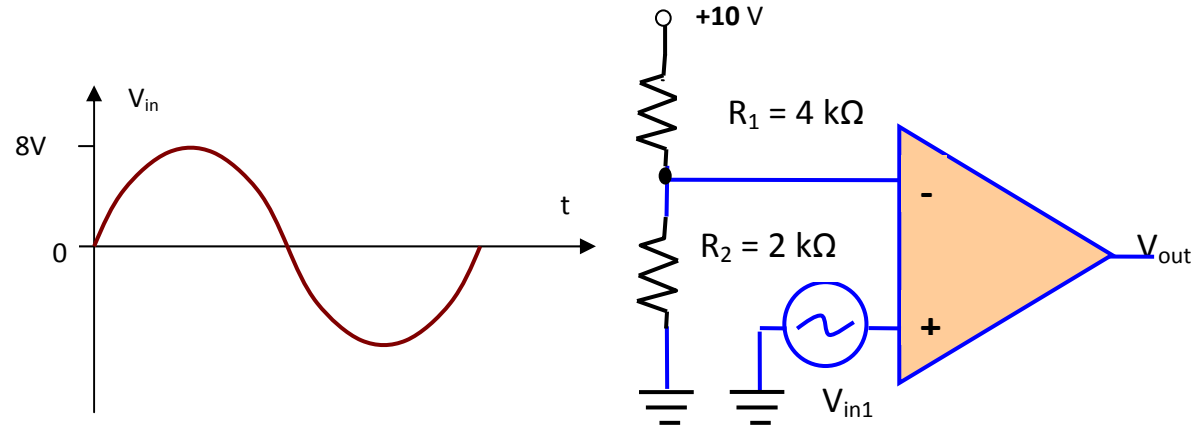
أسئلة وتمارين

1- ارسم الموجة على مخرج المقارن التالي علماً بأن قيمة الجهد القصوى للمكبر ($V_{max} = \pm 11\ V$).



الشكل (2- 22)

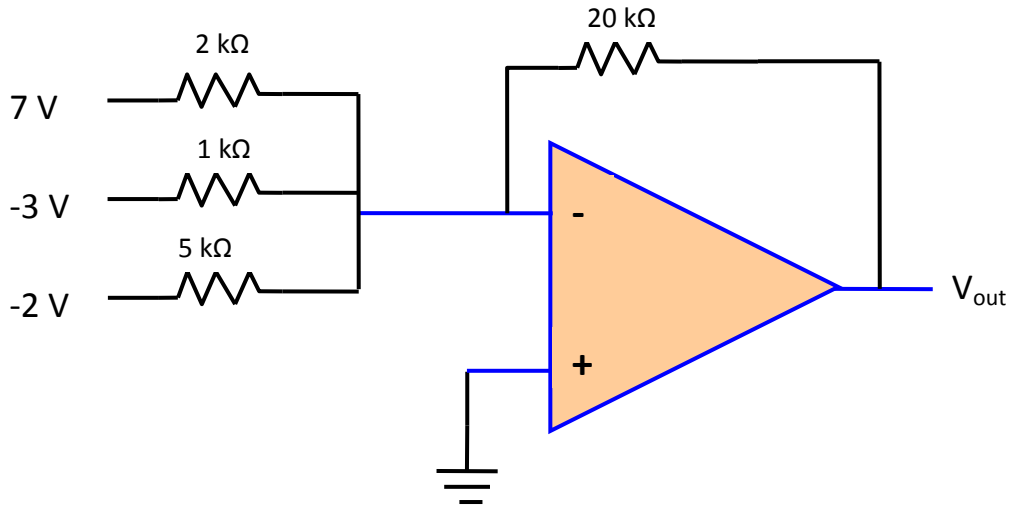
2- ارسم الموجة على مخرج المقارن التالي علماً بأن قيمة الجهد القصوى للمكبر ($V_{max} = \pm 14\ V$).



الشكل (2- 23)

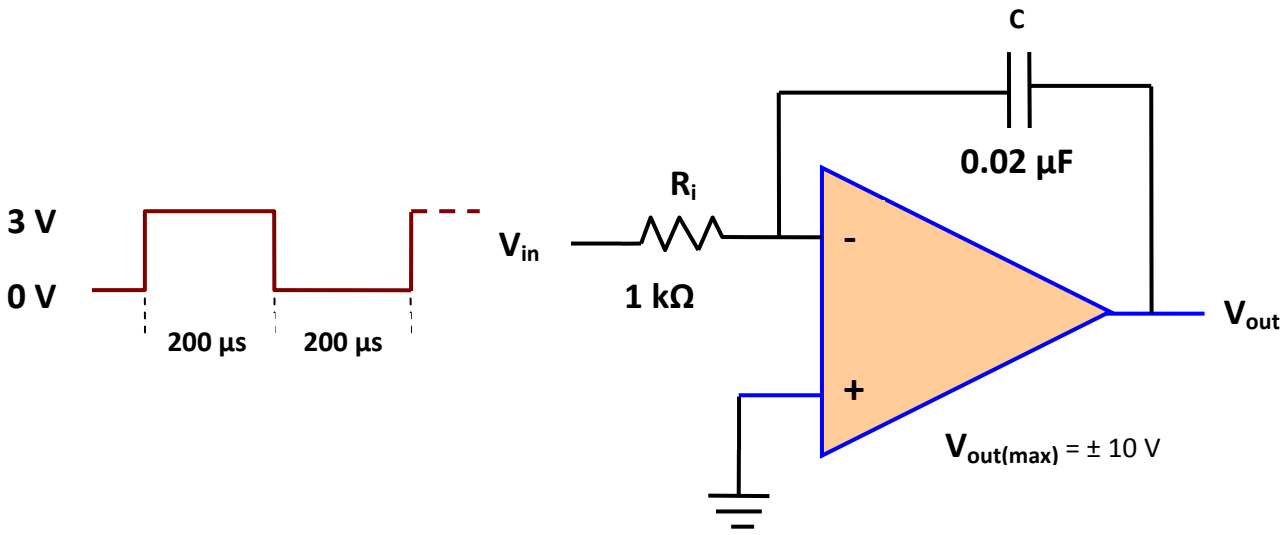
3- كيف يمكننا تصميم دائرة مجمع لحساب القيمة المتوسطة.

4- أوجد الجهد الناتج على مخرج دائرة المجمع التالية (الشكل 2- 24):



الشكل (2- 24)

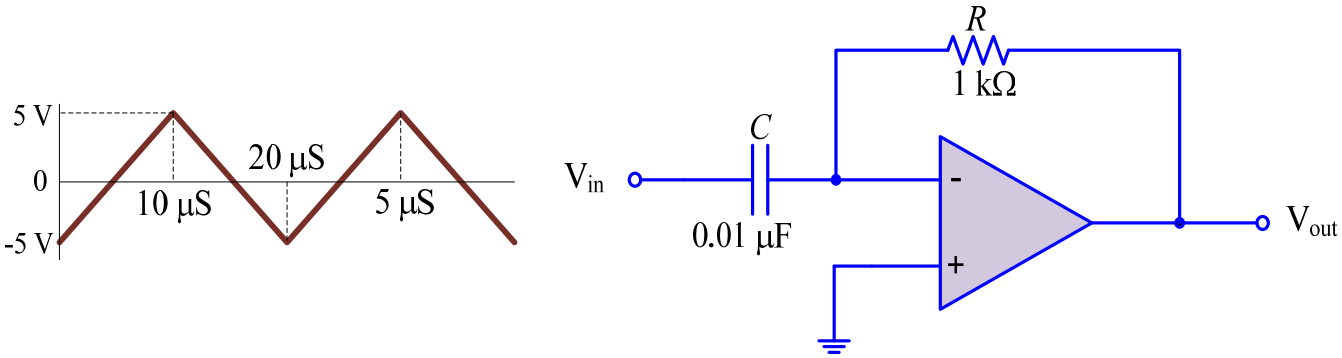
5- ارسم موجة الخرج لدائرة مكبر التكامل على الشكل (2- 25).



الشكل (2- 25)

6- ما هو الفرق الرئيس بين مكبر الاشتقاق ومكبر التكامل.

7- ارسم موجة الخرج لدائرة مكبر الاشتقاق التالية:



الشكل (2- 26)