المملكة العربية السعودية
المؤسسة العامة للتدريب التقني والمهني
الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

تخصص اتصالات

إلكترونيات

١٢٧ تصل

طبعة ١٤٢٩ هـ

مقدمة

الحمد لله وحده، والصلاة والسلام على من لا نبي بعده، محمد وعلى آله وصحبه، وبعد:

تسعى المؤسسة العامة للتدريب التقني والمهني لتأهيل الكوادر الوطنية المدربة القادرة على شغل الوظائف التقنية والفنية والمهنية المتوفرة في سوق العمل، ويأتي هذا الاهتمام نتيجة للتوجهات السديدة من لدن قادة هذا الوطن التي تصب في مجملها نحو إيجاد وطن متكامل يعتمد ذاتياً على موارده وعلى قوة شبابه المسلح بالعلم والإيمان من أجل الاستمرار قدماً في دفع عجلة التقدم التنموي؛ لتصل بعون الله تعالى لمصاف الدول المتقدمة صناعياً.

وقد خطت الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج خطوة إيجابية تتفق مع التجارب الدولية المتقدمة في بناء البرامج التدريبية، وفق أساليب علمية حديثة تحاكي متطلبات سوق العمل بكافة تخصصاته لتلبي متطلباته ، وقد تمثلت هذه الخطوة في مشروع إعداد المعايير المهنية الوطنية الذي يمثل الركيزة الأساسية في بناء البرامج التدريبية، إذ تعتمد المعايير في بنائها على تشكيل لجان تخصصية تمثل سوق العمل والمؤسسة العامة للتدريب التقني والمهني بحيث تتوافق الرؤية العلمية مع الواقع العملي الذي تفرضه متطلبات سوق العمل، لتخرج هذه اللجان في النهاية بنظرة متكاملة لبرنامج تدريبي أكثر التصاقاً بسوق العمل، وأكثر واقعية في تحقيق متطلباته الأساسية.

وتتناول هذه الحقيبة التدريبية " **إلكترونيات** " لمتدربي تخصص "**الاتصالات**" في الكليات التقنية موضوعات حيوية تتناول كيفية اكتساب المهارات اللازمة لهذا التخصص.

والإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج وهي تضع بين يديك هذه الحقيبة التدريبية تأمل من الله عز وجل أن تسهم بشكل مباشر في تأصيل المهارات الضرورية اللازمة، بأسلوب مبسط يخلو من التعقيد، وبالاستعانة بالتطبيقات والأشكال التي تدعم عملية اكتساب هذه المهارات.

والله نسأل أن يوفق القائمين على إعدادها والمستفيدين منها لما يحبه ويرضاه؛ إنه سميع مجيب الدعاء.

الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

الإلكترونيات

الدايود الثنائي

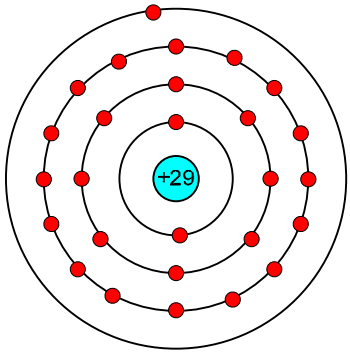
الوحدة الأولى: الوصلة الثنائية

أشباه الموصلات

تنقسم المواد حسب قدرتها على توصيل التيار الكهربائي إلى ثلاثة أقسام رئيسة:

١. المواد الموصلة Conductors
٢. المواد العازلة Insulators
٣. المواد شبه الموصلة Semi-conductors

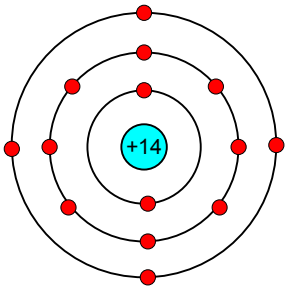
المواد الموصلة: وهي المواد التي توصل التيار الكهربائي بسهولة بالغة مثل النحاس، والفضة، والذهب، والألمنيوم. وهذه المواد تحتوي ذراتها على إلكترون واحد في مدارها الأخير كما في الشكل (١-١). ولكون هذا الإلكترون وحيداً، فإن ارتباطه بالذرة يكون ضعيفاً مما يسهل حركته وانفلاته. ومن المعلوم أن التيار الكهربائي ما هو إلا حركة الإلكترونات في الموصل. فإذا تحركت الإلكترونات بسهولة في اتجاه معين فذلك هو التيار الكهربائي الذي يسير في هذا الموصل.



الشكل (١-١) ذرة النحاس

المواد العازلة: وهي المواد التي لا توصل التيار الكهربائي مثل الزجاج. وهذه المواد تكون الإلكترونات التي في المدار الأخير مرتبطة بقوة بالذرة ومن الصعب انفلاتها. ونظراً لأن الإلكترونات لا تتحرك، فلن يكون هناك أي تيار كهربائي.

المواد شبه الموصلة: وهي المواد التي تكون قدرتها على توصيل الكهرباء بين المواد الموصلة والمواد العازلة مثل مادة السليكون Silicon والجرمانيوم Germanium. وهذه المواد تحتوي، عادة، على أربعة إلكترونات في مدارها الأخير كما هو موضح في الشكل (١- ٢). وتعتبر مادة السليكون من أهم المواد شبه الموصلة والمستخدمة في تصنيع القطع الإلكترونية، ولكن السليكون النقي في حد ذاته لا يستخدم مباشرة في التطبيقات، ولكن يجب إضافة مادة أخرى إليه لتغيير خصائصه حيث يمكن أن يكون موصلاً أو عازلاً حسب الحاجة. وللعلم فإن علم الإلكترونيات قائم على التحكم في مقدار وشدة التيار الكهربائي ومتى يمر أو لا يمر.

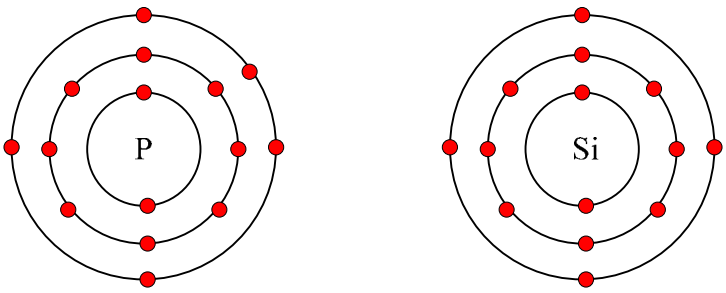


الشكل (١-٢) ذرة سليكون

تسمى عملية إضافة المواد الأخرى (الشوائب) التطعيم Doping. ومن أشهر المواد التي تضاف إلى مادة السليكون هي مادتا الفوسفور Phosphor والبورون Boron.

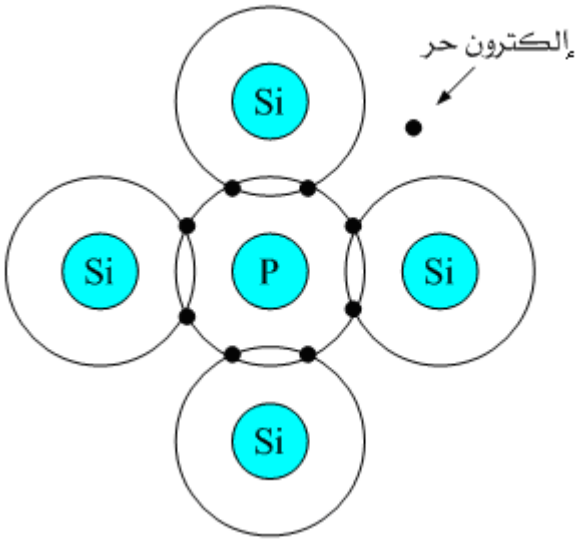
السليكون السالب *N*-type Silicon

من المعلوم أن الإلكترونات ذات شحنات سالبة. وذرة السليكون تحتوي على أربعة إلكترونات في مدارها الأخير، وتحتوي ذرة الفوسفور على خمسة إلكترونات في مدارها الأخير كما في الشكل (١-٣).



الشكل (١-٣) ذرة سليكون وذرة فوسفور

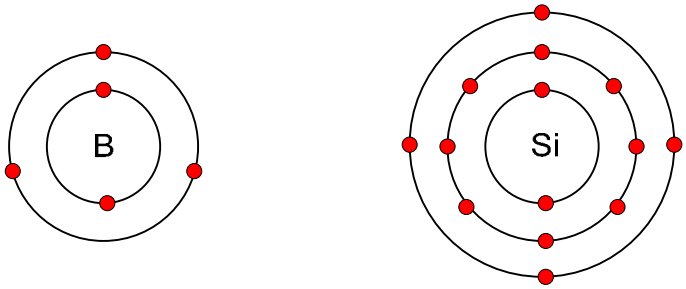
فعند إضافة مادة الفوسفور إلى السليكون، فإن إلكترونات السليكون الأربعة ترتبط بأربعة إلكترونات من ذرة الفوسفور، ويبقى إلكترون واحد عائماً بدون رابط. وينتج عن هذا المزج مادة سليكون سالبة *N*-type Silicon كما في الشكل (١-٤). وعند توصيل هذا النوع ببطارية، فإن هذا الإلكترون سوف ينجذب نحو الطرف الموجب للبطارية.



الشكل (١-٤) السليكون السالب

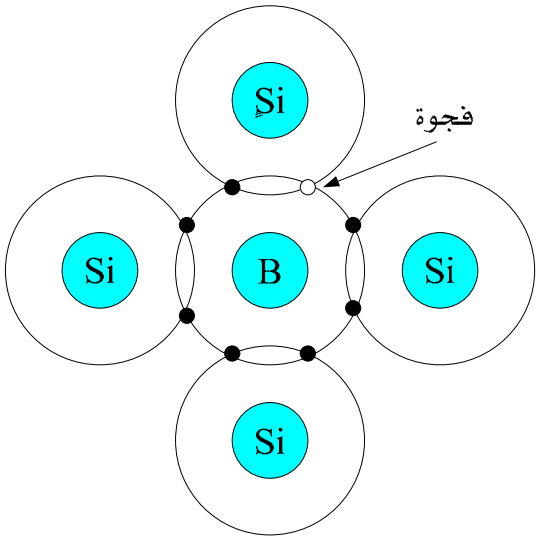
السليكون الموجب *P*-type Silicon

عند إضافة مادة البورون والتي تحتوي ذراتها على ثلاثة إلكترونات في مدارها الأخير كما في الشكل (١-٥) إلى السليكون النقي، فإن الإلكترونات الثلاثة سوف ترتبط بثلاثة إلكترونات من السليكون ويبقى مكان فارغ يسمى بفجوة Hole بين ذرة بورون واحدة وذرة سليكون واحدة كما في الشكل (١-٦).



الشكل (١-٥) ذرة سليكون وذرة بورون

ويسمى هذا المزيج بالسليكون من النوع الموجب *P*-type Silicon لوجود هذه الفجوة والتي تنجذب نحو الطرف السالب من البطارية عند توصيله بها.

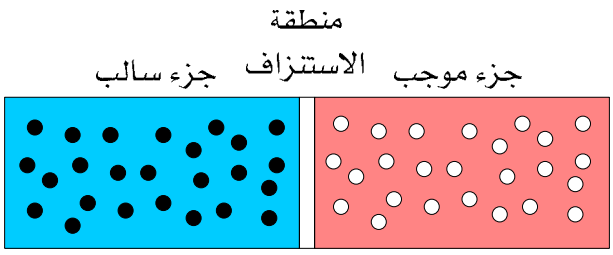


الشكل (١-٦) السليكون الموجب

لقد تم صناعة معظم القطع الإلكترونية المستخدمة في وقتنا الحاضر باستخدام هذين النوعين، السالب والموجب. فعند دمج هذين النوعين بطرق مختلفة، استطاع الإنسان أن يصنع الدايود Diode والترانزستور Transistor والذي أحدث ثورة صناعية هائلة. وتم كذلك صناعة القطع الخاصة بالليزر وقطع أخرى كثيرة ذات وظائف مختلفة.

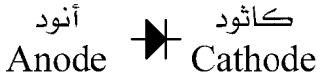
ثنائي الوصلة (الدايود Diode)

عندما نقوم بتوصيل جزء مادة السليكون السالب مع جزء موجب، فإنه يتكون لدينا وصلة تسمى الوصلة ثنائية القطبية p-n Junction أي أن لها قطبين "سالب وموجب" ، إضافة إلى تكون منطقة استنزاف Depletion Region كما في الشكل (١-٧).



الشكل (١-٧) الوصلة ثنائية القطبية

هذه الوصلة تشكل القطعة الإلكترونية والتي تسمى الدايود. وللدايود طرفان، الطرف الأول والمتصل بالنوع الموجب من الوصلة يسمى أنود Anode . ويسمى الطرف المتصل بالنوع السالب كاثود Cathode كما في الشكل (١-٨).

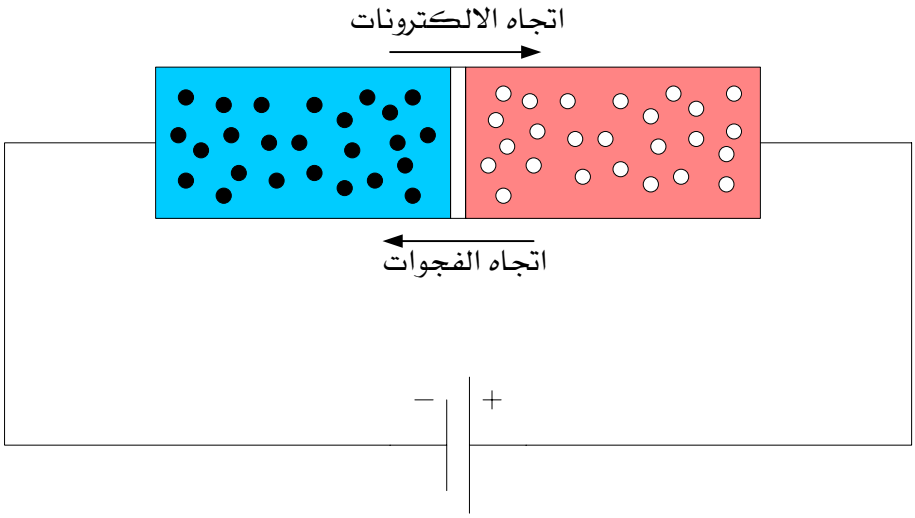


الشكل (١-٨) رمز الدايود

ويسمى الدايود بالموحد أيضاً لأنه يسمح بمرور التيار في اتجاه واحد ويسمى انحياز أمامي Forward Biasing، ويمنع مرور التيار في الاتجاه الآخر ويسمى انحياز عكسي Reverse Biasing.

الانحياز الأمامي

عندما نقوم بتوصيل الوصلة الثنائية بالبطارية كما في الشكل (١-٩)، فإن الإلكترونات التي في الجزء السالب ستنجذب ناحية القطب الموجب من البطارية. وتتحرك الفجوات نحو القطب السالب من البطارية. وبسبب منطقة الاستنزاف Depletion Region والتي تُكون هذه المنطقة حاجزاً بسيطاً في طريق حركة الإلكترونات. ولذلك فإن الإلكترونات تحتاج إلى فرق جهد يمكنها من تجاوز ذلك الحاجز. ففي حالة مادة السليكون، فإن الإلكترونات تحتاج إلى جهد مقداره 0.7V لتجاوز الحاجز، و 0.3V في حالة الجرمانيوم. ولأن السليكون يعتبر أكثر شهرة وأفضل من الجرمانيوم، فإننا سوف نستخدم السليكون أثناء دراستنا للموحد.

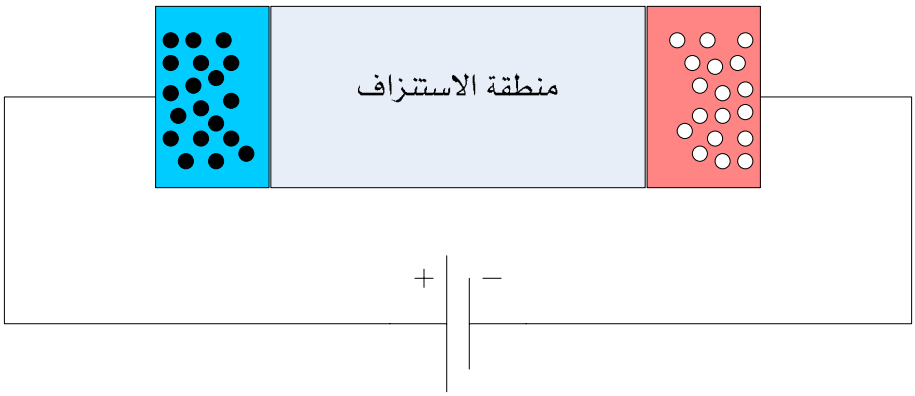


شكل (١-٩) الانحياز الأمامي

فإذا ما تم التوصيل بهذه الطريقة، فإنه يمر تيار في الوصلة. وتسمى هذه الحالة بالانحياز الأمامي.

الانحياز العكسي

إذا تم توصيل الوصلة الثنائية بالبطارية كما في الشكل (١-١٠)، حيث إن الأنود موصل بالطرف السالب للبطارية، والكاثود موصل بالطرف الموجب للبطارية، فإن الإلكترونات سوف تتجه للطرف الموجب للبطارية، وتتجه الفجوات إلى الطرف السالب للبطارية. ونتيجة لذلك، فإن منطقة الاستنزاف سوف تتسع اتساعاً كبيراً وتشكل حاجزاً كبيراً أمام تحرك الإلكترونات فلا تستطيع اجتيازه. وبالطبع، فإنه لن يمر التيار الكهربائي في الدائرة. ونسمي هذه الحالة بالانحياز العكسي.



شكل (١-١٠) الانحياز العكسي

ونستنتج من الحالتين، أنه لضمان مرور التيار في الموحد، فإنه يجب أن يكون جهد الأنود أكبر من جهد الكاثود بـ 0.7 V على الأقل.

مثال (١-١) الجدول التالي يوضح بعض حالات توصيل الموحد.

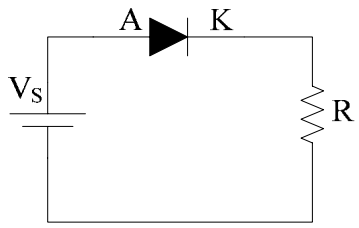
الحالة	نوع الانحياز	ملحوظات
5 V → |◄ 3 V	أمامي	يمر تيار
0 V → |◄ -4 V	أمامي	يمر تيار
1 V → |◄ 4 V	عكسي	لا يمر تيار
-7 V → |◄ 3 V	عكسي	لا يمر تيار
5 V → |◄ 4.9 V	أمامي	يمر تيار صغير جداً

خصائص الجهد والتيار للدايود

١. حالة الانحياز الأمامي

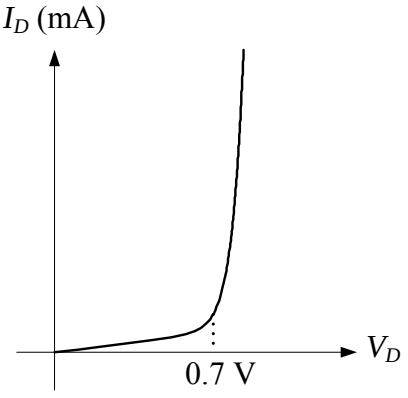
الدايود – كما مر معنا- يسمح بمرور التيار في حالة الانحياز الأمامي، ويحتاج إلى جهد مقداره 0.7V . والدايود يتحمل تياراً محدداً تختلف قيمته من دايود لآخر حسب التصنيع. وكما تتكون مقاومة داخلية صغيرة، r_d ،تختلف حسب نوعية الموحد.

إذا وصلنا الدايود في الدائرة الكهربائية حسب الشكل (١-١١)، فإن تياراً مقداره، I_D، سوف يمر في الدائرة لتوافي شروط الانحياز الأمامي. ولأن قيمة المقاومة الداخلية صغيرة جداً، فإنه سوف يمر تيار عال جداً فوق تحمل الدايود والذي سوف يتسبب في حرقه. لذلك كان لا بد من إضافة مقاومة، R، على التوالي لضمان عدم تجاوز التيار الحد المسموح والمحدد من قبل المصنع.



شكل (١-١١) التوصيل الأمامي

لرسم العلاقة بين الجهد الواقع على الدايود، V_D، والتيار المار في الدايود، I_D، فإننا نقوم بتغيير جهد المصدر، V_S، وقياس V_D و I_D. فعندما يكون V_S مساوياً للصفر، فإن التيار يساوي صفراً أيضاً. وعند زيادة جهد المصدر تدريجياً، فإن التيار يبدأ بالزيادة ولكن بصورة صغيرة جداً حتى يتعدى الجهد 0.7V وهو الجهد اللازم لعمل الدايود. عندها يبدأ التيار بالزيادة السريعة. فكلما زاد جهد المصدر، زاد التيار وبقيَ جهد الدايود ثابتاً عند 0.7 V تقريباً كما هو موضح في الشكل (١-١٢).

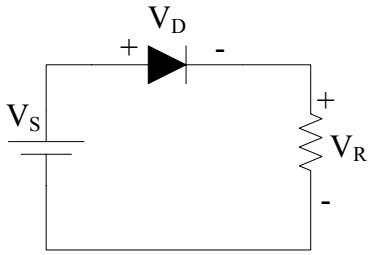


الشكل (١-١٢) منحنى الجهد والتيار للانحياز الأمامي

ويلاحظ من المنحنى أن جهد الدايود، V_D، يزداد قليلاً فوق 0.7V مع زيادة جهد المصدر وذلك بسبب مقاومة الدايود الداخلية والتي تستهلك جزءاً صغيراً من الجهد. ويمكن حسابها كالتالي:

$$r_d = \frac{\Delta V_D}{\Delta I_D}$$

ولحساب كمية التيار المار في الدائرة، فإننا نستخدم قانون كيرشوف للجهود:



$$V_D + V_R - V_S = 0$$

$$\therefore V_R = V_S - V_D$$

وحيث إن التيار المار في المقاومة هو نفسه التيار المار في الدايود لأنهما متصلان على التوالي، فإن:

$$I_D = \frac{V_R}{R}$$

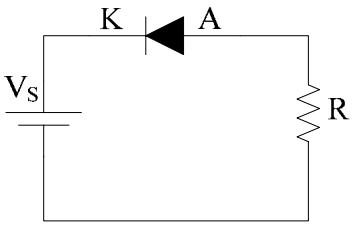
$$I_D = \frac{V_S - V_D}{R}$$

وحيث إن $V_D = 0.7V$، فيمكننا كتابة القانون كالتالي:

$$I_D = \frac{V_S - 0.7}{R}$$

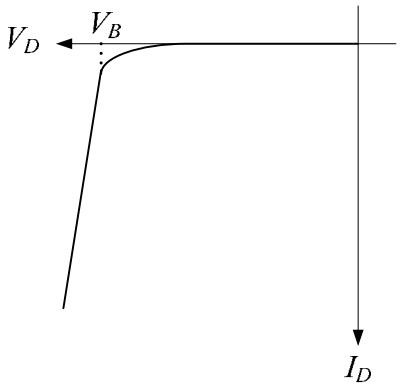
٢. الانحياز العكسي

في حالة الانحياز العكسي، فإن جهد الأنود أصغر من جهد الكاثود كما في الشكل (١- ١٣).



الشكل (١-١٣) التوصيل العكسي

وهنا يمر تيار صغير جداً جداً، عادة (μA أو nA)، ويمكن اعتباره صفراً. وإذا ما استمرينا في زيادة جهد المصدر، فإن الدايود يستمر في منع التيار من المرور حتى يصل إلى حالة الانهيار، Breakdown، كما هو موضح في الشكل (١-١٤) حيث يمر تيار عال جداً. وتختلف قيمة جهد الانهيار من دايود لآخر حسب التصنيع.



الشكل (١-١٤) منحنى الجهد والتيار للانحياز العكسي

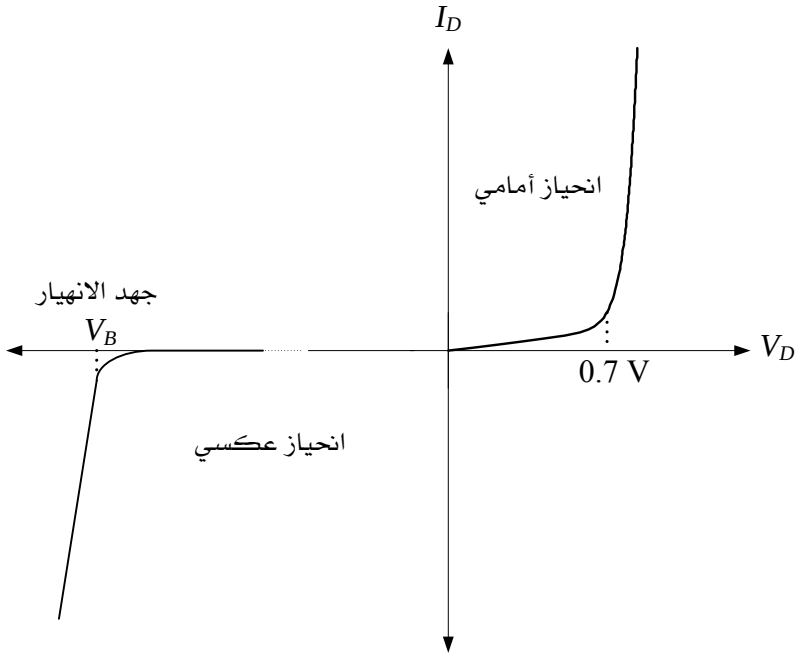
ونظراً لأن قيمة التيار المار في الدائرة صفر قبل نقطة الانهيار، فإن:

$$I_D = I_R = 0$$

$$V_D = V_S$$

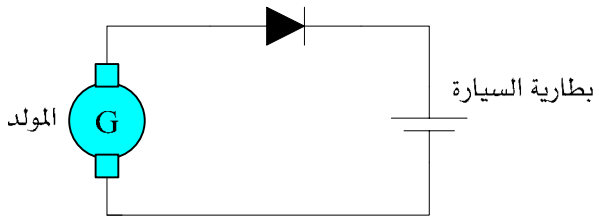
$$V_R = 0$$

الشكل (١-١٥) يوضح الصورة الكاملة لعمل الدايود. وهي أنه يعمل في حالة الانحياز الأمامي ويسمح بمرور التيار، ولكنه يحتاج إلى جهد مقداره 0.7V . ولايسمح بمرور التيار في حالة الانحياز العكسي، ويجب ألا نصل إلى جهد الانهيار عند استخدامنا للدايود في حالة التطبيقات العملية.



الشكل (١-١٥) منحنى الجهد والتيار للدايود

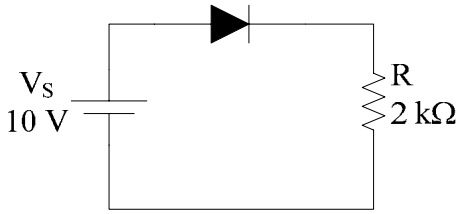
فمن التطبيقات العملية مثلاً، شحن بطارية السيارة. فالمولد الموجود في السيارة يقوم بتوليد تيار يمر في البطارية لشحنها. ولضمان مرور التيار من المولد إلى البطارية وعدم مروره من البطارية إلى المولد، فإنه يُوضع دايود في المسار كما في الشكل (١-١٦).



الشكل (١- ١٦) دائرة شحن البطارية

مثال(١-٢):

احسب قيمة التيار المار في الدائرة.

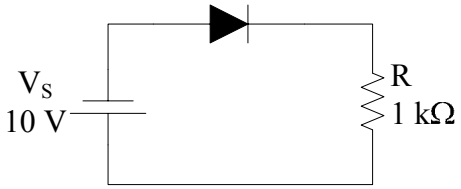


أولاً: الدايود في حالة انحياز أمامي. لذلك:

$$I_D = \frac{V_S - 0.7}{R}$$

$$I_D = \frac{10 - 0.7}{2\text{k}} = 4.7 \text{ mA}$$

احسب قيمة التيار المار في الدائرة.



أولاً: الدايود في حالة انحياز عكسي. لذلك:

$$I_D = I_R = 0$$

$$V_D = V_S = 10V$$

$$V_R = 0\,\mathrm{V}$$

مسائل

١. ما سبب استهلاك الوصلة الثنائية لجهد مقداره 0.7 V في حالة الانحياز الأمامي؟

٢. ما سبب عدم مرور تيار عندما يكون الدايود في حالة انحياز عكسي؟

٣. حدد نوع الانحياز في الحالات التالية:

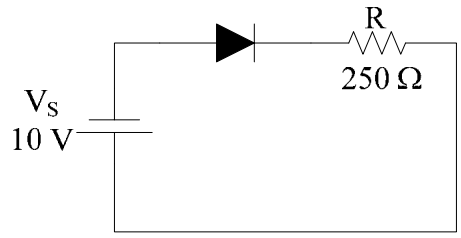
(أ) -1 V ← -10 V

(ب) -7 V ← 0 V

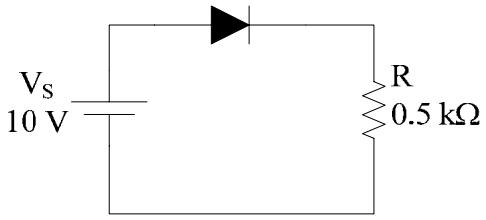
(ج) 3 V ← 9 V

(د) 5 V ← 5 V

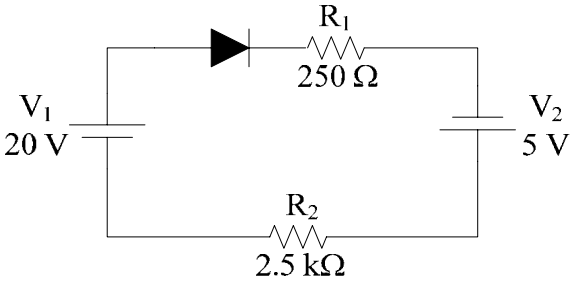
٤. احسب التيار المار في الدائرة كما هو موضح في الشكل. وكذلك الجهد الواقع على المقاومة، والجهد الواقع على الدايود.



(أ)



(ب)



(ج)

الإلكترونيات

تطبيقات على الدايود

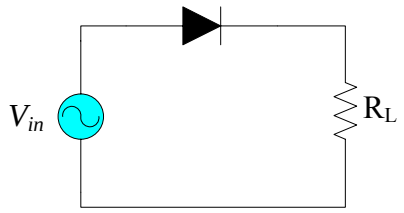
الوحدة الثانية : تطبيقات على الدايود

كما هو معلوم من قبل أن الدايود يقوم بتمرير التيار في اتجاه واحد ، ولا يسمح بمروره في الاتجاه الآخر. وباستخدام هذه الخاصية المهمة ، فإنه يمكننا تحويل التيار المتردد AC والذي يتغير اتجاهه مع الزمن إلى تيار مستمر DC ذي اتجاه واحد. ولذا أُطلق اسم الموحد Rectifier على الدايود.

ودائرة تحويل التيار المتردد إلى مستمر تسمى دائرة التوحيد Rectifier Circuit. وهذه الدائرة لها أهمية بالغة ، إذ لا يخلو جهاز من هذه الدائرة تقريباً. فمن المعلوم أن الأجهزة الإلكترونية كالتلفاز والمذياع والجوال وغيرها تعمل باستخدام التيار المستمر. فالراديو ، مثلاً ، يعمل باستخدام البطاريات. ويعمل أيضاً عند توصيله بالتيار المنزلي المتردد. هذه الأجهزة تحتوي في داخلها على دائرة توحيد لتغذيتها بالتيار المستمر والمستمد من التيار المتردد. وتعتبر هذه الطريقة أفضل من استخدام البطاريات والتي يتطلب استبدالها باستمرار كلما فرغت. إضافة إلى أن بعض الأجهزة تتطلب قدرة عالية لا يمكن توفيرها باستخدام البطاريات الصغيرة.

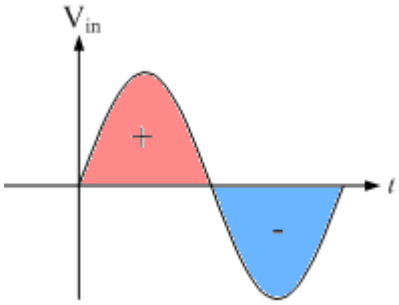
دائرة توحيد نصف الموجة Half-wave Rectifier Circuit

الشكل (٢-١) يوضح دائرة توحيد نصف الموجة ، والمكونة من مصدر تغذية متردد ، و موحد ، ومقاومة الحمل والتي تمثل الجهاز المراد تغذيته.



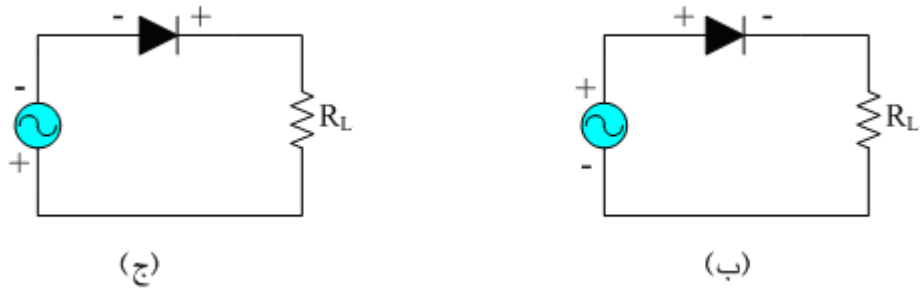
الشكل (٢-١) دائرة توحيد نصف الموجة

الشكل (٢- ٢ أ) يوضح موجة الدخل الجيبية والمكونة من نصف موجب ونصف سالب. ففي أثناء النصف الموجب، يكون جهد الأنود أكبر من جهد الكاثود مما يجعل الموحد في حالة انحياز أمامي. فيمر التيار في مقاومة الحمل، ويستهلك الموحد 0.7 V ، ويقع باقي الجهد على مقاومة الحمل كما هو موضح في الشكل (٢-٢ب).



الشكل (٢-٢ أ) موجة الدخل الجيبية

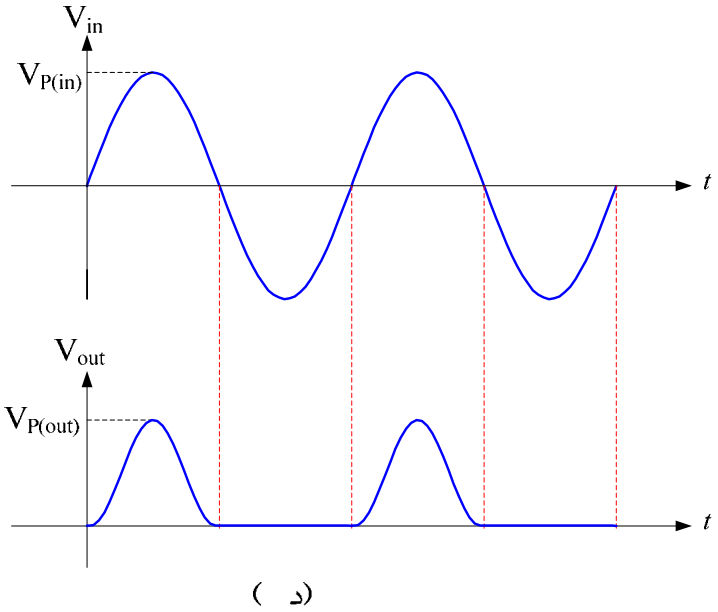
وعندما يتغير اتجاه موجة الدخل في النصف السالب، فإن جهد الأنود يكون أقل من جهد الكاثود. وبالتالي فإن الموحد لا يمرر التيار إلى الحمل لأنه في حالة انحياز عكسي. ونتيجة لذلك، يكون الجهد الواقع على مقاومة الحمل صفراً ويتحمل الموحد كل جهد الدخل والذي يُسمى قمة الجهد العكسي Peak Inverse Voltage (PIV) كما في الشكل (٢-٢ج).



الشكل (٢-٢) عمل دائرة توحيد نصف الموجة. (ب) النصف الموجب. (ج) النصف السالب

ولذا فإنه يجب التأكد من أن قيمة PIV تكون أقل من جهد انهيار الموحد V_B . وإلا فإن الموحد سوف ينهار ويمرر تيار خلال النصف السالب وتفشل عملية التوحيد.

الشكل (٢-٢د) يوضح شكل موجة الدخل وموجة الخرج. ومن الملاحظ أن جهد الخرج مكون من نصف موجة الدخل، ولذا سميت الدائرة بدائرة توحيد نصف موجة.



(د)

شكل (٢-٢ د) موجتا الدخل والخرج

ولذلك فإن قيمة جهد القمة للخرج يساوي جهد القمة للدخل مطروحاً منه $0.7V$ والتي يستهلكها الموحد:

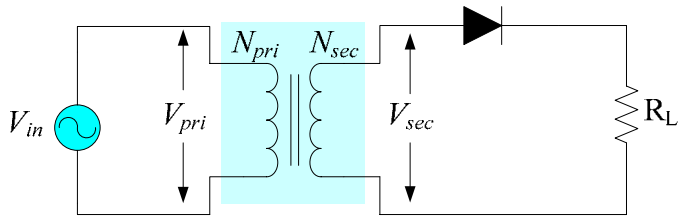
$$V_{P(out)} = V_{P(in)} - 0.7$$

والقيمة المتوسطة لجهد الخرج هي:

$$V_{AVG} = \frac{V_{P(out)}}{\pi}$$

استخدام المحول في دوائر التوحيد

عادة يكون المطلوب من دائرة التوحيد أن يكون جهد الخرج المستمر صغيراً وذلك لتشغيل الدوائر الإلكترونية. وغالباً ما يكون جهد الدخل المتردد عالياً كجهد المنزل (110 V – 220 V). ولذا كان من الأفضل تخفيض قيمة جهد الدخل باستخدام المحول Transformer كما في الشكل (٢-٣). وفائدة أخرى للمحول هي عزل مصدر الدخل عن الدائرة الإلكترونية وذلك لحماية الجهاز عند حدوث أي خلل في جهد الدخل.



الشكل (٢-٣) استخدام المحول في دوائر التوحيد

والمحول له ملفات ابتدائية Primary Turns وملفات ثانوية Secondary Turns. ويمكن التحكم في قيمة جهد الخرج عن طريق التحكم في عدد اللفات الابتدائية وكذلك الثانوية حسب القانون التالي:

$$\frac{N_{pri}}{N_{\sec}} = \frac{V_{pri}}{V_{\sec}}$$

حيث إن:

N_{pri} : عدد اللفات الابتدائية

N_{sec} : عدد اللفات الثانوية

V_{pri} : الجهد على الملفات الابتدائية

V_{sec} : الجهد على الملفات الثانوية

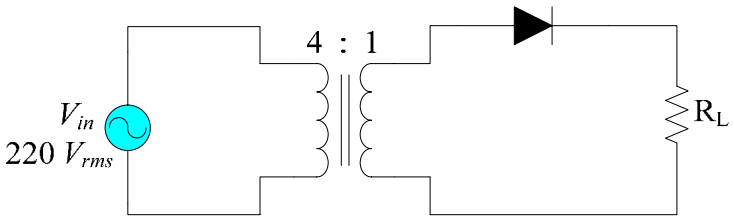
ولذلك فإن جهد الملفات الثانوية:

$$V_{\sec} = \frac{N_{\sec}}{N_{pri}}\left(V_{pri}\right)$$

وكما هو واضح من الشكل (٢-٣)، فإن جهد الدخل بالنسبة لدائرة التوحيد هو V_{sec}

مثال(٢-١)

احسب قيمة جهد القمة وجهد القيمة المتوسطة لجهد الخرج للدائرة الموضحة في الشكل (٢-٤)



الشكل (٢-٤)

حساب قيمة جهد القمة للخرج:

$$V_{P(pri)} = 220\sqrt{2}$$

$$V_{P(pri)} = 311.127\ \text{V}$$

$$V_{P(\text{sec})} = \frac{N_{\text{sec}}}{N_{pri}}\left(V_{P(pri)}\right)$$

$$V_{P(\text{sec})} = \frac{1}{4}(311.127) = 77.78\ \text{V}$$

$$V_{P(out)} = V_{P(in)} - 0.7$$

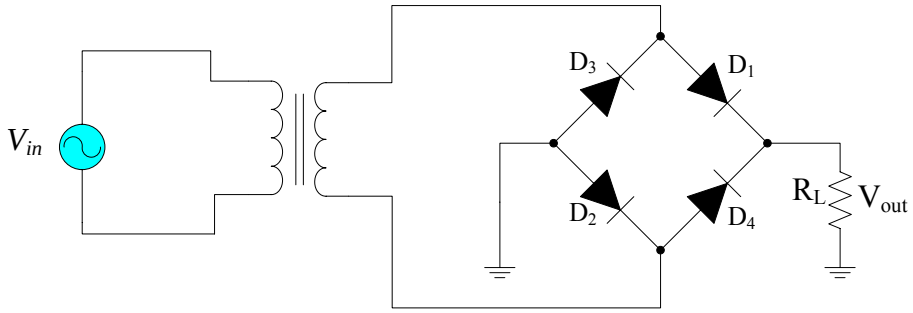
$$V_{P(out)} = 77.78 - 0.7 = 77.08\ \text{V}$$

حساب قيمة جهد القيمة المتوسطة للخرج:

$$V_{AVG} = \frac{V_{P(out)}}{\pi} = \frac{77.08}{\pi} = 24.54\ \text{V}$$

توحيد الموجة الكاملة Full-wave Rectifier

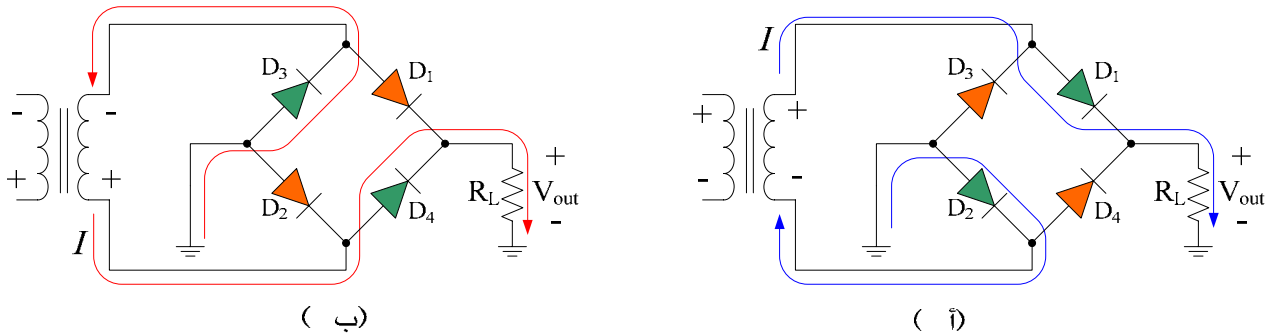
كما لاحظنا من الدائرة السابقة فإنه يستفاد من نصف موجة الدخل فقط. وبالتالي فإنه يهدر نصف القدرة. وقد أمكن تفادي هذه السلبية باستخدام توحيد الموجة الكاملة. هذه الدائرة تقوم بتوحيد اتجاه التيار في مقاومة الحمل أثناء النصف الموجب والنصف السالب من موجة الدخل. وتستخدم هذه الدائرة أربعة موحدات متصلة على شكل قنطرة. ولذلك سُميت بقنطرة توحيد موجة كاملة Full-wave Bridge Rectifier كما في الشكل (٢-٥).



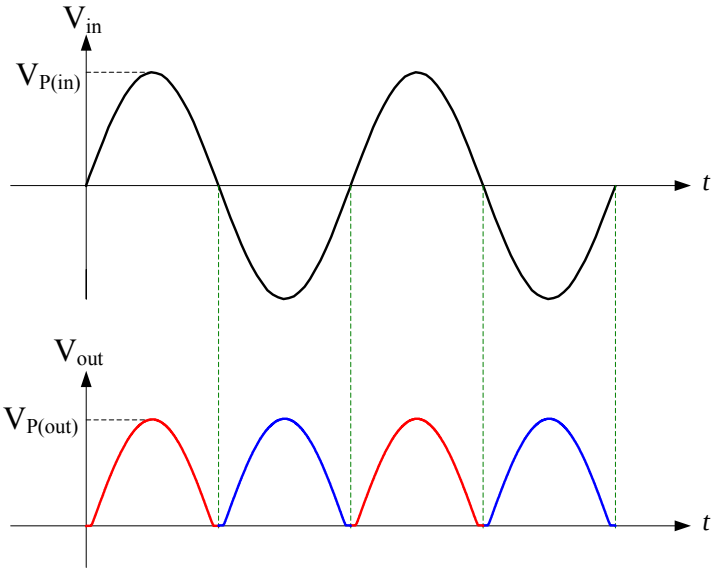
الشكل (٢-٥) دائرة قنطرة توحيد موجة كاملة

ففي النصف الموجب من موجة الدخل يكون الموحدان D_1 و D_2 في حالة انحياز أمامي. ويكون الموحدان D_3 و D_4 في حالة انحياز عكسي. فيمر التيار في مقاومة الحمل من خلال D_1 ويعود من خلال D_2 كما في الشكل (٢-٦ أ). ولاحظ اتجاه التيار في الحمل.

أثناء النصف السالب من موجة الدخل يكون الموحدان D_3 و D_4 في حالة انحياز أمامي. ويكون الموحدان D_1 و D_2 في حالة انحياز عكسي. فيمر التيار في مقاومة الحمل من خلال D_3 ويعود من خلال D_4 كما في الشكل (٢-٦ ب). ولاحظ اتجاه التيار في الحمل أيضاً. حيث إنه نفس الاتجاه في النصف الموجب. الشكل (٢-٦ ج) يوضح شكل موجة الدخل وكذلك موجة الخرج.



الشكل (٢-٦) طريقة عمل القنطرة. (أ) النصف الموجب. (ب) النصف السالب



(ج)

الشكل (٢-٦ ج) موجة الدخل وكذلك موجة الخرج لقنطرة التوحيد

أثناء مرور التيار في الحمل خلال كل نصف موجة من موجة الدخل، فإن موحدين يعملان لتمرير التيار. فلذلك فإن قيمة جهد القوة للخرج هو:

$$V_{P(out)} = V_{P(in)} - 1.4$$

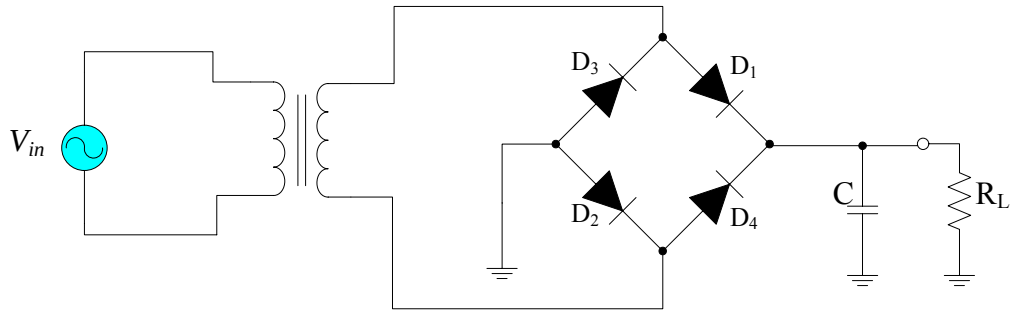
والقيمة المتوسطة لجهد الخرج هي:

$$V_{AVG} = 2 \times \frac{V_{P(out)}}{\pi}$$

ومن الملاحظ أن القيمة المتوسطة لجهد الخرج هي ضعف القيمة المتوسطة في حالة توحيد نصف موجة. علماً بأن فقد 1.4 V لا يشكل خسارة البتة، حيث إن جهد الدخل عادةً يكون كبيراً ويتم تخفيضه باستخدام الموحد ولا نحتاج إلا لنسبة صغيرة منه. إضافةً إلى أن سعر قنطرة التوحيد زهيد جداً ولا يمثل أي تكلفة مادية. وقد تم إنتاج القنطرة في قطعة إلكترونية واحدة إذ لا يحتاج إلى توصيل أربعة موحدات أثناء بناء الدائرة عملياً.

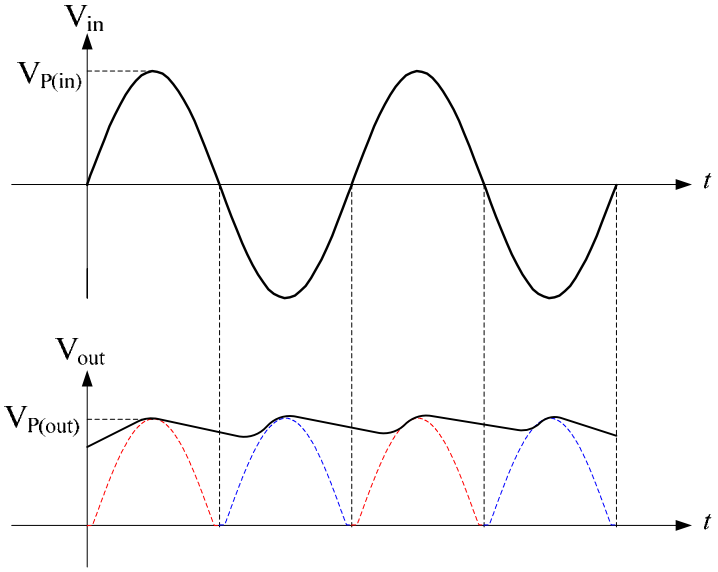
ترشيح (تنعيم) موجة الدخل Filtering

كما لاحظنا أن شكل موجة الخرج عبارة عن أجزاء موجبة قد تم توحيد اتجاه التيار فيها ، حيث لا يوجد تغير في الاتجاه (جزء سالب). ولكن هذه الموجة غير مستقيمة كما هو الحال في التيار المستمر. لذلك كان لا بد من مرشح لإزالة التعرجات في موجة الخرج. المرشح المستخدم مكون من مكثف يوصل على التوازي مع مقاومة الحمل كما في الشكل (٢-٨).



الشكل (٢-٨) دائرة التوحيد مع مكثف التنعيم

وكلما كانت قيمة المكثف كبيرة ، كان التنعيم أفضل. ويبين الشكل (٢-٨) شكل موجة الخرج.



شكل (٢-٨) أثر مكثف التنعيم على الموجة الموحدة

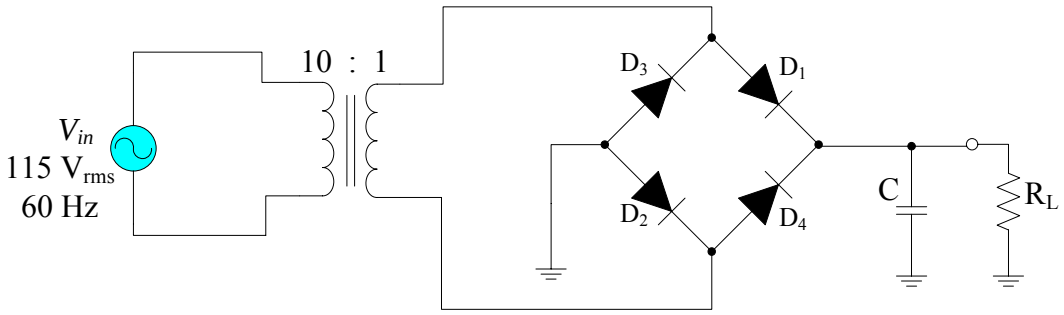
ويمكن اختيار سعة المكثف المناسبة حسب القانون التالي:

$$R_L C >> \frac{1}{2f}$$

حيث إن f هو تردد موجة الدخل.

مثال (٢-٢)

احسب القيمة المتوسطة لجهد الخرج. وإذا أردنا إضافة مكثف للتنعيم، فما القيمة المناسبة؟



حساب القيمة المتوسطة لجهد الخرج:

$$V_{P(pri)} = \sqrt{2}V_{rms}$$

$$V_{P(pri)} = \sqrt{2} \times 115 = 162.63\ \text{V}$$

$$V_{P(\text{sec})} = \frac{1}{10}(162.63) = 16.26\ \text{V}$$

$$V_{P(out)} = V_{P(\text{sec})} - 1.4 = 16.26 - 1.4 = 14.86\ \text{V}$$

$$V_{AVG} = 2 \times \frac{V_{P(out)}}{\pi} = \frac{2 \times 14.86}{\pi} = 9.46\ \text{V}$$

حساب قيمة مكثف التنعيم:

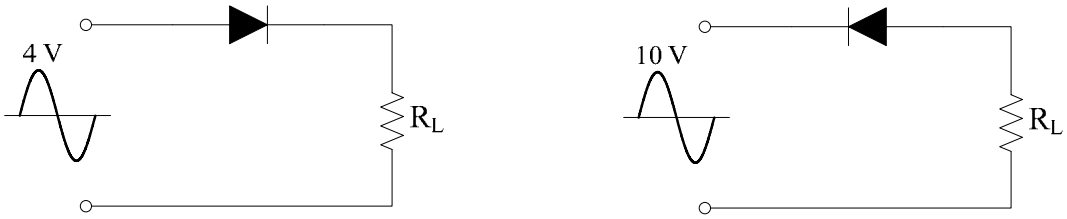
$$R_L C >> \frac{1}{2f}$$

$$C >> \frac{1}{2fR} = \frac{1}{2 \times 60 \times 1.5k} = 5.6\mu\text{F}$$

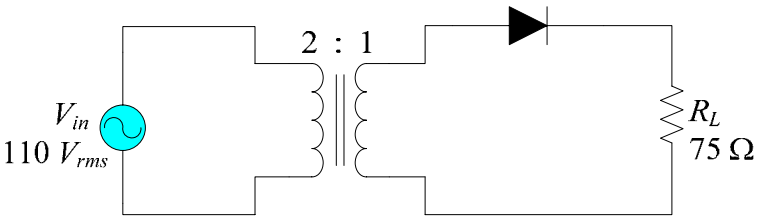
بالتالي يمكن اختيار أي مكثف أكبر من 5.6 µF

مسائل

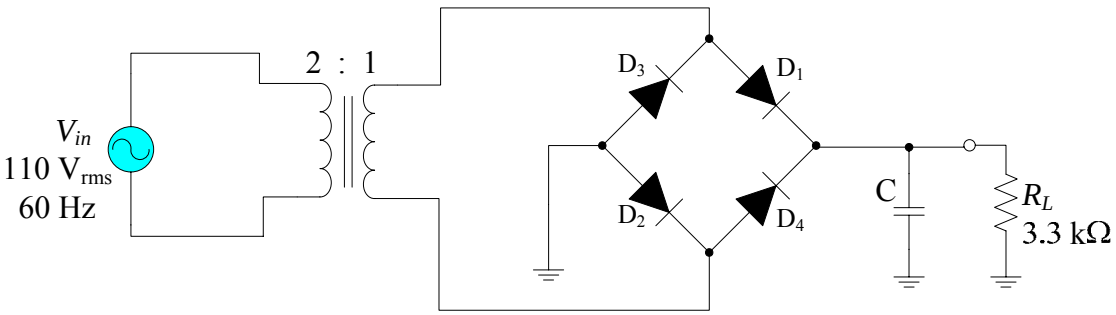
١. ارسم موجات الخرج لكل دائرة من الدوائر التالية:



٢. احسب قيمة القمة للتيار المار في مقاومة الحمل، واحسب قيمة القدرة المتوسطة المستهلكة بواسطة الحمل؟



٣. احسب القيمة المتوسطة وكذلك سعة المكثف اللازم لتنعيم موجة الخرج.



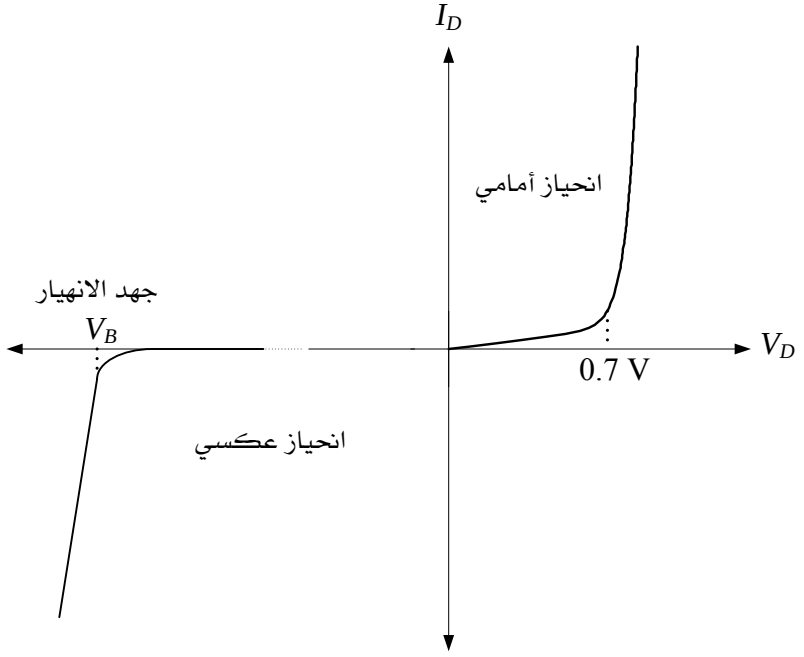
الإلكترونيات

الدايود الثنائي ذو الوظائف الخاصة

الوحدة الثالثة : الدايود الثنائي ذو الوظائف الخاصة

دايود زينر Zener Diode

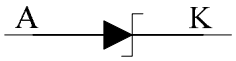
عند دراستنا للدايود ، علمنا بأنه يمرر التيار في حالة الانحياز الأمامي، ويكون الجهد عليه ثابتاً تقريباً (0.7 V). ولا يمرر التيار في حالة الانحياز العكسي. وعند الاستمرار في زيادة الجهد عليه في حالة الانحياز العكسي، فإنه يصل إلى جهد الانكسار. عند ذلك، يمر التيار ويكون الجهد عليه ثابتاً ومساوياً لجهد الانكسار كما في الشكل (٣-١).



الشكل (٣-١) منحنى خواص الدايود

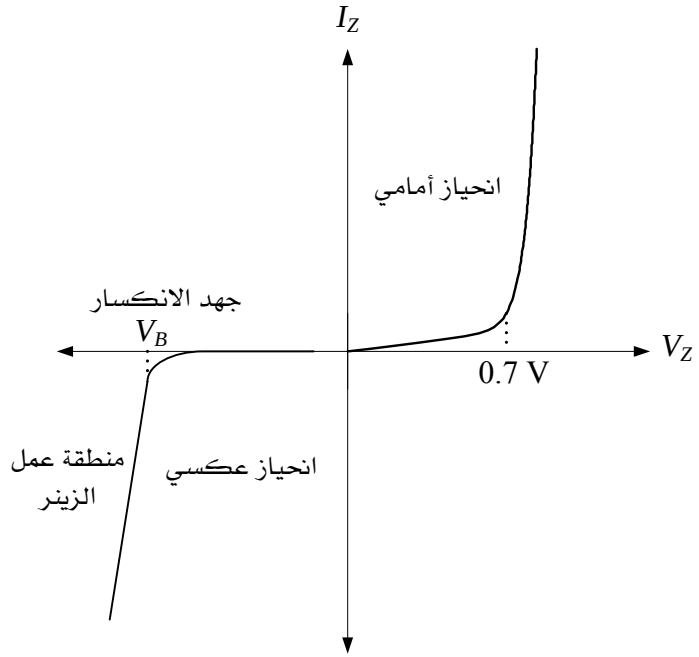
ويمكن الاستفادة من خواص الدايود في تثبيت الجهد في تغذية الدوائر الإلكترونية والتي تحتاج إلى جهد ثابت لتغذيتها بحيث لا يزيد و ينقص عن قيمة محددة كالدوائر المنطقية وغيرها. ولكن لا يمكن الاستفادة من الدايود في حالة الانحياز الأمامي حيث إن 0.7 V غير كاف لتشغيل الدوائر الإلكترونية. وفي حالة الانحياز العكسي، فإن الدايود يثبت الجهد على قيم كبيرة، 100 V مثلاً. وهذا جهد عال بالنسبة للدوائر الإلكترونية. فالدوائر المنطقية من نوع TTL تحتاج إلى (5V).

فإذا إمكننا أن نتحكم في قيمة الانكسار، فإننا نكون قد توصلنا إلى قطعة إلكترونية مفيدة جداً في تثبيت وتنظيم الجهد. هذه القطعة الإلكترونية تُسمى دايود زينر Zener Diode كما في الشكل (٣-٢).



الشكل (٣-٢) رمز الزينر

فدايود زينر ما هو إلا وصلة ثنائية كما في الموحد، إلا أنه يتم تحديد قيمة جهد الانكسار عند قيمة معينة حسب الحاجة أثناء عملية التصنيع. وبالتالي، فإن الزينر يعمل في حالة الانحياز العكسي لتثبيت الجهد. وفي حالة الانحياز الأمامي، فإنه يثبت الجهد على (0.7 V). فالشكل (٣-٣) يوضح منحنى خصائص التيار والجهد لدايود زينر.



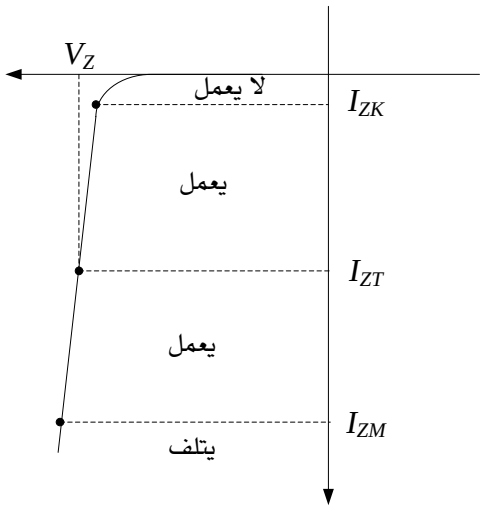
الشكل (٣-٣) منحنى خواص الزينر

وطالما أن الزينر يُستخدم في حالة الانحياز العكسي، فلندرسه بمزيد من التفصيل. فالشكل (٣-٤) يوضح منطقة الانحياز العكسي للزينر. فعند زيادة الجهد العكسي عليه فإنه لا يمر تيار حتى نقترب من نقطة الانكسار. فعندها يبدأ الزينر بالانكسار وتمرير التيار. ولأن شكل المنطقة التي يبدأ التيار فيها بالمرور يشبه الركبة Knee، فقد سُمي التيار في هذه المنطقة بهذا الاسم I_{ZK}. وعند زيادة الجهد، فإن التيار يزداد ويبقى الجهد على الزينر ثابتاً تقريباً، ويزداد زيادة طفيفة نظراً لوجود المقاومة الداخلية والتي يقع عليها جزء بسيط من الجهد بسبب قيمتها الصغيرة. وتستمر زيادة التيار بزيادة الجهد العكسي عليه حتى يصل التيار إلى أقصى قيمة له I_{ZM}. وإذا زاد التيار عن هذه القيمة، فإن الزينر سوف يتلف. ولذلك فإنه من الأفضل عند استخدام الزينر في تثبيت الجهد، تصميم الدائرة بحيث يكون التيار المار في الزينر وسطاً بين I_{ZK} و I_{ZM}. ويُسمى هذا التيار بتيار الاختبار I_{ZT}, Test Current. وتُحدد هذه القيمة من قبل الشركة المصنعة، ويكون الجهد ثابتاً عند هذا التيار ويُسمى I_Z. فالمراحل الثلاث التي يمر فيها تيار الزينر هي كالتالي:

I_{ZK} : أقل قيمة للتيار لكي يعمل الزينر، ولا يعمل قبلها

I_{ZT} : أفضل قيمة يعمل عندها الزينر

I_{ZM} : أعلى قيمة للتيار والتي يجب ألا يتعداها تيار الزينر

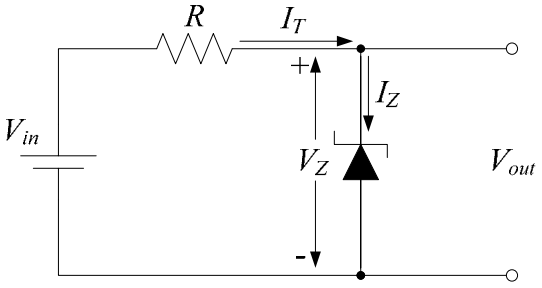


الشكل (٣-٤) منطقة الانحياز العكسي للزينر

طرق توصيل الزينر

١. بدون مقاومة حمل

الشكل (٣-٥) يوضح طريقة توصيل دائرة المنظم باستخدام الزينر.



الشكل (٣-٥) دائرة منظم جهد بدون حمل

وكما هو ملاحظ، فإن الزينر موصل توصيلاً عكسياً. ويكون جهد الخرج مساوياً لجهد الزينر،

$$V_{out} = V_Z$$

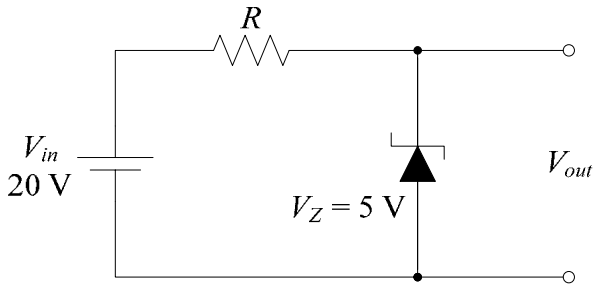
وظيفة المقاومة R هي التحكم وضبط التيار المار في الزينر I_Z عند القيمة I_{ZT}:

$$R = \frac{V_{IN} - V_Z}{I_Z}$$

حيث إن التيار المار في المقاومة هو نفسه التيار المار في الزينر لكونهما متصلين على التوالي.

مثال(٣-١):

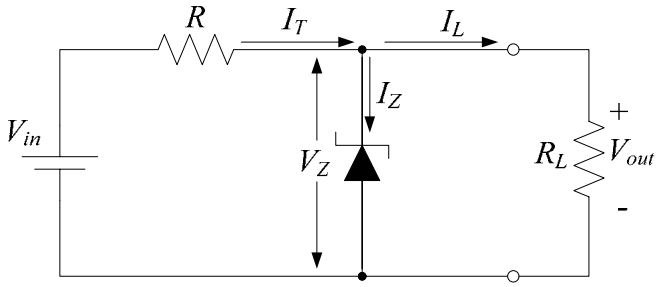
احسب قيمة المقاومة اللازمة لمرور تيار في الزينر مقداره 35 mA



$$R = \frac{V_{IN} - V_Z}{I_Z} = \frac{20 - 5}{35m} = 428.57\,\Omega$$

٢. التوصيل بوجود حمل

غالباً ما يوجد حمل يربط مع الزينر على التوازي لتثبيت الجهد عليه كما في الشكل (٣-٦).



الشكل (٣-٦) دائرة منظم جهد مع مقاومة الحمل

ففي هذه الحالة، فإن التيار الكلي المار في المقاومة R سوف يتفرع إلى جزأين. جزء يمر في الزينر I_Z وجزء يمر في مقاومة الحمل I_L حسب قانون كيرشوف للتيارات. ولذلك يجب عند التصميم وعند حساب المقاومة R مراعاة ألا يقل تيار الزينر عن I_{ZK} ولا يزيد عن I_{ZM}.

$$I_T = I_L + I_Z$$

$$I_T = \frac{V_{IN} - V_Z}{R}$$

ويمكن حساب قيمة تيار الحمل كالتالي:

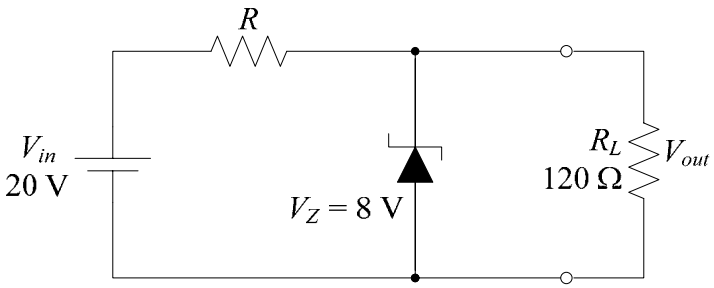
$$I_L = \frac{V_{out}}{R_L}$$

$$I_L = \frac{V_Z}{R_L}$$

ومن المعلوم أنه إذا تم فصل الحمل عن الدائرة، فإن التيار الكلي سوف يمر كله في الزينر. وهذا وضع خطير، بحيث إن التيار قد يتعدى قيمة I_{ZM} فيتلف الزينر.

مثال (٣-٢):

احسب قيمة R اللازمة لمرور تيار في الزينر مقداره 35 mA علماً بأن I_{ZM} = 90 mA.



$$I_L = \frac{V_Z}{R_L} = \frac{8}{120} = 66.67\ \text{mA}$$

$$I_T = I_L + I_Z = 35\ \text{m} + 66.67\ \text{m} = 101\ \text{mA}$$

$$\therefore R = \frac{V_{IN} - V_Z}{I_T} = \frac{20-8}{101m} = 118.8\ \Omega$$

هل يحترق الزينر عند فصل الحمل؟

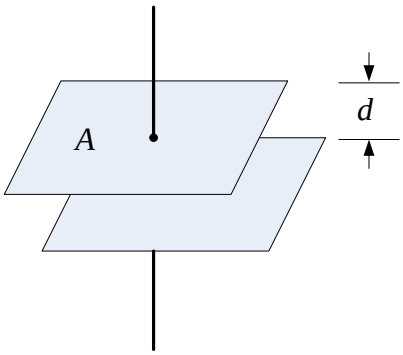
عند فصل الحمل فإن:

$$I_Z = I_T = 101\ \text{mA}$$

وبما أن التيار أعلى من I_{ZM} فإن الزينر سوف يتلف.

دايود الفراكتور (السعوي) Varactor Diode

مبدأ عمل دايود الفراكتور هو نفسه مبدأ عمل المكثف. فالمكثف، ببساطة، عبارة عن موصلين بينهما عازل كما في الشكل (٣-٧).



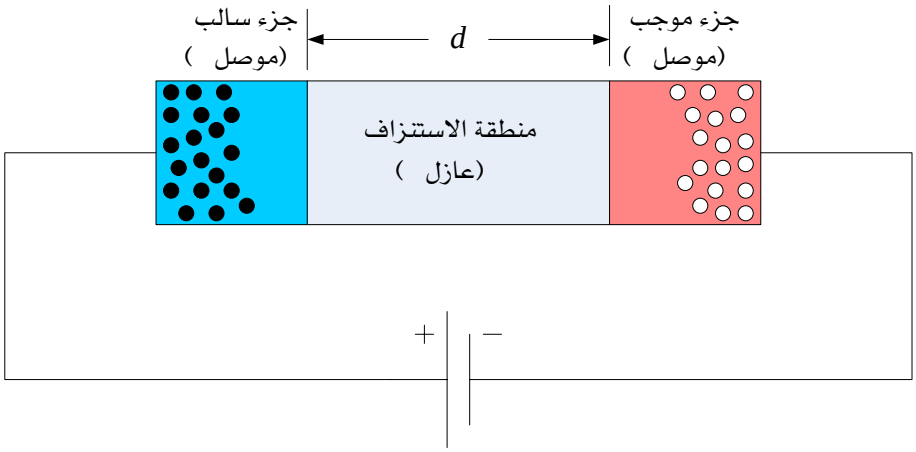
الشكل (٣-٧) تركيب المكثف

وتعتمد قيمة سعة المكثف على ثلاثة محاور: مساحة لوح الموصل A ، المسافة الفاصلة بين الموصلين d ، ونوع المادة العازلة $\in$ كما في القانون:

$$c = \frac{A \in}{d}$$

ويمكن التحكم في سعة المكثف بتغيير أحد هذه المتغيرات. والطريقة الشائعة هي تغيير المسافة الفاصلة بين الموصلين.

هذه الحالة مشابهة لما يحدث للدايود في حالة الانحياز العكسي. فهنا تنشأ منطقة الاستنزاف بين الجزء الموجب والجزء السالب كما في الشكل (٣-٨). فمنطقة الاستنزاف منطقة عازلة بين موصلين. وهذا هو المكثف. فعند تغيير الجهد العكسي، فإن طول هذه المنطقة يتغير حسب قيمة الجهد فتتغير سعة المكثف الناتج عن وجود موصلين (الجزء السالب والجزء الموجب) والعازل (منطقة الاستنزاف).



الشكل (٣-٨) التشابه بين المكثف والدايود في حالة الانحياز العكسي

تم الاستفادة من هذه الخاصية بتصنيع دايود خاص يُسمى الفراكتور كما في الشكل (٣-٩). حيث يعمل في حالة الانحياز العكسي كمكثف متغير يمكن التحكم به عن طريق قيمة الجهد العكسي الواقع عليه.

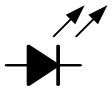
الشكل (٣-٩) رمز الفراكتور

ويستخدم الفراكتور بكثرة في دوائر الاتصالات، وخاصة دوائر الاتصالات الرقمية، كما في أجهزة المذياع وأجهزة استقبال المحطات الفضائية والتي تقوم بالبحث عن المحطات بصورة تلقائية.

الدايود الضوئي

١. الدايود المشع للضوء Light Emitting Diode (LED)

الدايود الضوئي عبارة عن دايود يمرر التيار في حالة الانحياز الأمامي ويشع ضوءاً حسب المادة المصنع منها حسب الجدول (٣-٩). ويرمز له بالرمز:

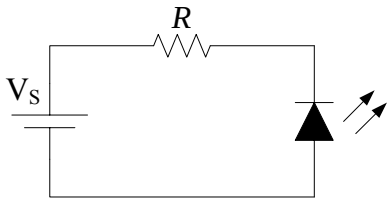


الشكل (٣-٩) رمز الدايود المشع للضوء

جدول (٣-١)

مادة التصنيع	اللون المُشع
غاليوم أرسنايد الفوسفات	أحمر Red
غاليوم الفوسفات	أخضر Green
غاليوم أرسنايد	أشعة تحت الحمراء Infrared (IR)

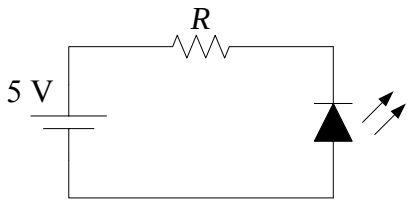
وتتراوح قيمة جهد الانحياز الأمامي بين 1.2 V و 3.2 V حسب النوع. بينما تتراوح قيمة الجهد العكسي بين 3 V و 10 V وهذه جهود صغيرة ولذلك فهو سريع التلف إذا زاد الجهد الواقع عليه عن الحد المسموح به. ولحمايته من التلف، لا بد من توصيل مقاومة R على التوالي معه لضمان عدم زيادة التيار المار فيه عن الحد المسموح به كما في الشكل (٣-١٠).



الشكل (٣-١٠) دائرة الدايود المشع للضوء

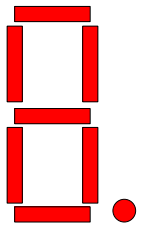
مثال(٣-٣):

يحتاج دايود ضوئي إلى تيار مقداره 20 mA لكي يعمل. احسب قيمة المقاومة اللازمة لحمايته، علماً بأنه يستهلك 2 V



$$R = \frac{V_{IN} - V_D}{I_D} = \frac{5-2}{20\,\text{m}} = 150\,\Omega$$

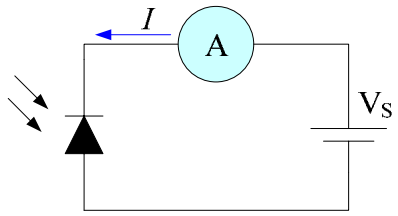
يستخدم الدايود المشع للضوء كمؤشر بيان في معظم الأجهزة الإلكترونية. ومن أشهر استخداماته وحدة العرض ذات الشرائح السبع 7 Segment Display كما في الشكل (٣-١١). حيث يتم توصيل سبعة موحدات ضوئية مشكلة الرقم 8 ويمكن توليد أي رقم من 0 إلى 9 بإضاءة الموحدات المشكلة لذلك الرقم.



الشكل (٣-١١) وحدة العرض ذات الشرائح السبع

٢. الدايود المستقبل للضوء Photo Diode

الدايود المستقبل للضوء هو عبارة عن دايود يتأثر بالضوء بحيث إنه يسمح بمرور التيار إذا سُلط عليه الضوء. الشكل (٣-١٢) يوضح طريقة توصيله والذي يعمل في حالة الانحياز العكسي.

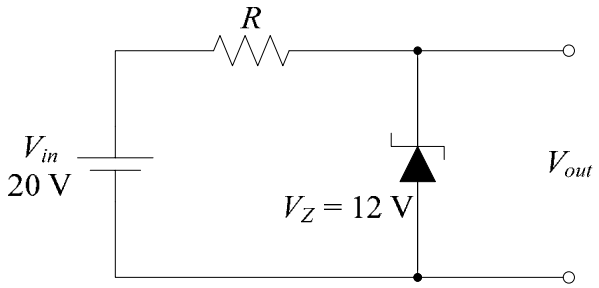


الشكل (٣-١٢) دائرة توصيل الدايود الضوئي

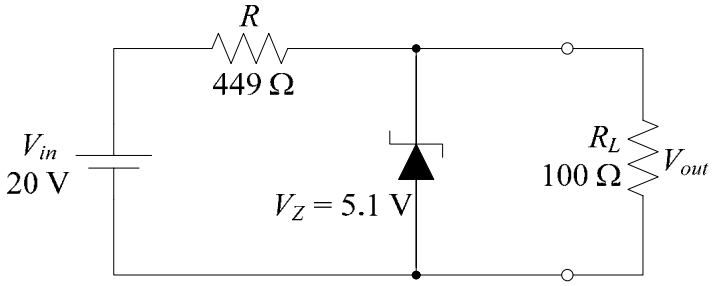
فهو يعمل كمستقبل للإشارات الضوئية. ويعمل الدايود المشع LED كمرسل للإشارات الضوئية كما في أجهزة التحكم من بعد Remote Control. فأنت عندما تستخدم جهاز التحكم لتشغيل التلفاز مثلاً أو تغيير القناة، فإنك ترسل الأمر عن طريق إشارات ضوئية غير مرئية عن طريق دايود مشع LED من نوع IR والذي يحول الإشارات الكهربائية إلى إشارات ضوئية. ويوجد في الجهة المقابلة (جهاز التلفاز) دايود ضوئي لاستقبال الإشارات الضوئية وتحويلها إلى إشارات كهربائية.

مسائل

١. احسب قيمة المقاومة اللازمة لمرور تيار في الزينر مقداره 40 mA



٢. من الدائرة الموضحة في الشكل، احسب قيمة جهد الخرج، تيار الزينر، وتيار الحمل.
علماً بأن I_{ZK} = 1 mA و I_{ZM} = 196 mA



٣. صمم دائرة منظم جهد باستخدام الزينر لضبط جهد الخرج على 5.1 V علماً بأن جهد الدخل 24 V و تيار الحمل 35 mA و تيار الزينر 49 mA

الإلكترونيات

الترانزستور

الوحدة الرابعة : الترانزستور

الترانزستور ثنائي القطبية
Bipolar Junction Transistor

يعتبر الترانزستور أحد الاختراعات الهامة التي عملت ثورة في مسار عالم الإلكترونيات. فلا تخلو أي دائرة من الدوائر الإلكترونية منه تقريباً. فهو يوجد في دوائر الاتصالات، والمكبرات، والمذبذبات، والحاسبات، وغير ذلك كثير.

وللترانزستور تطبيقان رئيسيان وهما :

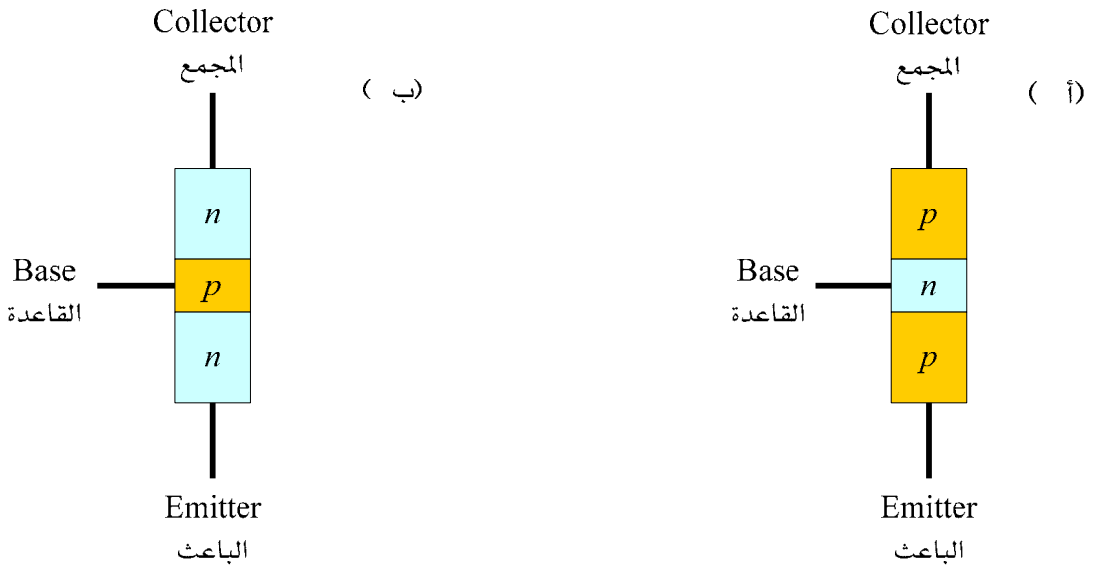
١. يستخدم الترانزستور كمفتاح
٢. يستخدم الترانزستور كمكبر للإشارات الصغيرة

وسيتم شرح التطبيقين بالتفصيل باستخدام نوع مشهور من الترانزستورات، ألا وهو ترانزستور ثنائي القطبية Bipolar Junction Transistor (BJT)

تركيب الترانزستور ثنائي القطبية

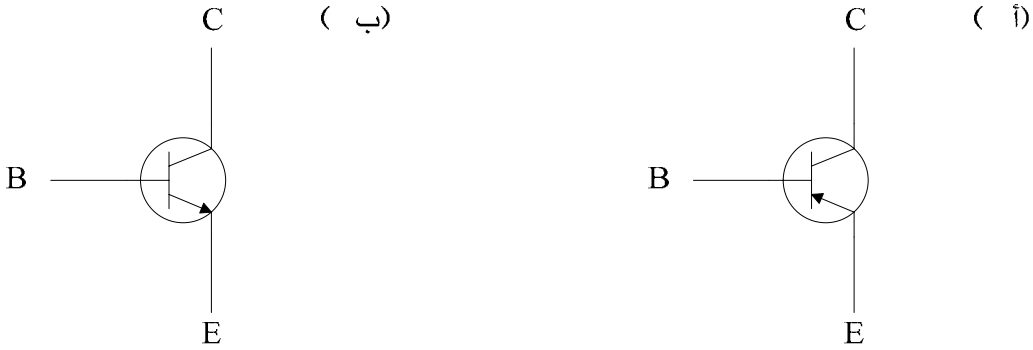
كما أسلفنا، فإن القطع الإلكترونية تتركب من أشباه الموصلات، من النوع الموجب *p* والنوع السالب *n*. وبتشكيل هذين النوعين بطريقة معينة، فإننا نستطيع إنتاج قطعة إلكترونية لها وظائف خاصة وخصائص خاصة. فعندما نضع جزءاً موجباً بين جزأين سالبين، فإننا نركب وصلتين من نوع *pn* كما في الشكل (٤-١). وتشكل هاتان الوصلتان وصلة ثنائية *npn* حسب ترتيب الطبقات. هذه الوصلة الجديدة لها ثلاثة أطراف: القاعدة Base والمجمع Collector و الباعث Emitter.

وإذا وضعنا جزءاً سالباً بين جزأين موجبين، فإننا نبني وصلتين من نوع *np*. ويُسمى هذا النوع *pnp* حسب ترتيب طبقاته.



الشكل (٤-١) تركيب الترانزستور. (أ) نوع *pnp* (ب) *npn*

الشكل (٤-٢) يوضح رمز الترانزستور حيث إن C يمثل المجمع، والطرف B يمثل القاعدة، والطرف E يمثل الباعث.



الشكل (٤-٢) رمز الترانزستور. (أ) نوع *pnp* (ب) *npn*

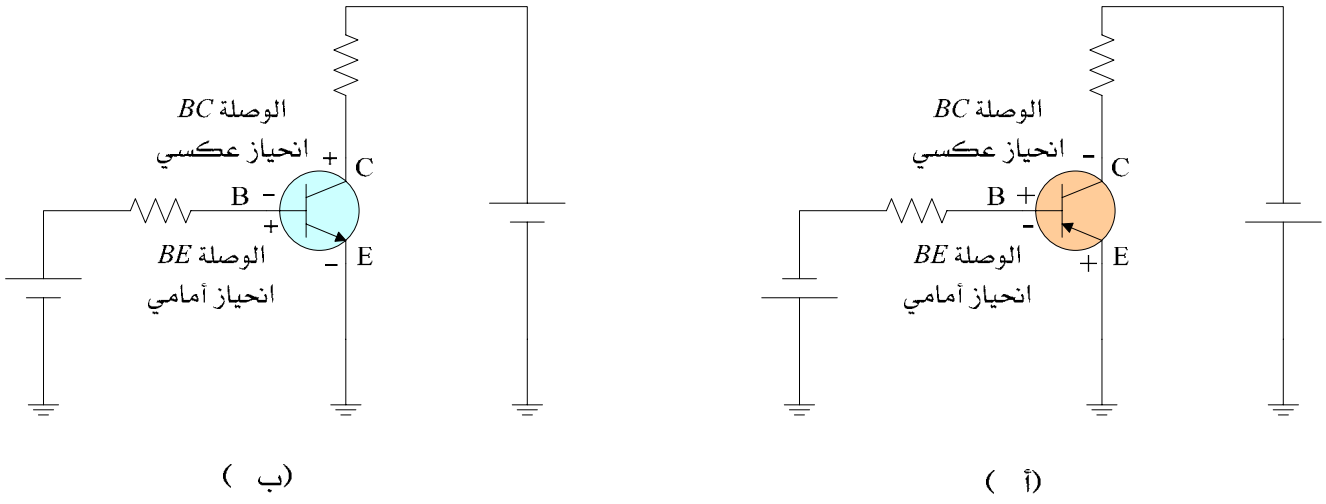
شروط عمل الترانزستور

لا بد من توفر شرطين لكي يعمل الترانزستور:

١. أن تكون الوصلة بين القاعدة والباعث أمامية الانحياز

٢. أن تكون الوصلة بين المجمع و القاعدة عكسية الانحياز

فالشكل (٤-٣) يوضح طريق توصيل الترانزستور لتحقيق الشرطين.



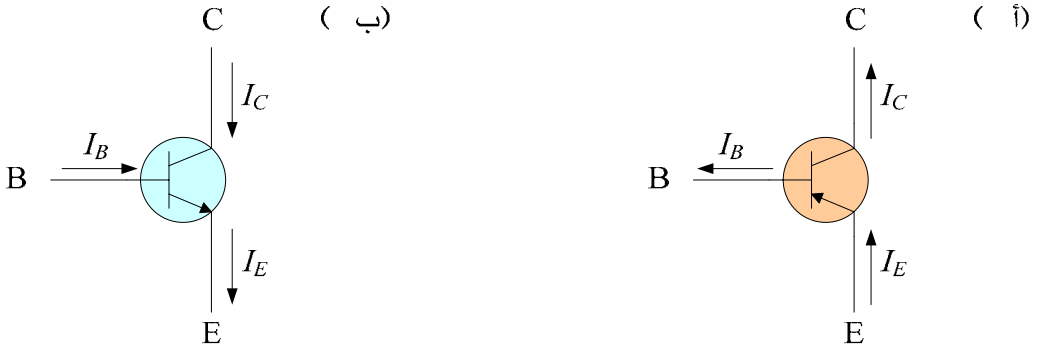
الشكل (٤-٣) توصيل الترانزستور لتحقيق شرطي العمل

(أ) نوع *pnp* (ب) نوع *npn*

إذن، فلا بد أن يكون جهد القاعدة أكبر من جهد الباعث بمقدار 0.7 V في حالة *npn* و 0.7- V في حالة *pnp*. ولابد أن يكون مصدر الجهد الموصل بالمجمع أكبر من مصدر الجهد الموصل بالقاعدة.

تيارات الترانزستور

تختلف قيم التيارات واتجاهاتها في الترانزستور كما في الشكل (٤-٤). ونلاحظ أن اتجاه سهم الباعث يحدد اتجاه التيار المار فيه. فإذا كان اتجاه تيار الباعث I_E إلى الخارج في النوع *npn*، فاتجاه تيار المجمع I_C وتيار القاعدة I_B إلى الداخل. والعكس صحيح في نوع *pnp*.



الشكل (٤-٤) اتجاه التيارات في الترانزستور. (أ) نوع *pnp* (ب) *npn*

ودائماً يكون تيار القاعدة صغيراً جداً مقارنة بتيار المجمع أو الباعث. وكما هو ملاحظ، فإن تيار الباعث يكون مساوياً لمجموع تيار القاعدة والمجمع:

$$I_E = I_B + I_C$$

تحليل التيار والجهد

النسبة بين تيار المجمع إلى تيار القاعدة تُسمى كسب التيار (Beta (β):

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

ولكل ترانزستور نسبة مختلفة حسب نوعه وتصنيعه ويمكن الحصول عليها من بيانات الترانزستور الخاصة به. ويرمز لها أيضاً بالرمز h_{FE} وتتراوح هذه النسبة بين 10 و 500 والقيمة التي نحصل عليها من

ورقة البيانات الخاصة بالترانزستور قد تتغير قليلاً متأثرة بدرجة الحرارة. وقانون كسب التيار لا يطبق إلا عندما يتحقق الشرطان السابقان لعمل الترانزستور.

مثال (٤-١):

ترانزستور له β تساوي 150 ، وكان تيار القاعدة 100 μA
احسب تيار المجمع وتيار الباعث.

$$I_C = \beta I_B = 150 \times 100\mu = 15 \text{ mA}$$

$$I_E = I_B + I_C = 100\,\mu + 15\,\text{m} = 15.1\,\text{mA}$$

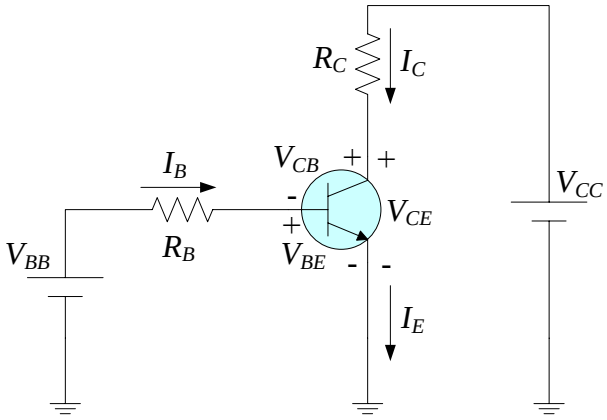
لاحظ أن تيار القاعدة صغير جداً مقارنة بتيار الباعث أو تيار المجمع.

ملحوظة هامة:

تيار القاعدة هو الذي يتحكم في تيار المجمع. أي أنه عندما نحتاج لمرور تيار معين في المجمع، فإننا نضبطه بتحديد تيار القاعدة. فتيار القاعدة هو الذي يتحكم بالترانزستور في عمله كمفتاح أو كمكبر.

تحليل الدائرة

نوصل الترانزستور من نوع *npn* وذلك لتحليل الجهود والتيارات كما في الشكل (٤-٥).



الشكل (٤-٥) دائرة تحليل التيارات والجهود

ولكي يعمل الترانزستور، فلا بد أن يكون جهد القاعدة أكبر من جهد القاعدة جهد الباعث بمقدار 0.7 V ولذلك فإن جهد القاعدة بالنسبة للباعث هو:

$$\begin{aligned} V_{BE} &= V_B - V_E \\ &= 0.7 - 0 = 0.7 \text{ V} \end{aligned}$$

وبتطبيق قانون كيرشوف للجهود حول المقاومة المرتبطة بقاعدة الترانزستور فإن:

$$V_{R_B} + V_{BE} - V_{BB} = 0$$

$$\therefore V_{R_B} = V_{BB} - V_{BE}$$

وحسب قانون أوم فإن:

$$V_{R_B} = R_B I_B$$

فيصبح قانون تيار القاعدة هو:

$$\therefore I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B}$$

وبتطبيق قانون كيرشوف للجهود حول المقاومة R_C فإن:

$$I_C R_C + V_{CE} - V_{CC} = 0$$

وتكون قيمة فرق الجهد بين المجمع والباعث هي:

$$\therefore V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

وتكون قيمة فرق الجهد بين المجمع والقاعدة هي:

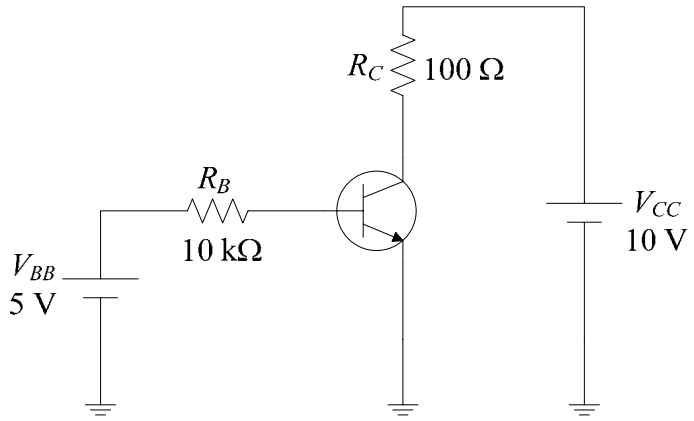
$$V_{CB} = V_{CE} - V_{BE}$$

وتطبق هذه القوانين على الترانزستور من نوع *pnp* ولكن بتغيير الإشارات. فمثلاً يكون:

$$V_{BE} = -0.7 \text{ V}$$

مثال(٤-٢):

احسب $I_B, I_C, I_E, V_{CE}, V_{CB}$ علماً بأن الترانزستور له $\beta = 150$



لإيجاد التيارات:

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} = \frac{5 - 0.7}{10\,\text{k}\Omega} = 430\,\mu\text{A}$$

$$I_C = \beta I_B = 150 \times 430\mu = 64.5\ \text{mA}$$

$$I_E = I_B + I_C = 430\,\mu + 64.5\,\text{m} = 64.9\,\text{mA}$$

لإيجاد الجهود:

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C = 10 - (64.5\,\text{mA} \times 100) = 10 - 6.45 = 3.55\,\text{V}$$

$$V_{CB} = V_{CE} - V_{BE} = 3.55 - 0.7 = 2.85\,\text{V}$$

منحنى خصائص المجمع

منحنى خصائص المجمع هو رسم العلاقة بين تيار المجمع I_C و جهد المجمع بالنسبة للباعث V_{CE} عند قيم محددة لتيار القاعدة. حيث إن تيار القاعدة هو الذي يتحكم في تيار المجمع. وهذا المنحنى يوضح لنا الحالات التي يعمل فيها الترانزستور. ويتم رسم المنحنى بتحديد تيار القاعدة أولاً عن طريق المصدر V_{BB} ثم نقوم بزيادة جهد المصدر V_{CC} تدريجياً وقياس I_C و V_{CE}.

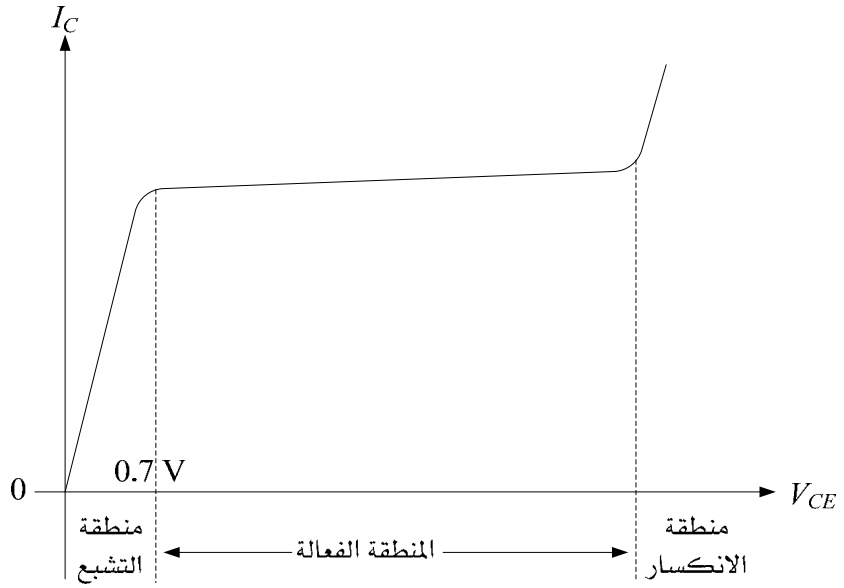
فعندما يكون تيار القاعدة صفراً، فإن تيار المجمع صفر أيضاً. أي أن:

$$I_B = 0$$
$$I_C = \beta I_B = 0$$

ويكون الترانزستور في هذه الحالة مقفلاً (معطلاً) off.

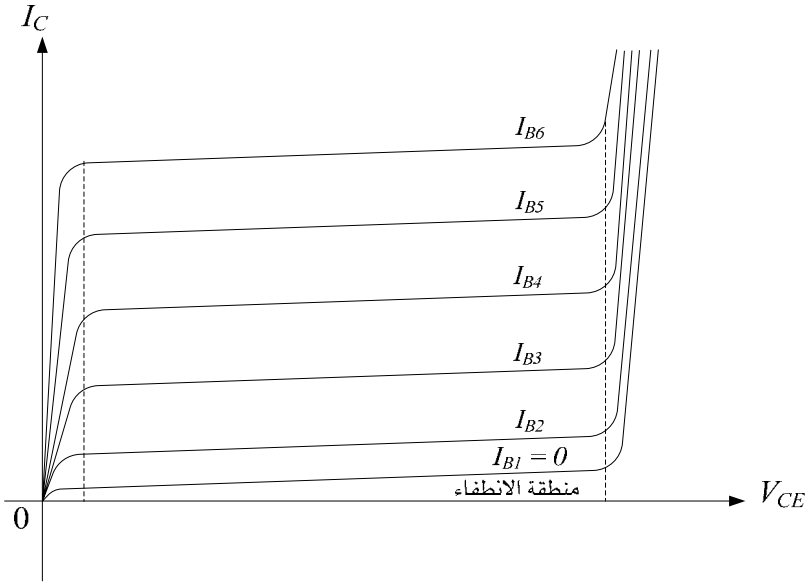
وعند زيادة المصدر V_{BB} ليمر تيار قاعدة محدد، فإن الوصلة بين القاعدة والباعث تكون أمامية. أي أن $V_{BE} = 0.7$ V. عندها نقوم بزيادة V_{CC} تدريجياً فيبدأ تيار المجمع بالمرور. وعندما تكون قيمة V_{CE} أصغر من 0.7 V، فإن الوصلة بين المجمع والقاعدة تكون أمامية الانحياز. وهنا لم يتحقق الشرط الثاني لعمل الترانزستور. وتُسمى هذه الحالة بالتشبع Saturation. وعندما يتعدى V_{CE} القيمة 0.7 V، فإن الوصلة بين المجمع والقاعدة تصبح عكسية الانحياز ويتحقق الشرط الثاني لعمل الترانزستور. ويعمل الترانزستور في هذه الحالة بصورة خطية. أي أن تيار المجمع ثابت حسب قيمة تيار القاعدة المحدد. وتسمى هذه المنطقة بالمنطقة الفعالة Active Region .

وعندما يزداد V_{CE} زيادة كبيرة، فإن الوصلة بين المجمع والقاعدة تصل إلى نقطة الانكسار، ويزداد تيار المجمع بصورة مطردة، مما قد يتلف الترانزستور. لذلك يجب ألا نصل إلى هذه المرحلة عند تشغيل الترانزستور. والشكل (٤-٦) يوضح خصائص منحنى المجمع.



الشكل(٤-٦) منحنى خواص المجمع

وعند رسم هذا المنحنى لعدة قيم من تيارات القاعدة، فإن العملية تتكرر كما في الشكل (٤-٧).



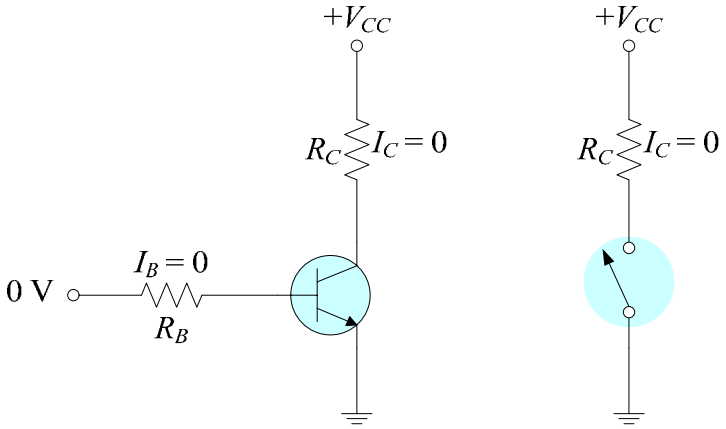
الشكل (٤-٧) منحنى خواص المجمع لعدة قيم من تيار القاعدة

بالتمعن في منحنى الخواص، نلاحظ أن هناك ثلاث مناطق للترانزستور:

١. منطقة الإقفال (التعطيل) Cut-off Region
٢. منطقة التشبع Saturation Region
٣. المنطقة الفعالة Active Region

أولاً: حالة الانطفاء

في هذه الحالة، يكون تيار القاعدة مساوياً للصفر، وبالتالي فإن الترانزستور لا يعمل ولا يمر تيار المجمع. ويمكن تشبيه هذا الوضع كمفتاح مفتوح كما في الشكل (٤-٨)



الشكل (٤-٨) حالة الإقفال (التعطيل).

وبالتالي فإن:

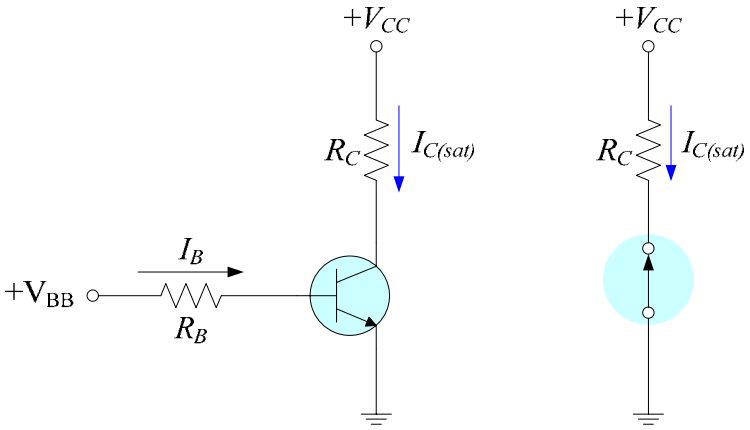
$$I_B = 0$$

$$I_C = 0$$

$$V_{CE} = V_{CC}$$

ثانياً: حالة التشبع:

وفي هذا الوضع تكون قيمة V_{CE} أصغر من 0.7 V وتُسمى $V_{CE(sat)}$ ولاينطبق قانون كسب التيار في هذه الحالة. ويمكن تمثيل هذه الحالة بمفتاح مغلق كما في الشكل (٤-٩).



الشكل (٤-٩) حالة التشبع

وبالتالي، فإن قيمة تيار التشبع المار في المجمع هو:

$$I_{C(sat)} = \frac{V_{CC} - V_{CE(sat)}}{R_C}$$

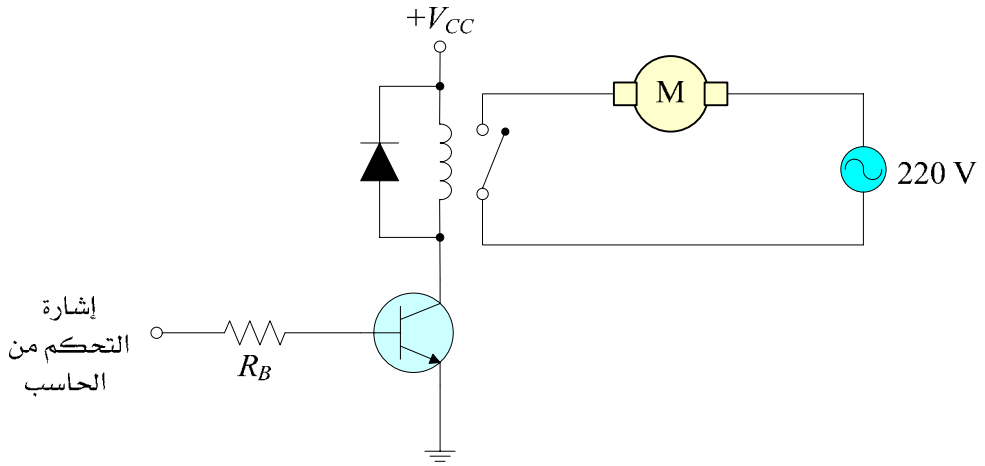
بدمج الحالتين السابقتين، فإن الترانزستور يعمل كمفتاح switch يوصل ويفصل on-off. وهذا هو التطبيق الأول للترانزستور.

ثالثاً: الحالة الفعالة

في هذا الوضع، يعمل الترانزستور في وضع خطي ويعمل كمكبر للإشارات. وسيأتي شرح ذلك في الفصل القادم.

تطبيق:

يستخدم الترانزستور كمفتاح حيث يمكن تشغيل وإطفاء حمل صغير كالدايود الضوئي. ولكن ماذا إذا كان الحمل محركاً كهربائياً كبيراً ويمر فيه تيار عال ويعمل على جهد عال لا يتحمله الترانزستور؟ بالإضافة إلى رغبتنا في التحكم به عن طريق إشارة صغيرة باستخدام الحاسب مثلاً! الحل هو استخدام الترانزستور كمفتاح واستخدام المرحل Relay كما في الشكل (٤-١٠).

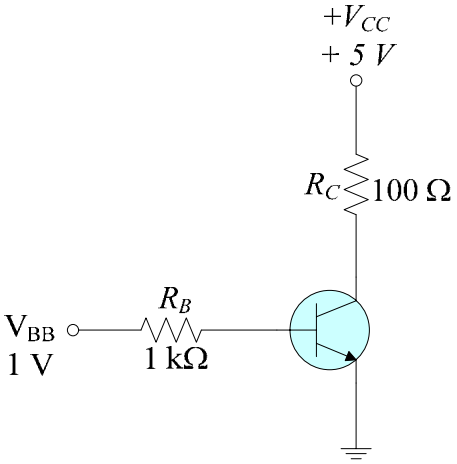


الشكل (٤-١٠) دائرة ربط محرك بالحاسب

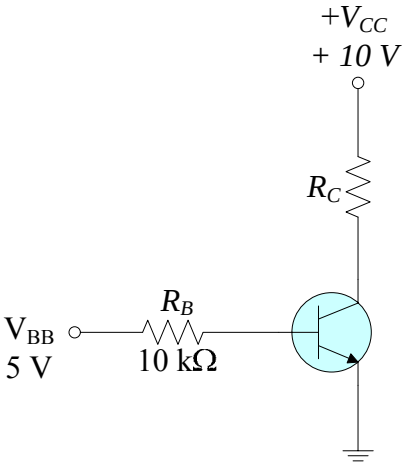
فالمرحل عبارة عن ملف. فعندما يمر فيه تيار يتولد مجال مغناطيسي يجذب إليه مفتاح ليكمل دائرة المحرك. فعندما تصل الإشارة الصغيرة من الحاسب، والمتصلة بقاعدة الترانزستور، فإن الترانزستور يعمل، فيمر تيار المجمع فيعمل المرحل. وبالتالي يعمل المحرك. وعندما تصبح الإشارة صفراً، ينطفئ الترانزستور، فلا يمر التيار في المرحل ولا يعمل المحرك. والموحد المتصل بالتوازي مع ملف المرحل يُسمى دايود الحذافة. ومهمته إخماد التيارات العكسية المتولدة من الملف نتيجة الإطفاء، وذلك لحماية الترانزستور من التلف،

مسائل

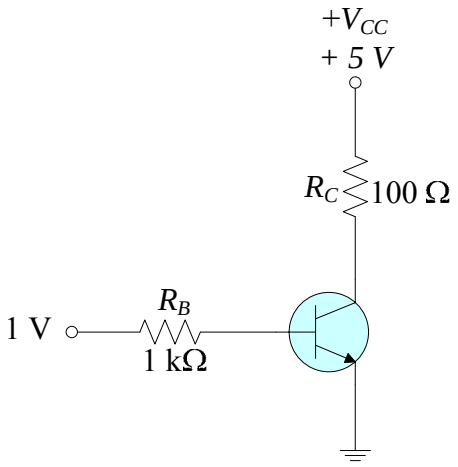
١. من الشكل التالي، أوجد قيمة V_{CE} . في أي حالة يعمل الترانزستور (التشبع – الانطفاء – الفعالة)



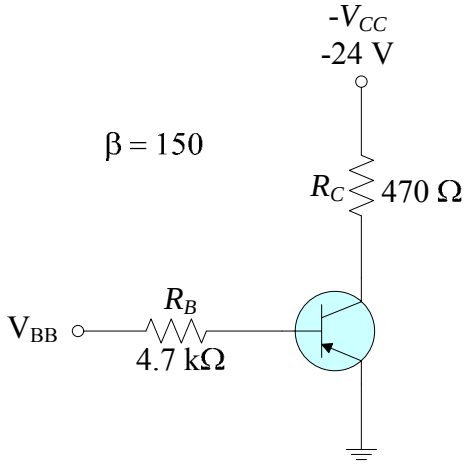
٢. من الشكل، أوجد قيمة R_C وكذلك تيار القاعدة، علماً بأن $I_C = 73$ mA و $\beta = 170$ و $V_{CB} = 1.943$ V



٣. من الشكل التالي، أوجد فرق الجهد بين المجمع والباعث علماً بأن $I_B = 0$ A ؟



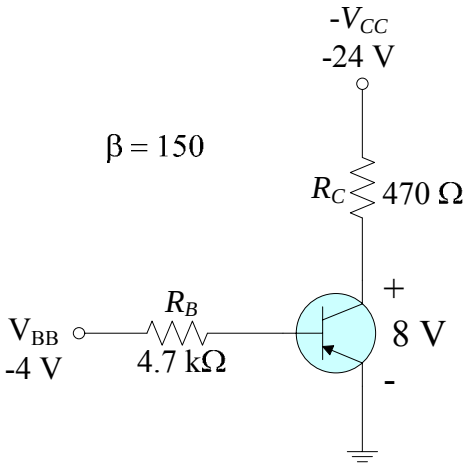
٤. أجب عن الأسئلة التالية مستعيناً بالشكل التالي:



أ) أوجد قيمة V_{BB} اللازمةلجعل الترانزستور في حالة انطفاء.

ب) إذا كان الترانزستور في حالة الانطفاء، أوجد قيمة V_{CE} و I_C ؟

٥. من الشكل التالي، أوجد قيم كل من: I_C, I_B, β_{DC}



الألكترونيات

انحياز الترانزستور

الوحدة الخامسة : انحياز الترانزستور

دوائر انحياز الترانزستور ثنائي القطبية
BJT Bias Circuits

كما مر معنا ، فإن للترانزستور ثلاث حالات يعمل فيها. فهو يعمل كمفتاح في حالتي التشبع والانطفاء، ويعمل كمكبر وبصورة خطية في حدود المنطقة الفعالة كما في الشكل (٥-١).

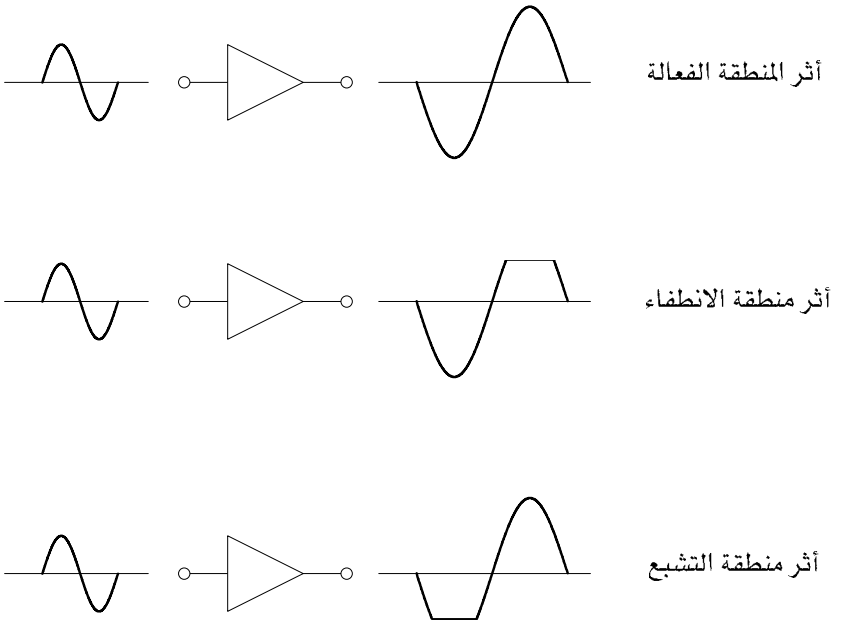
منطقة الانقطاع	المنطقة الفعالة	منطقة التشبع
مفتاح مفتوح	مكبر	مفتاح مغلق

الشكل (٥-١) مناطق عمل الترانزستور الثلاث

فإذا زاد تيار القاعدة كثيراً ، فإنه يدفع الترانزستور نحو التشبع ويكون: $V_{CE} = V_{CE(sat)}$

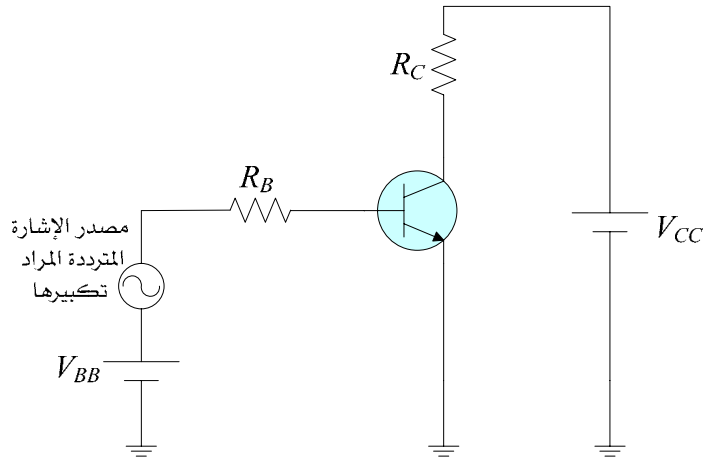
وإذا قل كثيراً ، فإنه يدفع الترانزستور نحو الانطفاء، ويكون $V_{CE} = V_{CC}$

والشكل (٥-٢) يوضح أثر الحالات الثلاث على أشكال الموجات الخارجة من المكبر. فحالتي التشبع والانطفاء تسببان تشوهاً لموجة الخرج. بينما نلاحظ أن موجة الخرج هي نسخة سليمة ومكبرة من موجة الدخل عند عمل المكبر في نطاق المنطقة الفعالة.



الشكل (٥-٢) تأثير مناطق عمل الترانزستور على تكبير الإشارات

وعند استخدام الترانزستور كمكبر، فإنه لا بد من تغذيته بجهد مستمر أولاً. وضبط تيار القاعدة بقيمة مناسبة لكي يعمل الترانزستور بطريقة خطية عن طريق V_{BB} كما في الشكل (٥-٣).

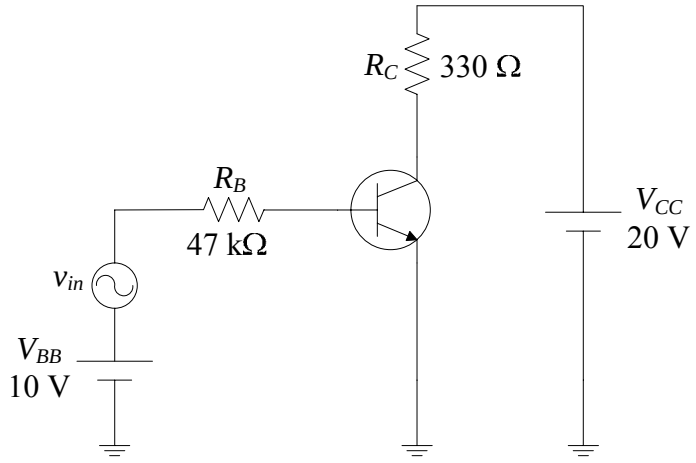


الشكل (٥-٣) دائرة الانحياز مع إشارة الدخل

فإذا أردنا تكبير إشارة مترددة، فإننا نوصلها بالقاعدة كدخل للترانزستور. وبالتالي فإن تيار القاعدة لن يكون ثابتاً بسبب تغير إشارة الدخل. ولذلك فقد يتسبب ارتفاع تيار القاعدة إلى جعل الترانزستور في وضع التشبع. وقد يتسبب انخفاضه إلى جعل الترانزستور في وضع الانطفاء. وكلتا الحالتين سوف تسبب في تشويه موجة الخرج. لذا كان لا بد من ضبط تيار القاعدة عند نقطة نضمن عندها أن الترانزستور يعمل في الوضع الخطي ولا يصل إلى وضع التشبع أو الانطفاء. هذه النقطة تُسمى نقطة التشغيل أو نقطة Q (Q-point) والتي عندها نوجد قيمة I_C وكذلك V_{CE} المناسبين لعمل الترانزستور كمكبر عند قيمة معينة من I_B.

مثال (٥-١):

حدد نقطة التشغيل، وكذلك أعلى قيمة لتيار القاعدة لكي يكون الترانزستور في حالة خطية إذا علمت أن $\beta = 200$.



أولاً: نوجد I_C و V_{CE}

$$I_B = \frac{V_{BB} - V_{BE}}{R_B} = \frac{10 - 0.7}{47\,\text{k}\Omega} = 198\,\mu\text{A}$$

$$I_C = \beta I_B = 200 \times 198\,\mu = 39.6\,\text{mA}$$

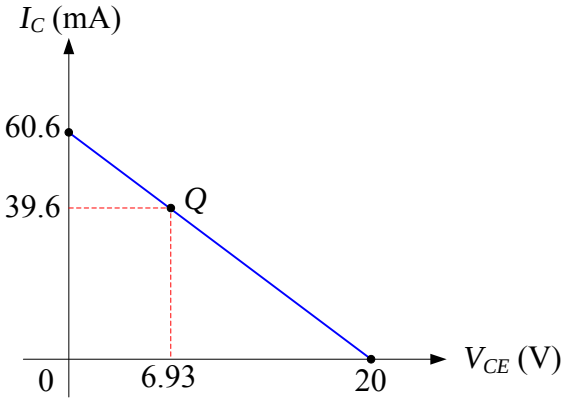
$$V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C = 20 - (330 \times 39.6\,\text{m}) = 6.93\,\text{V}$$

إذن، فنقطة التشغيل تكون عندما يكون $I_C = 36.6$ mA و $V_{CE} = 6.93$ V

ثانياً: لتحديد مقدار التغير المسموح به لتيار القاعدة، فإننا نحدد أولاً مقدار تيار المجمع في حالتي الانطفاء والتشبع. في حالة الانطفاء $I_C = 0$ A و في حالة التشبع فإن:

$$I_{C(sat)} = \frac{V_{CC} - V_{CE(sat)}}{R_C} = \frac{20 - 0}{330} = 60.6\,\text{mA}$$

يجب أن يزداد تيار المجمع بمقدار (60.6 m – 39.6 m = 21 mA) لكي يصل إلى حالة التشبع.
ويحتاج إلى أن ينقص تيار المجمع بمقدار (39.6 m – 0 = 39.6 mA) لكي يصل إلى حالة الانطفاء كما في الشكل:



لذلك فهو أقرب إلى التشبع منه إلى الانطفاء. فتصبح قيمة أعلى تغير في تيار القاعدة هي:

$$I_b = \frac{I_c}{\beta} = \frac{21\,\text{m}}{200} = 105\,\text{mA}$$

وعليه فإنه عند إضافة مصدر إشارة متردد ، فإنه يجب ألا يتجاوز تيار القاعدة:

$$I_{B(\max)} = 198\,\mu + 105\,\mu = 303\,\mu\text{A}$$

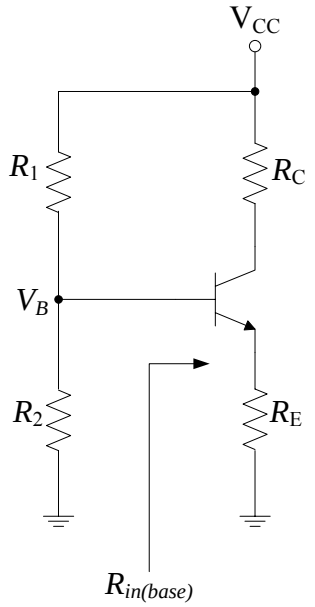
ولا ينقص عن:

$$I_{B(\min)} = 198\,\mu - 105\,\mu = 93\,\mu\text{A}$$

وذلك لضمان عمل الترانزستور بشكل خطي.

الانحياز باستخدام مقسم الجهد

كما رأينا، فإنه يتم ضبط تيار القاعدة عن طريق المصدر V_{BB} وهذا يدعو إلى استخدام مصدرين هما V_{CC} و V_{BB}. فهل يمكن استخدام مصدر واحد بدلاً من مصدرين لانحياز الترانزستور؟
نعم، وذلك بتغذية القاعدة عن طريق المصدر V_{CC} والاستغناء عن V_{BB}. ويمكن ضبط قيمة الجهد المسلط على القاعدة عن طريق توزيع الجهد على مقاومتين متصلتين على التوالي. فالشكل (٥-٤) يوضح هذه الطريقة، حيث إن المقاومتين R_1 و R_2 متصلتان بالمصدر V_{CC}.

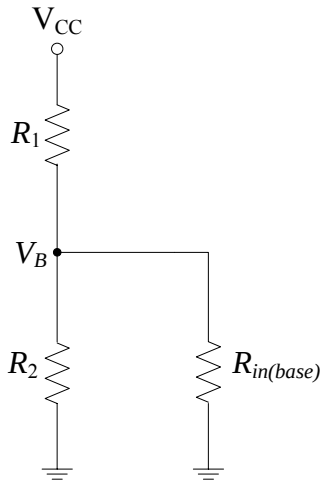


الشكل (٥-٤) دائرة انحياز مقسم الجهد

هناك مقاومة أخرى تدخل في حساب توزيع الجهد. هذه المقاومة هي مقاومة الدخل المتصلة بالقاعدة $R_{in(base)}$ وتساوي:

$$R_{in(base)} \cong \beta_{DC} R_E$$

وبالتالي فإن الدائرة تصبح كما في الشكل (٥-٥):



الشكل (٥-٥) اعتبار مقاومة القاعدة

من الشكل، فإن المقاومة $R_{in(base)}$ متصلة على التوازي مع المقاومة R_2. فتكون المقاومة الكلية هي:

$$R_2 \backslash\backslash R_{in(base)}$$

وبالتالي فإن الجهد الواقع على القاعدة V_B هو الجهد الواقع على R_2 حسب قانون توزيع الجهد:

$$V_B = \left(\frac{R_2 \backslash\backslash R_{in(base)}}{R_1 + R_2 \backslash\backslash R_{in(base)}} \right) V_{CC}$$

ونظراً لأن $R_{in(base)} \cong \beta_{DC} R_E$ وعادة تكون β كبيرة. وبالتالي تصبح قيمة βR_E أكبر بكثير من R_2. فإذا كانت مقاومة صغيرة R_2 متصلة على التوازي بمقاومة كبيرة $R_{in(base)}$، فإن المحصلة تساوي تقريباً المقاومة الصغيرة R_2. ولذلك، فإنه يمكننا تبسيط القانون ليصبح:

$$V_B \cong \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{CC}$$

ويمكن استخدام هذا القانون إذا كانت قيمة $R_{in(base)}$ أكبر من R_2 على الأقل بعشر مرات.
ويمكن حساب الجهود والتيارات الأخرى كما يلي:
الجهد الواقع على مقاومة الباعث R_E هو:

$$V_E = V_B - V_{BE}$$

وتيار الباعث:

$$I_E = \frac{V_E}{R_E}$$

ونظراً لأن تيار القاعدة صغير جداً، فيمكن إهماله، فيصبح:

$$I_C \cong I_E$$

وباستخدام قانون كيرشوف للجهود، فنستنتج قانون V_{CE}

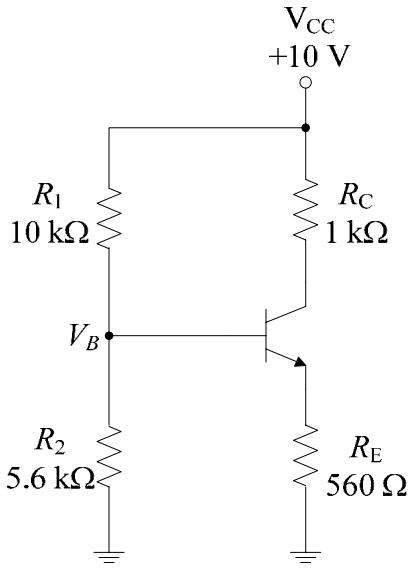
$$V_{CE} + I_C R_C + I_E R_E - V_{CC} = 0$$

ولأن تيار المجمع يساوي تقريباً تيار المجمع، فنعيد صياغة القانون كالتالي:

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

مثال(٥-٢):

احسب قيمة V_{CE} و I_C إذا علمت أن $\beta = 100$



$$R_{in(base)} \cong \beta_{DC} R_E = 100 \times 560 = 56\,\text{k}\Omega$$

طالما أن $R_{in(base)}$ أكبر من عشرة أضعاف R_E ، فيمكننا إهمالها. لذلك:

$$V_B \cong \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{CC} = \left(\frac{5.6\,\text{k}}{10\,\text{k} + 5.6\,\text{k}} \right) 10 = 3.59\,\text{V}$$

$$I_E = \frac{V_B - V_{BE}}{R_E} = \frac{3.59 - 0.7}{560} = 5.16\,\text{mA}$$

$$I_C \cong I_E = 5.16\,\text{mA}$$

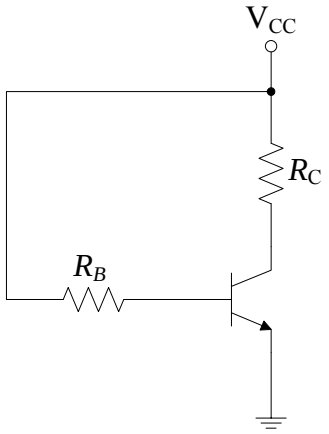
$$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E) = 10 - 5.16\,\text{m}(1\,\text{k} + 560) = 1.95\,\text{V}$$

والقوانين المطبقة على الدائرة التي تستخدم ترانزستور *npn* تطبق على النوع *pnp* ولكن نعكس الإشارات.

هناك طرق أخرى لانحياز الترانزستور، ولكن تبقى طريقة توزيع الجهد هي الطريقة الأشهر والأفضل، وهذه الطرق هي:

انحياز القاعدة Base Bias

الشكل (٥-٦) يوضح طريقة انحياز القاعدة حيث إنها متصلة بالمصدر V_{CC} عن طريق المقاومة R_B.



الشكل (٥-٦) دائرة انحياز القاعدة

وبتطبيق قانون كيرشوف للجهود حول المجمع فإن:

$$V_{CC} - I_C R_C - V_{CE} = 0$$

$$\therefore V_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

وبتطبيق قانون كيرشوف للجهود حول القاعدة فإن:

$$V_{CC} - I_B R_B - V_{BE} = 0$$

$$\therefore I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

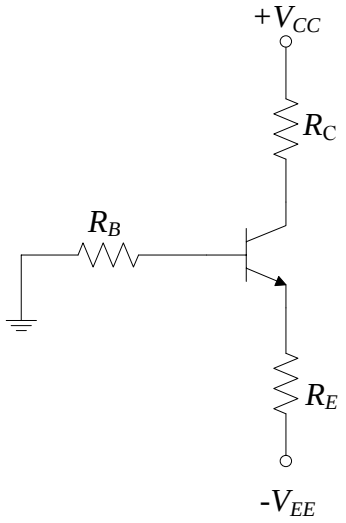
وعندما نعوض عن قيمة I_B بالقانون $I_C = \beta I_B$ فإننا نحصل على:

$$I_C = \beta_{DC}\left(\frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}\right)$$

ويتضح من المعادلة أن I_C يعتمد على قيمة β . وهذا عيب هذه الدائرة حيث إن β تتأثر بالحرارة مما يجعل الدائرة غير مستقرة.

انحياز الباعث

دائرة انحياز الباعث تستخدم مصدرين للدائرة V_{CC} و V_{EE} كما في الشكل (٥-٧).



الشكل (٥-٧) دائرة انحياز الباعث

وحيث إن

$$I_E = \frac{-V_{EE} - V_{BE}}{R_E + R_B/\beta_{DC}}$$

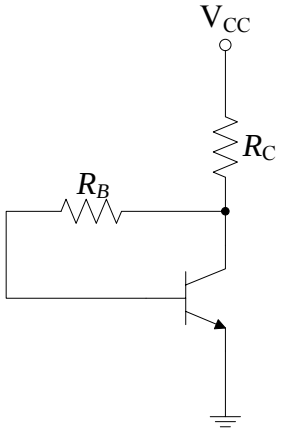
وحيث إن $I_C \cong I_E$

$$\therefore I_C = \frac{-V_{EE} - V_{BE}}{R_E + R_B/\beta_{DC}}$$

وكما هو واضح من القانون، فإن تيار المجمع يعتمد على قيمة V_{BE} و β أيضاً. ولكون هذان المتغيران يتأثران بالحرارة. فهذه الدائرة أيضاً غير مستقرة.

انحياز المجمع

الشكل (٥-٨) يوضح دائرة انحياز المجمع حيث إن القاعدة متصلة بالمجمع عن طريق المقاومة R_B بدلاً من اتصالها بالمصدر V_{CC}.



الشكل (٥-٨) دائرة انحياز المجمع

وبتحليل الدائرة نجد أن:

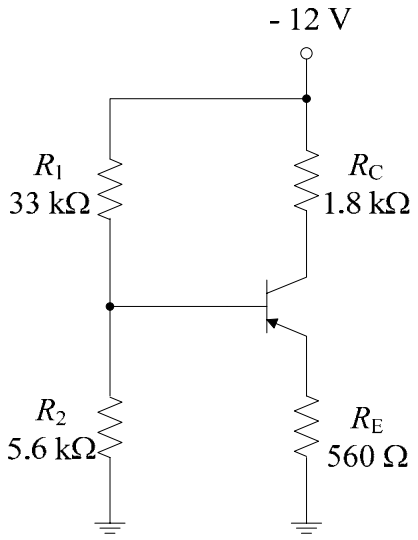
$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_C + R_B/\beta_{DC}}$$

ومن المعادلة نجد أن تيار المجمع يعتمد على V_{BE} و β أيضاً. وهذا يجعل هذه الدائرة غير مستقرة بسبب تأثرها بدرجة الحرارة.

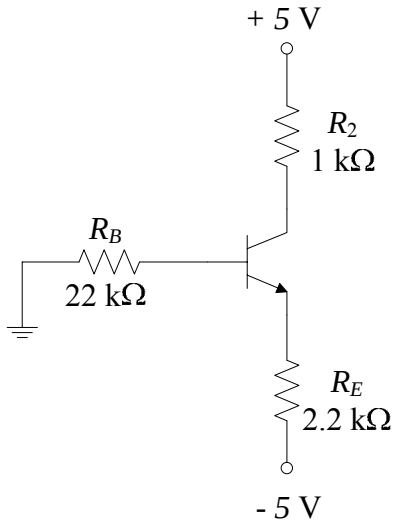
مما سبق نجد أن أفضل دائرة لانحياز الترانزستور هي دائرة الانحياز بتقسيم الجهد والذي توفر استقراراً للترانزستور. ويمكن استخدامها لتكبير الإشارات المترددة.

مسائل

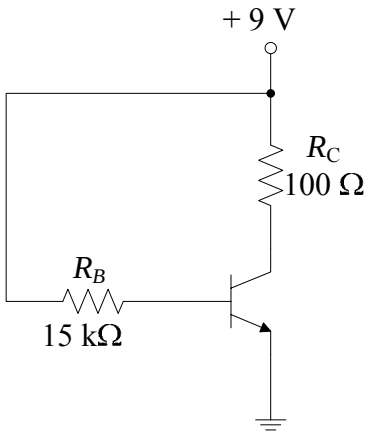
١. احسب قيمة V_{CE} و I_C إذا علمت أن $\beta = 50$



٢. أوجد قيمة تيار المجمع لكل شكل من الأشكال التالية:



(ب)



(أ)

الإلكترونيات

مكبرات الترانزستور

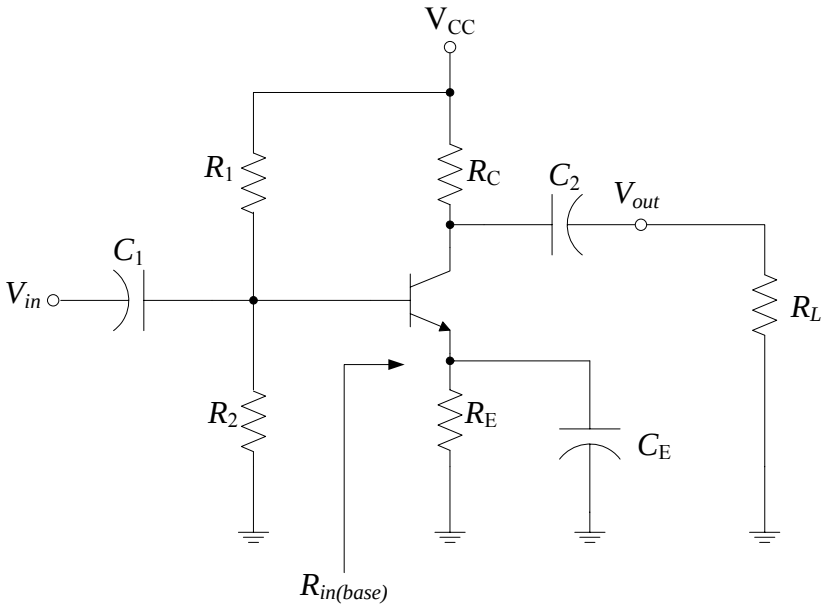
الوحدة السادسة : مكبرات الترانزستور

مكبر الإشارات باستخدام الترانزستور

مكبر الباعث المشترك:

في كثير من التطبيقات، وخاصة في دوائر الاتصالات، فإن الإشارة التي تُستقبل تكون صغيرة جداً، ولا بد من تكبيرها أولاً ثم التعامل معها. فلذلك كان لا بد من إدخالها على دائرة تكبير لتكبيرها. من الدوائر المشهورة والمستخدمة في التكبير باستخدام BJT هي دائرة مكبر الباعث المشترك Common Emitter Amplifier. وسُميت بذلك لأن الباعث يكون متصلاً بالأرضي وهو الطرف المشترك للدائرة.

الشكل (٦-١) يوضح دائرة مكبر الباعث المشترك. ولفهم عمل هذه الدائرة، فلا بد من تحليلها. ويكون التحليل على مرحلتين: المرحلة الأولى تشمل عمل الدائرة في حالة الجهد المستمر DC Analysis لكونها تُغذى بجهد مستمر ولضمان عمل المكبر خلال المنطقة الفعالة. والتحليل الثاني في حالة الجهد المتردد AC Analysis لكون دخل الدائرة عبارة عن إشارة صغيرة مترددة.



الشكل (٦-١) مكبر الباعث المشترك

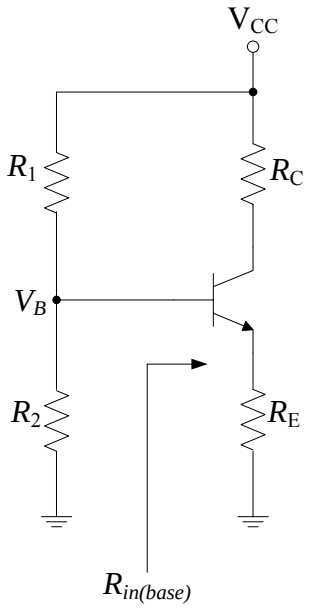
التحليل في حالة الجهد المستمر

كما هو معلوم فإن معاوقة المكثف في حالة الجهد المستمر تساوي مالا نهاية. حيث أن:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

ولكون التردد يساوي صفراً، فإن: $X_C = \infty$

ولذلك فإن المكثف سيمثل دائرة مفتوحة، وأي عنصر متصل بالمكثف سوف يكون معزولاً عن الدائرة. عندها تصبح الدائرة كما في الشكل (٦-٢).



الشكل (٦-٢) الدائرة المكافئة لتحليل الوضع المستمر

والدائرة عبارة دائرة انحياز مقسم الجهد الذي مر شرحه في الوحدة الخامسة حيث إن:

$$V_B \cong \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{CC}$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_C + R_E)$$
$$R_{in(base)} \cong \beta_{DC} R_E$$

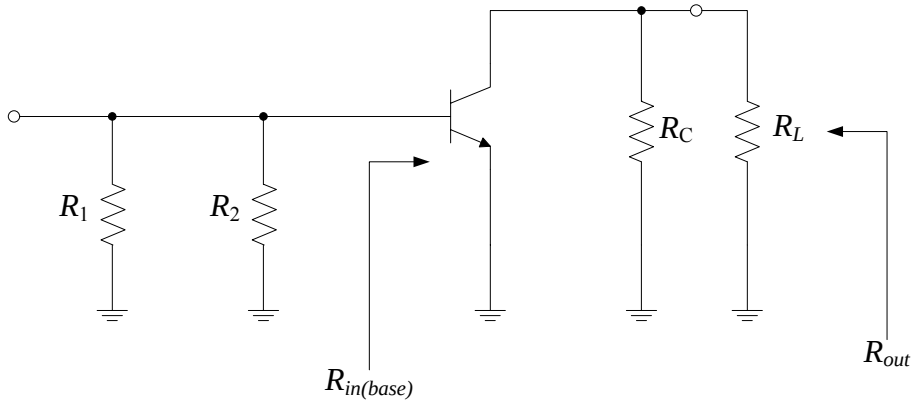
$$I_C \cong I_E$$

التحليل في حالة الجهد المتردد

لتحليل الدائرة الأساسية من الشكل (٦-١)، فإننا نتبع الخطوتين التاليتين:

١. نقصر جميع المكثفات لكونها تعتبر موصلة في حالة التيار المتردد
٢. نقصر جميع مصادر التيار المستمر لإلغائها.

فإذا طبقنا الخطوتين، فإننا نحصل على الدائرة كما في الشكل (٦-٣)



الشكل (٦-٣) الدائرة المكافئة لتحليل الوضع المتردد

في حالة التحليل المتردد، فإننا سوف نستخدم الرموز الصغيرة (e, b, c) للتفريق بينها وبين حالة التحليل المستمر (E, B, C). في هذه الحالة تنشأ مقاومة صغيرة مرتبطة بالباعث r_e' ويمكن حساب المقاومة كما يلي:

$$r_e' = \frac{25\,\text{mV}}{I_E}$$

ولحساب مقاومة الدخل المرتبطة بالقاعدة:

$$R_{in(base)} = \beta_{ac} r_e'$$

وبالتالي تكون مقاومة الدخل الكلية:

$$R_{in(tot)} = R_1 \backslash\backslash R_2 \backslash\backslash R_{in(base)}$$

وتكون مقاومة الخرج عبارة عن:

$$R_{out} = R_C \backslash\backslash R_L$$

وفي حالة عدم وجود مقاومة الحمل فإن:

$$R_C = R_{out}$$

ولحساب نسبة كسب (تكبير) الجهد Voltage Gain :

$$A_v = \frac{R_{out}}{r_e' + R_E}$$

ويمكن زيادة نسبة التكبير وذلك بإلغاء المقاومة R_E باستخدام المكثف C_E والذي يُسمى مكثف التجاوز Bypass capacitor حيث سيمرر التيار المتردد لكون معاوقته أصغر بكثير من قيمة R_E والتي لن تدخل في قانون التكبير:

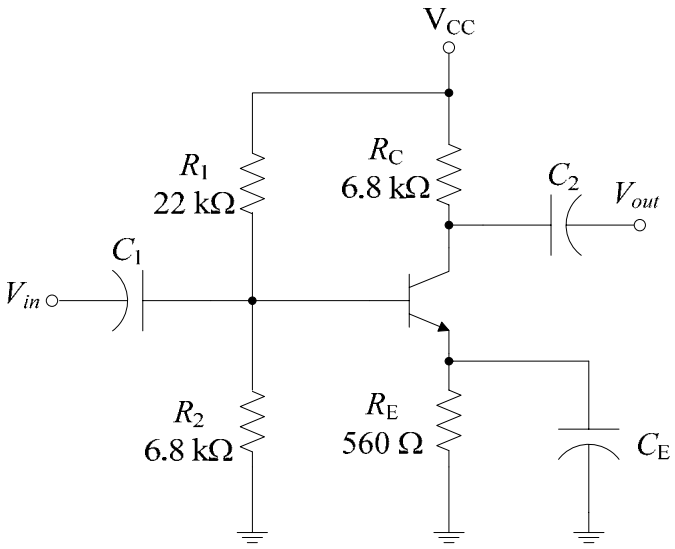
$$A_v = \frac{R_{out}}{r_e'}$$

ويلعب تردد إشارة الدخل دوراً في اختيار قيمة سعة المكثف حسب العلاقة:

$$10X_C \le R_E$$

مثال (٦-١):

احسب نسبة التكبير بدون وبمكثف التجاوز إذا كانت $r_e' = 8\,\Omega$. ماهي أقل قيمة لمكثف التجاوز لكي يعمل المكبر عند ترددات ما بين 2 kHz و 10 kHz ؟



$$R_E = 560\,\Omega$$

نسبة التكبير بدون المكثف:

$$A_v = \frac{R_{out}}{r_e' + R_E} = \frac{1\,\text{k}}{8 + 560} = 1.76$$

نسبة التكبير بوجود المكثف:

$$A_v = \frac{R_{out}}{r_e'} = \frac{1\,\text{k}}{8} = 125$$

حساب قيمة مكثف التجاوز:

$$\because 10X_C \le R_E$$

$$X_C = \frac{R_E}{10} = \frac{560}{10} = 56\,\Omega$$

لاختيار أقل قيمة للمكثف يمكن اختيارها، فإننا نختار التردد الصغير:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

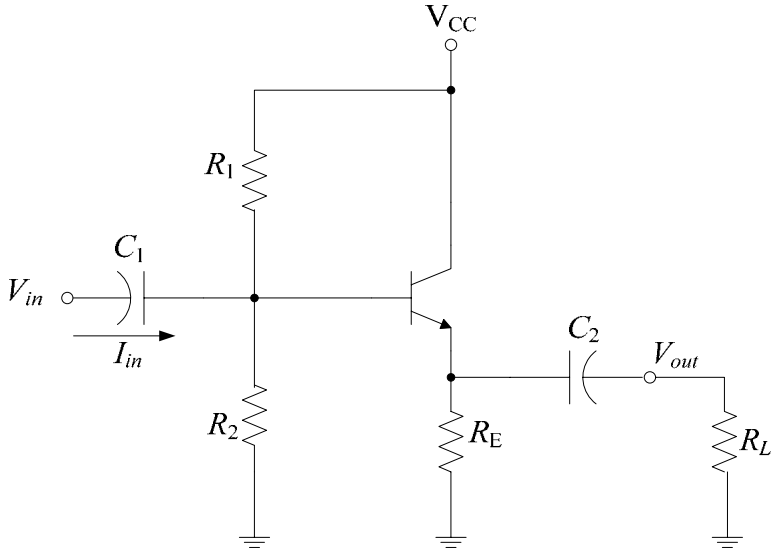
$$C_E = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2\pi \times 2\text{k} \times 56} = 1.42\,\mu\text{F}$$

مكبر المجمع المشترك

نوع آخر من المكبرات، هو مكبر المجمع المشترك Common Collector Amplifier. الدائرة موضحة في الشكل (٦-٤). ويلاحظ أن إشارة الخرج تُؤخذ عن طريق الباعث وليس عن طريق المجمع كما هو الحال في دائرة الباعث المشترك. وتُسمى الدائرة بتابع الباعث أيضاً نظراً لأن نسبة تكبير الجهد تساوي الوحدة تقريباً.

$$A_v \equiv 1$$

وبالتالي فإن قيمة جهد الخرج تساوي جهد الدخل. ولكن يُستخدم هذا المكبر في تكبير التيار.



الشكل (٦-٤) مكبر المجمع المشترك

وعند تحليل الدائرة نجد أن:

$$R_{out} = R_C \backslash\backslash R_L$$

$$R_{in(base)} = \beta_{ac} R_{out}$$

$$R_{in(tot)} = R_1 \backslash\backslash R_2 \backslash\backslash R_{in(base)}$$

ويمكن حساب نسبة كسب (تكبير) التيار Current Gain كالتالي:

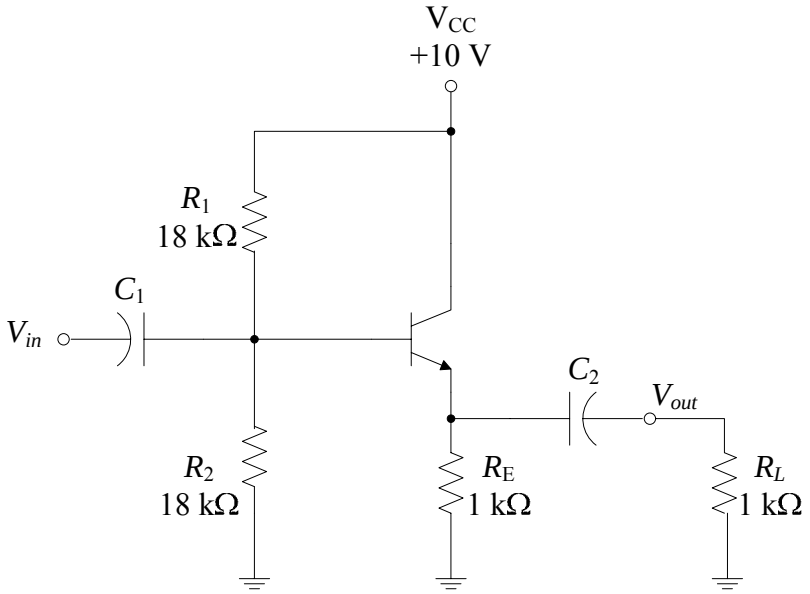
$$A_i = \frac{I_e}{I_{in}}$$

$$I_{in} = \frac{V_{in}}{R_{in(tot)}}$$

$$I_e \cong \frac{1\,\mathrm{V}}{R_{out}}$$

مثال (٦-٢)

أوجد نسبة تكبير التيار $\beta_{ac} = 175$ ؟



$$R_{out} = R_C \,\backslash\backslash\, R_L = \frac{1\,\text{k} \times 1\,\text{k}}{1\,\text{k} + 1\,\text{k}} = 500\,\Omega$$

$$R_{in(base)} = \beta_{ac} R_{out} = 175 \times 500 = 87.5\,\text{k}\Omega$$

$$R_{in(tot)} = R_1 \,\backslash\backslash\, R_2 \,\backslash\backslash\, R_{in(base)} = 8.16\,\text{k}\Omega$$

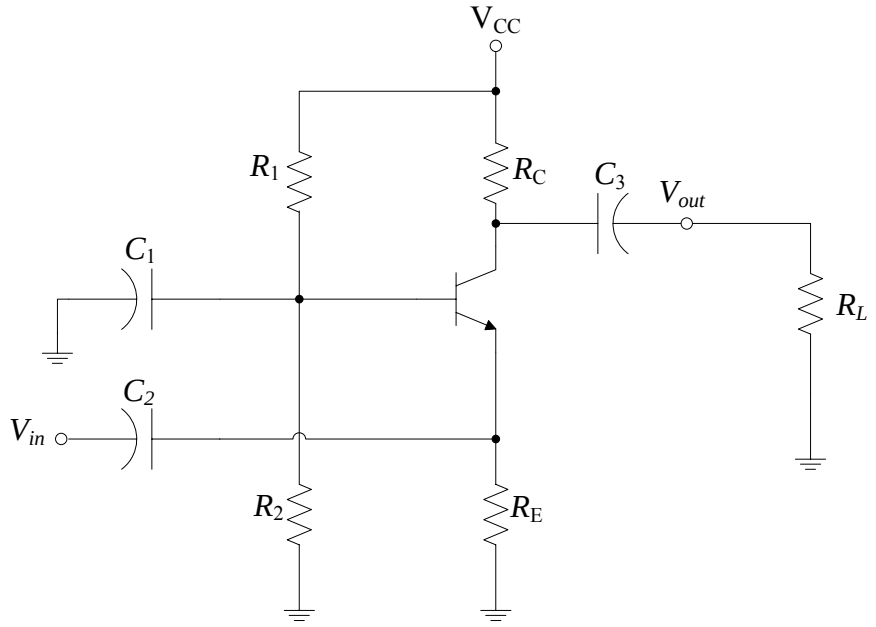
$$I_{in} = \frac{V_{in}}{R_{in(tot)}} = \frac{1}{8.16\,\text{k}} = 123\,\mu\text{A}$$

$$I_e \cong \frac{1\,\text{V}}{R_{out}} = \frac{1}{500} = 2\,\text{mA}$$

$$\therefore A_i = \frac{I_e}{I_{in}} = \frac{2\,\text{m}}{123\,\mu} = 16.3$$

مكبر القاعدة المشتركة

الشكل (٦-٥) يوضح دائرة مكبر القاعدة المشتركة Common Base Amplifier.



الشكل (٦-٥) مكبر القاعدة المشتركة

وبتحليل الدائرة نجد أن:

$$R_{out} = R_C \setminus\setminus R_L$$

$$A_v = \frac{R_{out}}{r_e'}$$

$$R_{in(emitter)} = r_e'$$

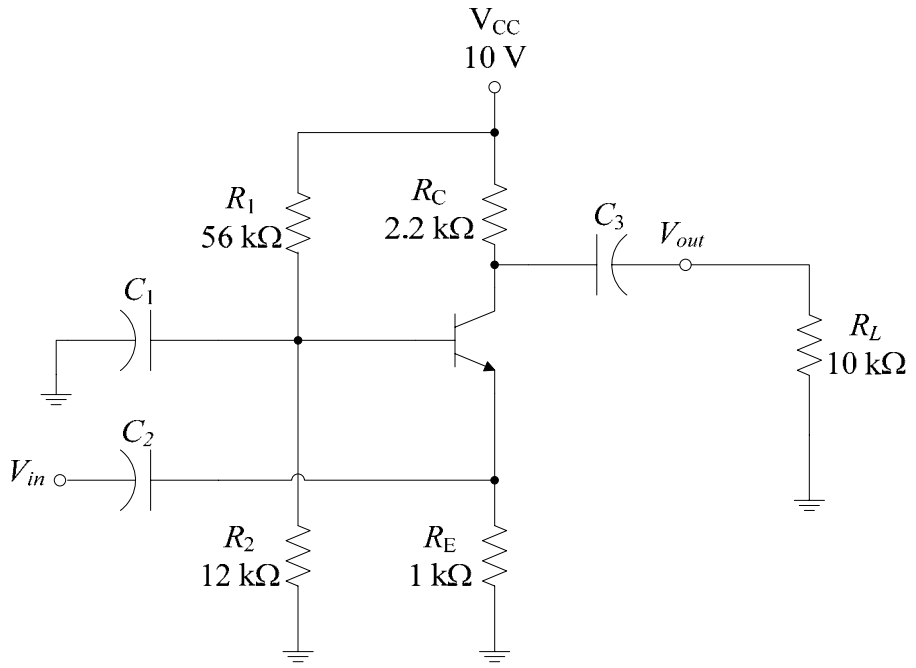
يتميز مكبر القاعدة المشتركة بوجود نسبة تكبير عالية للجهد كما في مكبر الباعث المشترك، ولكن نسبة تكبير التيار مساوية للوحدة تقريباً.

$$A_i \cong 1$$

وذلك نظراً لأن مقاومة الدخل صغيرة جداً r_e'. ويمكن استخدام هذا المكبر عندما تكون مقاومة خرج مصدر الإشارة المُراد تكبيرها صغيرةً جداً.

مثال (٦-٣):

احسب نسبة كسب الجهد ، علماً أن $\beta_{DC} = 250$



طالما أننا لا نعرف قيمة r_e' ، فيجب أولاً حساب I_E:

$$V_B \cong \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) V_{CC} = \left(\frac{5.6\,\text{k}}{10\,\text{k} + 5.6\,\text{k}}\right) 10 = 1.76\,\text{V}$$

$$I_E = \frac{V_E - V_{BE}}{R_E} = \frac{1.76 - 0.7}{1\,\text{k}} = 1.06\,\text{mA}$$

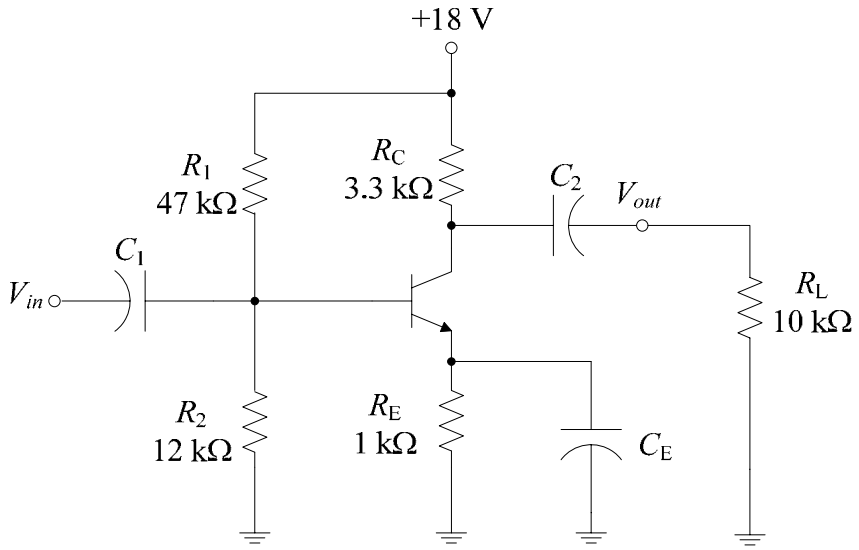
$$r_e' = \frac{25\,\text{mV}}{I_E} = \frac{25\,\text{m}}{1.06\,\text{m}} = 23.6\,\Omega$$

$$R_{out} = R_C \,\backslash\backslash\, R_L = \frac{2.2\,\text{k} \times 10\,\text{k}}{2.2\,\text{k} + 10\,\text{k}} = 1.8\,\text{k}\Omega$$

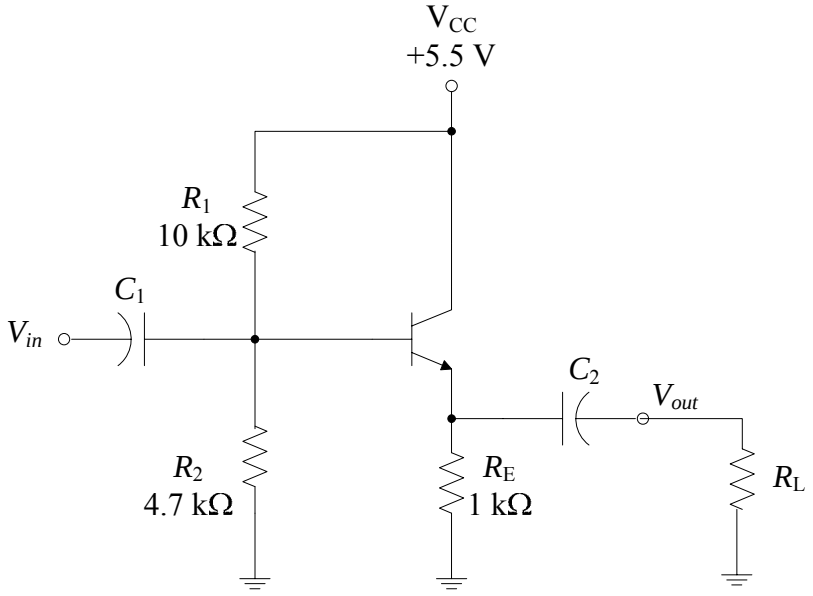
$$\therefore A_v = \frac{R_{out}}{r_e'} = \frac{1.8\,\text{k}}{23.6} = 76.3$$

مسائل

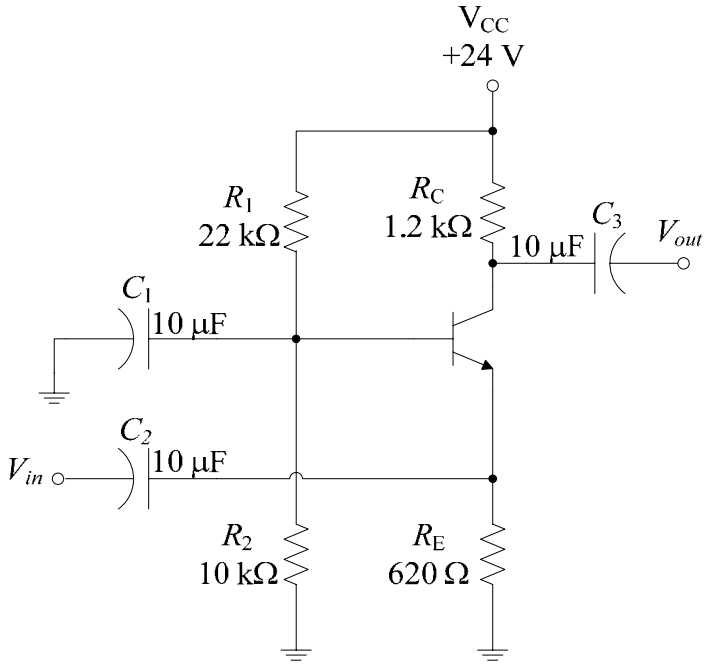
١. من دائرة مكبر الباعث المشترك الموضحة بالشكل، احسب : R_{in} , R_{out}, A_v. علماً بأن $\beta_{DC} = 75$ و $\beta_{ac} = 70$.



٢. أوجد قيمة كل من R_{in}, R_{out}, A_i لمكبر المجمع المشترك الموضح في الشكل.



٣. أوجد A_v, R_{out}, $R_{in(emitter)}$ للمكبر الموضح في الشكل.

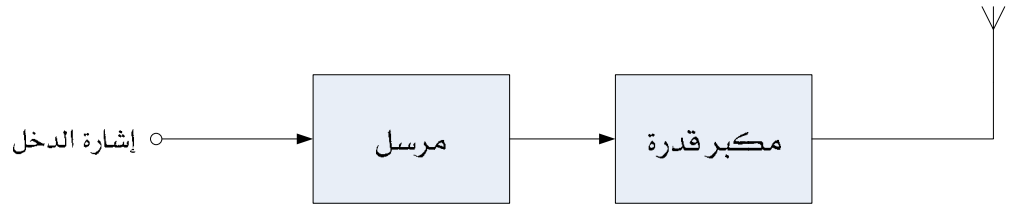


الإلكترونيات

مكبرات القدرة

الوحدة السابعة: مكبرات القدرة
Power Amplifiers

لإرسال إشارة لاسلكية عن طريق الهوائي إلى مسافة طويلة، فإننا نحتاج إلى تكبير قدرتها حتى تستطيع قطع هذه المسافة. فكلما زادت القدرة، زادت المسافة التي تقطعها الإشارة. فعلى سبيل المثال، المحطات الأرضية التي تتصل بالأقمار الصناعية. لذلك فإننا نحتاج إلى مكبرات قدرة مناسبة كمرحلة أخيرة قبل الهوائي في دوائر الإرسال كما في الشكل (٧-١).

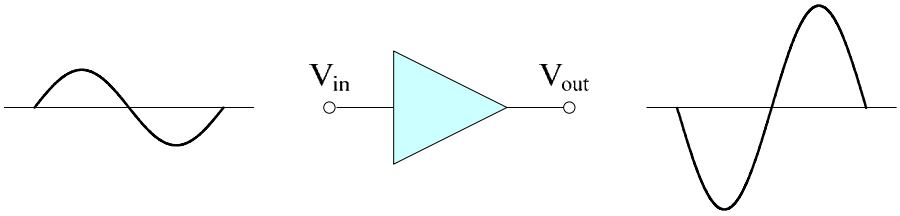


الشكل (٧-١) مكبر القدرة في دوائر الإرسال

وتصنف مكبرات القدرة حسب نسبة موجة الدخل والتي يعمل خلالها المكبر بصورة خطية.

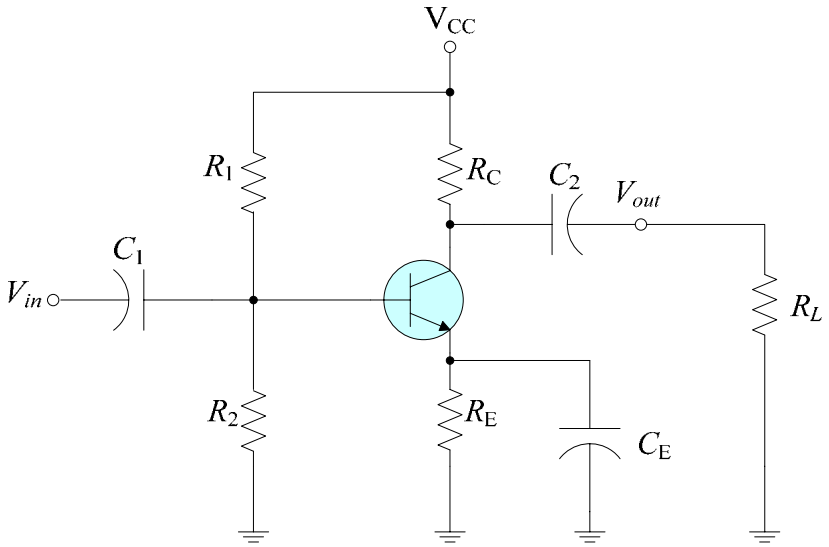
مكبرات القدرة عائلة (أ) Class A Power Amplifier

يعمل هذا المكبر في الحالة الخطية خلال جميع فترات موجة الدخل كما في الشكل (٧-٢). ولهذا يُسمى بمكبر القدرة عائلة (أ).



الشكل (٧-٢) موجة الدخل وموجة الخرج

هذا المكبر موضح في الشكل (٧-٣). وهو عبارة عن مكبر الباعث المشترك الذي سبق دراسته.



الشكل (٧- ٣) مكبر قدرة من عائلة (أ)

حيث إن:

$$R_{in(base)} = \beta_{ac} r_e'$$

$$R_{in(tot)} = R_1 \backslash\backslash R_2 \backslash\backslash R_{in(base)}$$

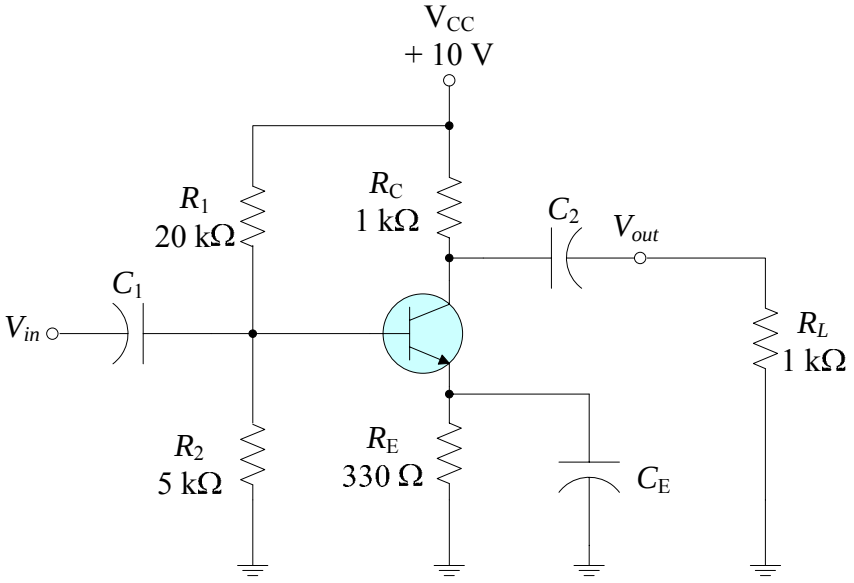
$$A_v = \frac{R_{out}}{r_e'}$$

وتكون نسبة تكبير القدرة هي:

$$A_P = A_v^2 \left(\frac{R_{in}}{R_{out}} \right)$$

مثال (٧-١)

احسب كسب الجهد وكذلك كسب القدرة لمكبر القدرة عائلة (أ) علماً بأن $\beta_{ac} = 200$



يجب حساب r_e' أولاً لإيجاد كسب الجهد:

$$V_B \cong \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) V_{CC} = \left(\frac{5\,\text{k}}{20\,\text{k} + 5\,\text{k}}\right) 15 = 3\ \text{V}$$

$$I_E = \frac{V_B - V_{BE}}{R_E} = \frac{3 - 0.7}{330} = 7\ \text{mA}$$

$$r_e' = \frac{25\,\text{mV}}{I_E} = \frac{25\,\text{m}}{7\,\text{m}} = 3.57\,\Omega$$

$$R_{out} = R_C \,\backslash\backslash\, R_L = 1\text{k} \,\backslash\backslash\, 1\text{k} = 500\,\Omega$$

$$\therefore A_v = \frac{R_{out}}{r_e'} = \frac{500}{3.75} = 133.33$$

حساب كسب القدرة:

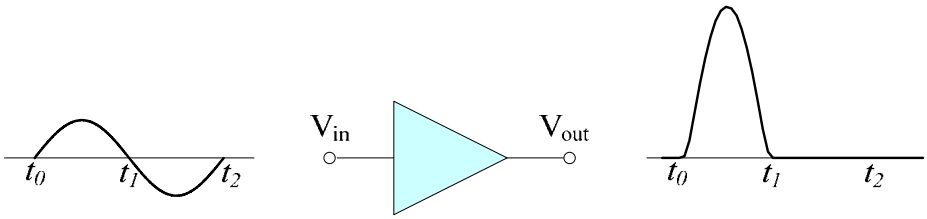
$$R_{in(base)} = \beta_{ac} r_e^{'} = 200 \times 3.75 = 750\,\Omega$$

$$R_{in(tot)} = R_1 \backslash\backslash R_2 \backslash\backslash R_{in(base)} = 20\,\text{k} \backslash\backslash 5\,\text{k} \backslash\backslash 750 = 631.58\,\Omega$$

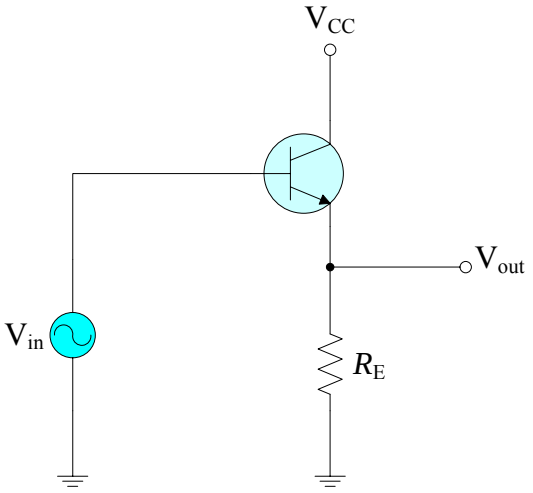
$$\therefore A_P = A_v^2 \left(\frac{R_{in}}{R_{out}} \right) = 133.33^2 \left(\frac{631.58}{500} \right) = 22455$$

مكبرات القدرة عائلة (ب) وعائلة (أ-ب) Class B and AB Power Amplifier

الشكل (٧-٤) يوضح دائرة مكبر القدرة عائلة (ب)، وهذا المكبر يكبر فقط النصف الأول من موجة الدخل. ولذا سُمي بعائلة (ب) كما في الشكل (٧-٥).

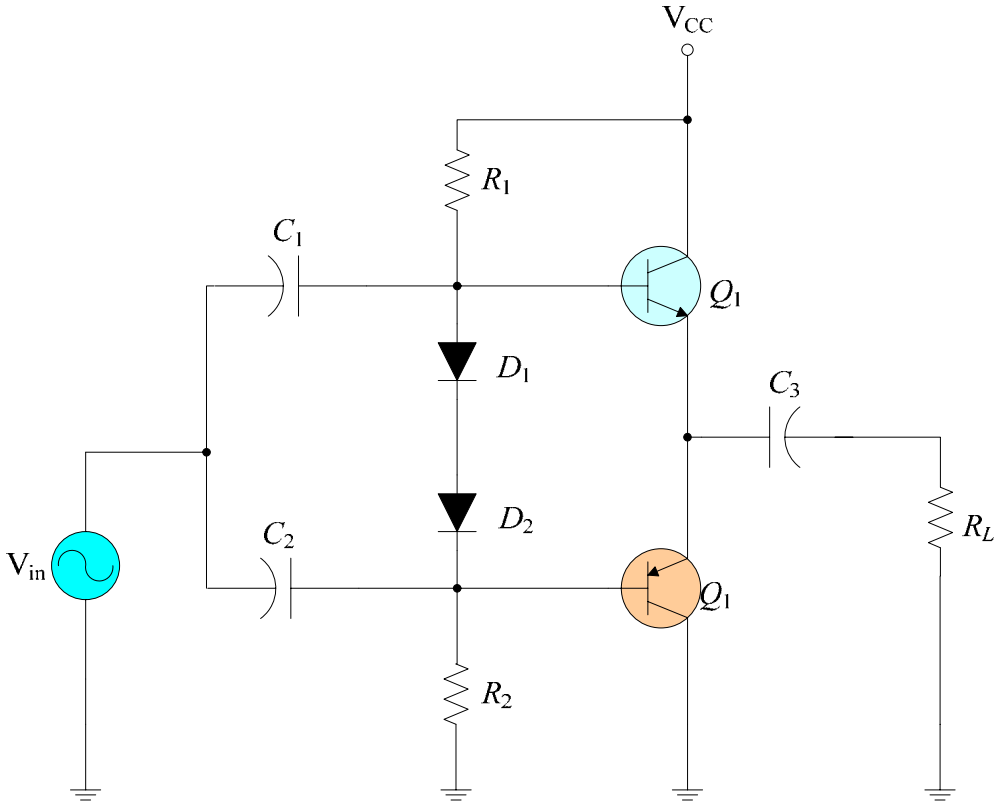


الشكل (٧-٤) أشكال الموجات



الشكل (٧-٥) دائرة مكبر القدرة عائلة (ب)

فإذا أردنا أن يكبر النصف الآخر من إشارة الدخل، فإننا نضيف مكبراً آخر من نفس النوع. ويُسمى هذا النوع بمكبر الدفع والجذب Push-Pull Amplifier أو مكبر من عائلة (أ-ب) كما في الشكل (٧-٦).



الشكل (٧-٦) مكبر الدفع والجذب للقدرة

ويقوم الترانزستور Q_1 بالتوصيل خلال النصف الموجب، ويقوم الترانزستور Q_2 بالتوصيل خلال النصف السالب من إشارة الدخل. ويُستخدم الموحدان D_1 و D_2 والمقاومتان R_1 و R_2 لانحياز الترانزستور. وتكون قيم المقاومات متساوية. ويحسب مقدار تكبير القدرة كالتالي:

$$P_{out} = \frac{1}{4} I_{C(sat)} V_{CC}$$

حيث إن:

$$I_{C(sat)} = \frac{0.5 V_{CC}}{R_L}$$

وبالتعويض عن قيمة $I_{C(sat)}$ في قانون القدرة، فإن:

$$P_{out} = \frac{1}{8}\frac{V_{CC}^2}{R_L}$$

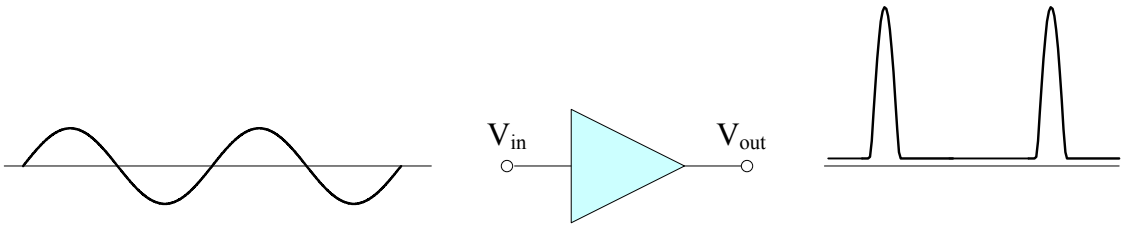
مثال (٧-٢):

احسب قيمة قدرة الخرج لدائرة مكبر القدرة عائلة (أب) إذا كان $V_{CC} = 20$ V و قيمة مقاومة الحمل $8\ \Omega$

$$P_{out} = \frac{1}{8}\frac{V_{CC}^2}{R_L} = \frac{20^2}{8\times 8} = 6.25\ \text{w}$$

مكبر القدرة عائلة (ج) Class C Power Amplifier

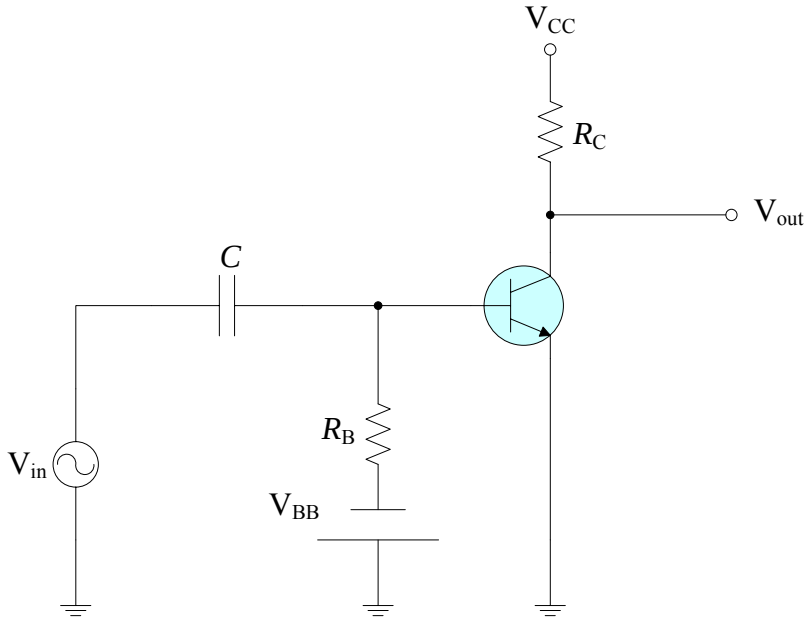
الشكل (٧-٧) يوضح مكبر القدرة عائلة (ج).



الشكل (٧-٧) أشكال الموجات

وهذا المكبر يقوم بتكبير جزء من النصف الموجب لموجة الدخل وذلك عندما يتعدى جهد الدخل حاصل جمع V_{BB} و V_{BE} كما في الشكل (٧-٨). أي عندما يكون:

$$V_{in} > V_{BB} + V_{BE}$$



الشكل (٧-٨) دائرة مكبر القدرة عائلة (ج)

ويمكن حساب قيمة تكبير القدرة كما يلي:

$$P_{out} = \frac{0.5V_{CC}^2}{R_{out}}$$

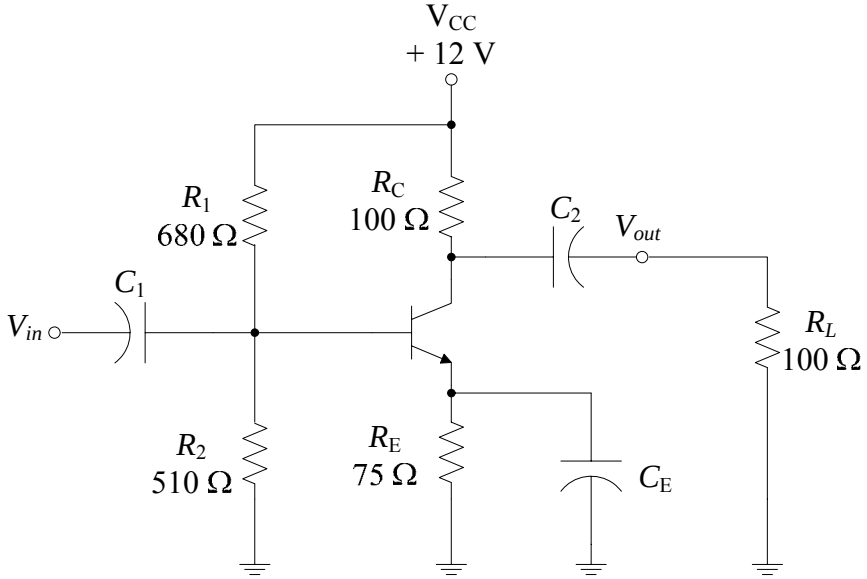
مثال (٧-٣):

أوجد قيمة قدرة الخرج لمكبر من العائلة (ج) إذا كان $V_{CC} = 24$ V و قيمة مقاومة الخرج $100\ \Omega$

$$P_{out} = \frac{0.5V_{CC}^2}{R_{out}} = \frac{0.5 \times 24^2}{100} = 2.88 \text{ w}$$

مسائل

١. احسب كسب الجهد وكذلك كسب القدرة لمكبر القدرة عائلة (أ) علماً بأن $\beta_{ac} = 200$



٢. احسب قيمة قدرة الخرج لدائرة مكبر القدرة عائلة (أب) إذا كان $V_{CC} = 24$ V و قيمة مقاومة الحمل 75 Ω

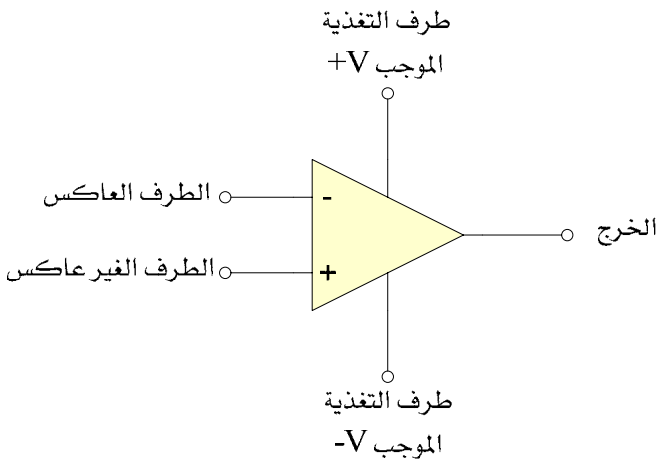
٣. أوجد قيمة قدرة الخرج لمكبر من العائلة (ج) إذا كان $V_{CC} = 24$ V و قيمة مقاومة الخرج 75 Ω

الإلكترونيات

مكبرات العمليات

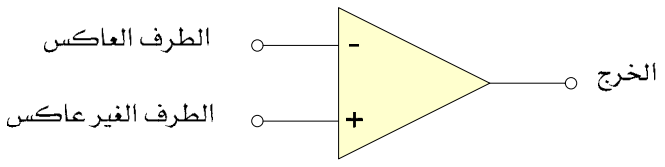
الوحدة الثامنة: مكبرات العمليات
Operational Amplifiers

مكبرات العمليات Op-Amp من العناصر الإلكترونية المشهورة جداً والتي لها استخدامات كثيرة عديدة وخاصة في إجراء بعض الوظائف الحسابية. حيث يمكن إجراء عملية جمع وطرح الإشارات، وكذلك إجراء عملية التكامل والتفاضل عليها. فهي تُستخدم في دوائر التحكم بكثرة. الشكل (٨-١) يوضح رمز مكبر العمليات. ومن أشهر أنواع مكبرات العمليات المكبر 741



الشكل (٨-١) رمز مكبر العمليات

لمكبر العمليات طرفان للدخل: طرف عاكس Inverting Input وطرف غير عاكس Non-inverting Input. كذلك له طرف للخرج. ولكي يعمل المكبر، فلا بد من تغذيته بمصدري جهد مستمر V+ و V- فمثلاً يمكن تغذيته بـ 15V+ و 15V- . ولكون أن تغذية المكبر ضرورية ولا بد منها، فيرمز له بالرمز الذي في الشكل (٨-٢) وبدون الإشارة إلى أطراف التغذية.



الشكل (٨-٢) رمز مكبر العمليات بدون مصدري التغذية

خصائص مكبر العمليات

لمكبر العمليات عدة خصائص منها:

١. أن ممانعة الدخل كبيرة جداً. وهذا يعني أن التيارات الداخلة تقترب قيمها من الصفر.
٢. أن ممانعة الخرج صغيرة جداً.
٣. أن نسبة تكبير الجهد عالية جداً، تصل إلى 10^5

التغذية العكسية السالبة Negative Feedback

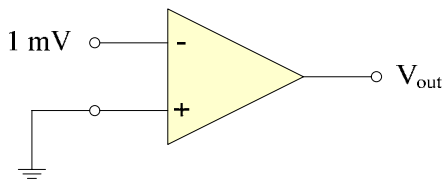
في حالة توصيل المكبر كما في الشكل (٨-٣)، فإن هذه الطريقة تُسمى توصيلة المسار المفتوح Open Loop. وتكون نسبة التكبير هي:

$$A_{OL} = 10^5$$

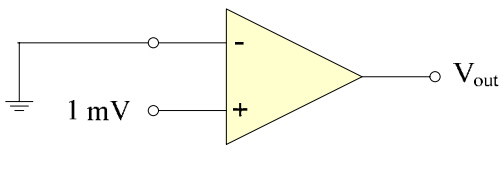
وهذا يعني أن خرج المكبر سيكون متشبعاً ولن يتعدى قيمة مصدر التغذية، حتى وإن كان الدخل ضئيلاً جداً. فإذا كان الدخل موصلاً بالطرف العاكس، فإن جهد الخرج يساوي قيمة V– وإن كان الدخل موصلاً بالطرف غير العاكس، فإن الخرج يساوي قيمة V+

مثال (٨- ١)

احسب قيمة جهد الخرج، علماً بأن $\pm V = \pm 15\ V$



(أ)



(ب)

(أ)قيمة جهد الخرج:

$$V_{out} = A_{OL} V_{in} = 10^5 \times 1\,m = -100\ V$$

كما أسلفنا، فإن قيمة الخرج لايمكن أن تتعدى مصدر التغذية V- فالمكبر في حالة تشبع. ولذلك فإن القيمة العملية لجهد الخرج هي:

$$V_{out} = -13\ \text{V}$$

ويستهلك المكبر 2V أثناء تشغيله. وإشارة الناقص لأن الدخل على الطرف العاكس.

(ب)قيمة جهد الخرج:

$$V_{out} = A_{OL}V_{in} = 10^5 \times 1\,\text{m} = 100\ \text{V}$$

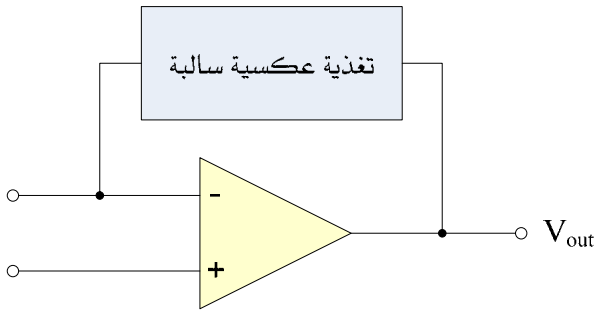
فقيمة الخرج لايمكن أن تتعدى مصدر التغذية V+. فالمكبر في حالة تشبع. ولذلك فإن القيمة العملية لجهد الخرج هي:

$$V_{out} = +13\ \text{V}$$

وإشارة الموجب لأن الدخل على الطرف غير العاكس.

لذلك، إذا أردنا أن نتحكم في نسبة التكبير ونضبطها حسب الحاجة، فلا بد من توصيل تغذية عكسية سالبة من الخرج إلى الدخل، والتي من فوائدها استقرارية النظام والتحكم به. وتكون الدائرة في حالة توصيل المسار المغلق Close Loop. فإذا تم توصيل الخرج بالطرف العاكس من الدخل، سُميت بالتغذية العكسية السالبة. وإذا تم توصيل الخرج بالطرف غير العاكس من الدخل، سُميت بالتغذية العكسية الموجبة والتي تتسبب في ذبذبة وعدم استقرارية النظام.

فالتغذية العكسية السالبة هي المطلوبة، وتوصل كما في الشكل (٨-٤). ويرمز لنسبة التكبير بالرمز A_{CL}

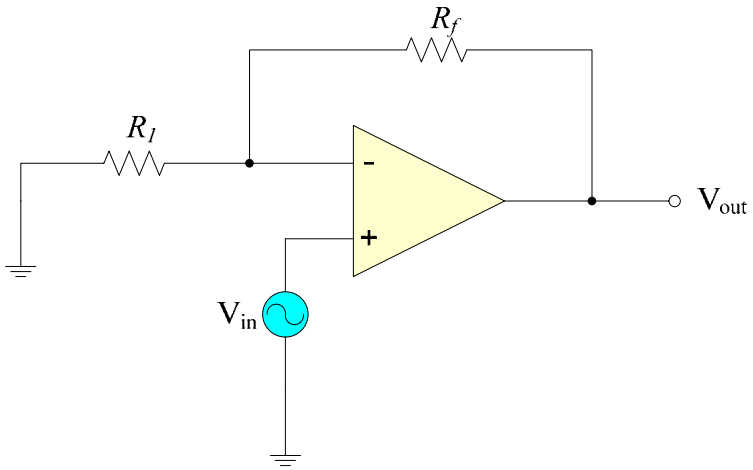


الشكل (٨-٤) توصيل التغذية العكسية السالبة

وتوجد عدة تطبيقات لهذه الحالة:

١. المكبر غير العاكس

يمكن تصميم مكبر غير عاكس، وذلك بتوصيل مكبر العمليات كما في الشكل (٨-٥).



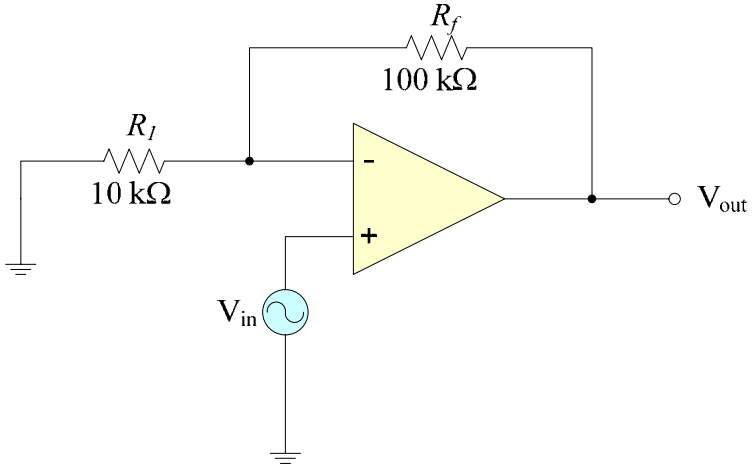
الشكل (٨-٥) المكبر غير العاكس

وكما هو ملاحظ وجود تغذية عكسية سالبة. وكذلك فإن إشارة الدخل متصلة بالطرف غيرالعاكس.
ولذلك سُمي بالمكبر غير العاكس حيث إن إشارة الدخل وإشارة الخرج لهما نفس الإشارة.
ويمكن حساب نسبة التكبير حسب القانون التالي:

$$A_{CL} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

مثال (٨-٢):

حدد قيمة كسب الجهد للمكبر غير العاكس:



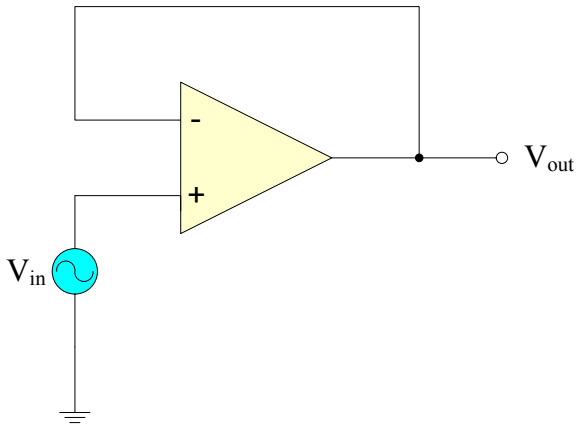
$$A_{CL} = 1 + \frac{R_f}{R_1} = 1 + \frac{100\,\text{k}}{10\,\text{k}} = 11$$

٢. تابع الجهد Voltage Follower

تابع الجهد هو مكبر نسبة تكبيره تساوي الوحدة.

$$A_{CL} = 1$$

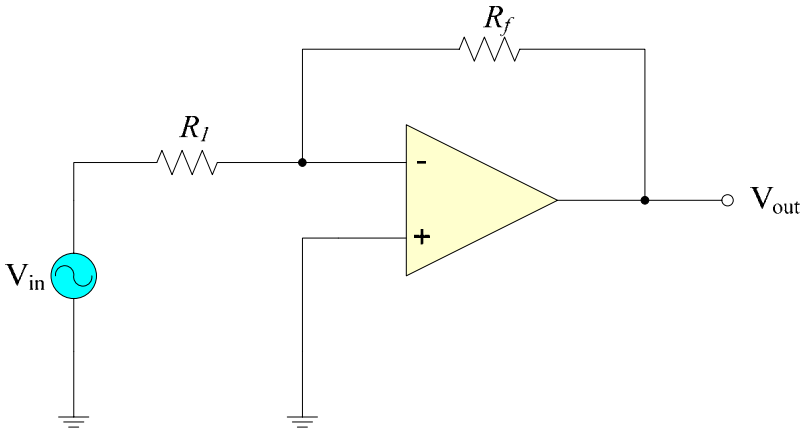
وتابع الجهد ما هو إلا المكبر غير العاكس ولكن تم جعل الحد $\frac{R_f}{R_1}$ من معادلة كسب الجهد يساوي صفراً. وللوصول لهذه النتيجة، جعلنا قيمة $R_f = 0$ وألغينا المقاومة R_1 لكون قسمة صفر على أي قيمة، فالنتيجة صفر. الشكل (٨-٦) يوضح الدائرة بعد التعديل.



الشكل (٨-٦) تابع الجهد

٣. المكبر العاكس Inverting Amplifier

المكبر العاكس من أهم الأنواع لاستخداماته الكثيرة. والشكل (٨-٧) يوضح شكل المكبر العاكس.



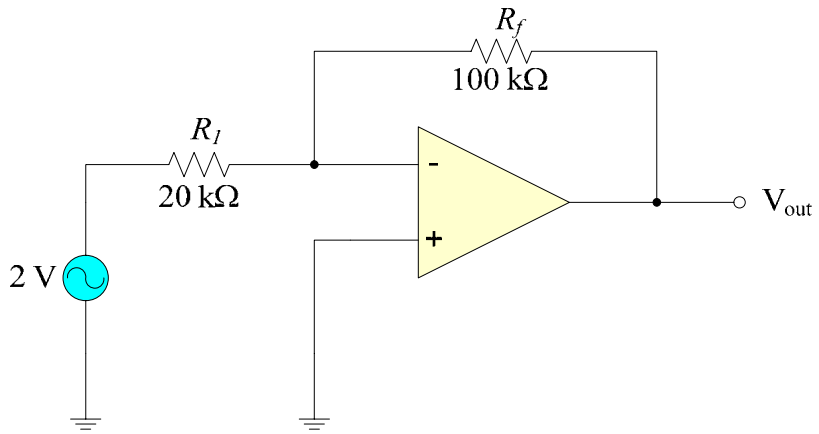
الشكل (٨-٧) المكبر العاكس

ويلاحظ وجود التغذية العكسية السالبة. وكذلك فإن جهد الدخل متصل بالطرف العاكس من المكبر. ويمكن حساب نسبة التكبير حسب القانون:

$$A_{CL} = -\frac{R_f}{R_1}$$

مثال (٨-٣)

ما هي قيمة جهد الخرج؟



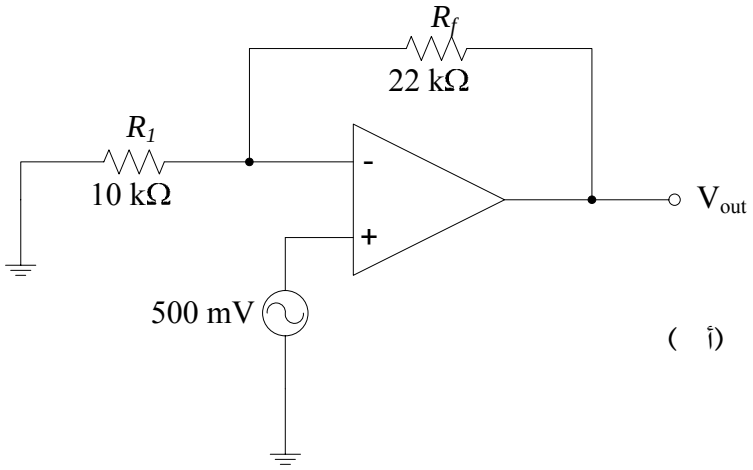
$$A_{CL} = -\frac{R_f}{R_1} = -\frac{100\,\text{k}}{20\,\text{k}} = -5$$

$$A_{CL} = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

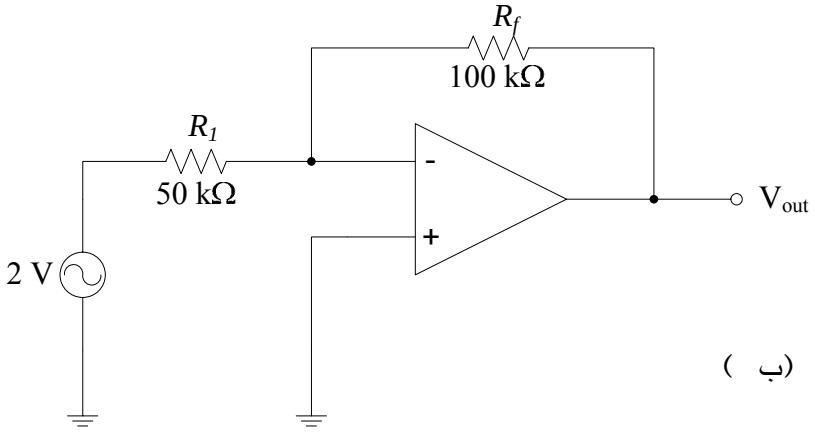
$$\therefore V_{out} = A_{CL} V_{in} = -5 \times 2 = -10\ \text{V}$$

مسائل

١. أوجد نسبة التكبير، وكذلك قيمة جهد الخرج للمكبرات التي في الشكل:



(أ)



(ب)

٢. صمم مكبراً غير عاكس له نسبة تكبير تساوي 20

٣. صمم مكبراً عاكساً له نسبة تكبير تساوي 10-

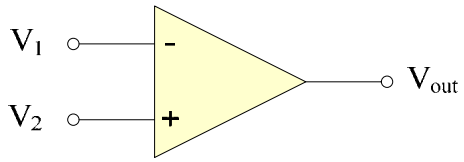
الإلكترونيات

تطبيقات مكبرات العمليات

الوحدة التاسعة : تطبيقات مكبرات العمليات
Op-Amp Applications

المقارن Comparator

المقارن عبارة عن تطبيق باستخدام مكبر العمليات حيث تقوم الدائرة بالمقارنة بين جهدي الدخل. فدائرة المقارن كما في الشكل (٩-١) عبارة عن مكبر عمليات في حالة المسار المفتوح ولا توجد تغذية عكسية سالبة.



الشكل (٩-١) المقارن

ويعمل المقارن حسب المبدأ التالي:

الدخل	الخرج
$V_1 > V_2$	$V_{out} = -V$
$V_2 > V_1$	$V_{out} = +V$

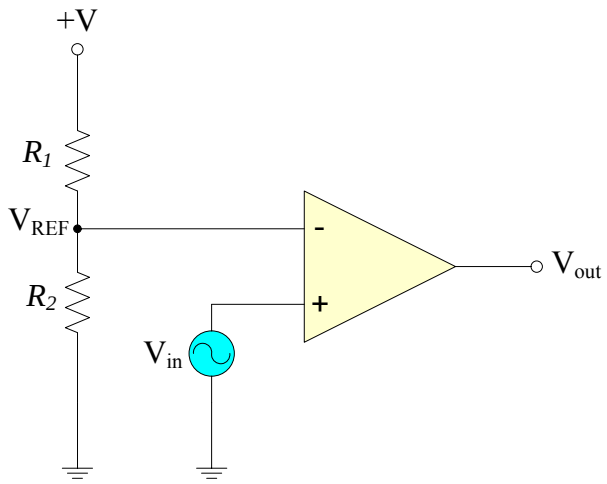
حيث إن V_1 هو الجهد المتصل بالطرف العاكس، و V_2 هو الجهد المتصل بالطرف غير العاكس.

مثال (٩-١):

هذه بعض حالات جهد الخرج والناتجة عن حالات مختلفة لجهود الدخل، علماً بأن تغذية المقارن هي ± 15 V

V_{out}	V_2	V_1
- 13 V	0 V	1 mV
- 13 V	-3 V	-1 V
+ 13 V	0 V	-1 V
+ 13 V	3 V	2 V
+ 13 V	4 V	3.999 V

ومن أشهر طرق المقارنة، استخدام توزيع الجهد على مقاومتين كما في الشكل (٩-٢).



الشكل (٩-٢) المقارن مع دائرة توزيع الجهد

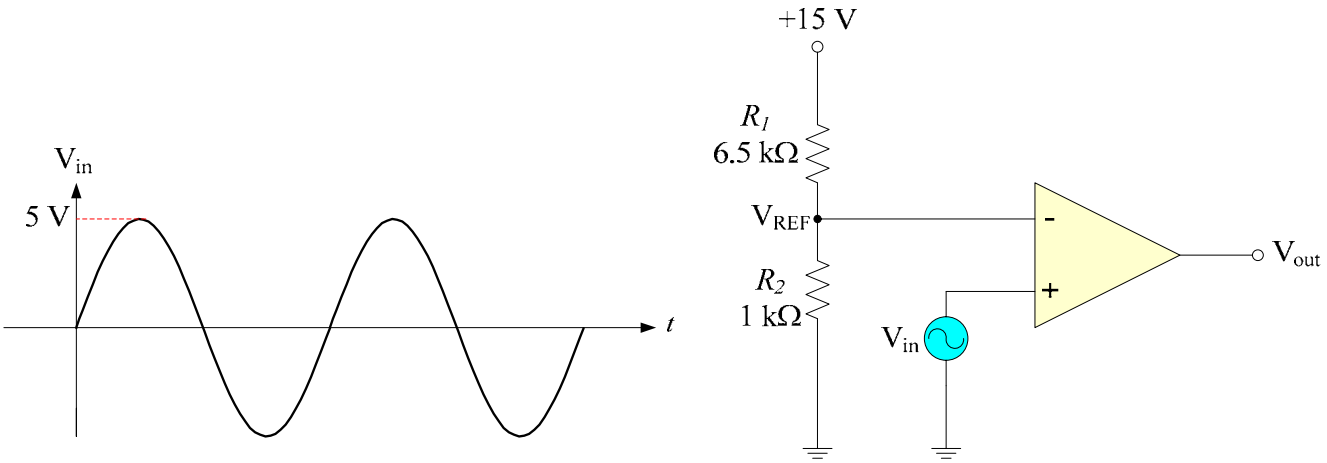
ويمكن ضبط القيمة المراد مقارنتها عن طريق ضبط جهد المرجع V_{REF} والذي يمكن ضبطه عن طريق قانون موزع الجهد:

$$V_{REF} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)(+V)$$

ويمكن استبدال المقاومة R_2 بمقاومة متغيرة وذلك للتحكم في قيمة V_{REF} بسهولة.

مثال (٩-٢)

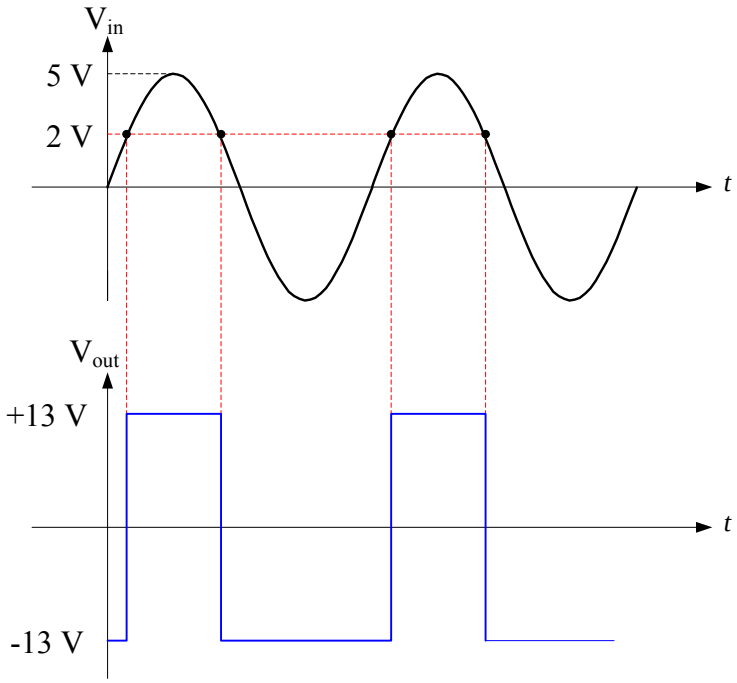
ارسم موجة خرج المقارن الموضح بالشكل.



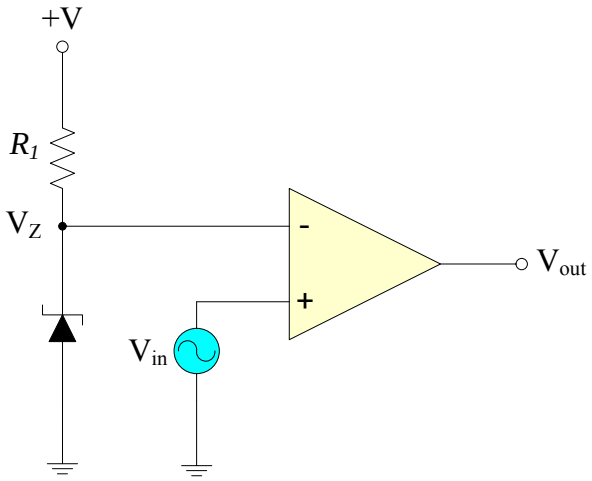
أولاً نحسب قيمة جهد المرجع:

$$V_{REF} = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right)(+V) = \left(\frac{1\,\text{k}}{1\,\text{k} + 6.5\,\text{k}}\right)15 = 2\ \text{V}$$

أي إنه كلما قل جهد الدخل عن 2 V فإن الخرج يكون 13 V- وإذا زاد عن 2 V فإن الخرج يتحول إلى 13 V+ ويكون شكل موجة الخرج كالتالي:



وأذا أردنا أن نثبت جهد المرجع، فإننا نستخدم دايود زينر حسب قيمة الجهد المطلوبة كما في الشكل (٩-٣).



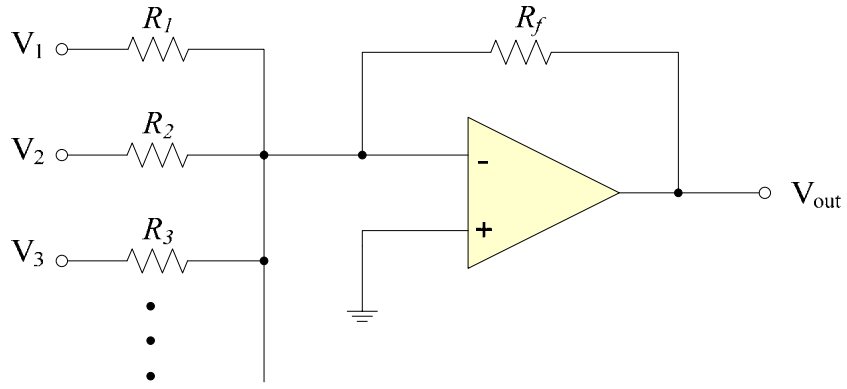
الشكل (٩-٣) الزينر لتثبيت جهد المرجع

المكبر الجامع Summing Amplifier

المكبر الجامع عبارة عن مكبر عاكس له عدة مداخل. ويمكن معاملة كل مدخل على حدة على أنه مكبر عاكس مستقل. فالشكل (٩-٤) يوضح شكل المكبر الجامع ويكون كسب الجهد له كالآتي:

$$A_{CL} = -\frac{R_f}{R_1}V_1 - \frac{R_f}{R_2}V_2 - \frac{R_f}{R_3}V_3 - \dots$$
$$= -R_f\left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V_2}{R_2} + \frac{V_3}{R_3} + \dots\right)$$

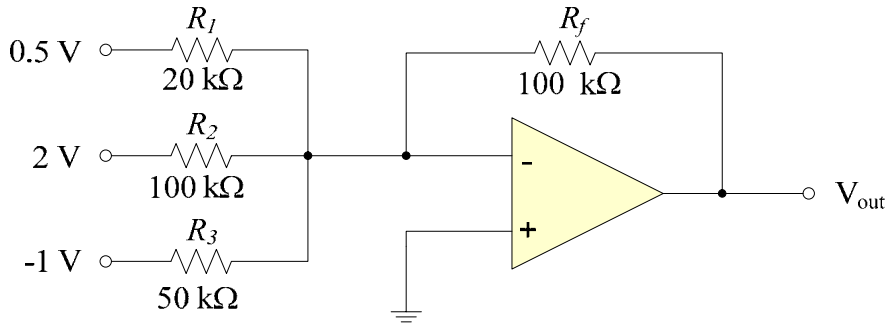
ويمكننا تحديد نسبة تكبير كل مدخل، ثم جمع جميع القيم مع بعضها البعض حسب إشاراتها.



الشكل (٩-٤) المكبر الجامع

مثال (٩-٣)

أوجد نسبة تكبير كل مدخل على حدة، ثم أوجد قيمة جهد الخرج.



$$A_{CL_1} = -\frac{R_f}{R_1} = -\frac{100\,\text{k}}{20\,\text{k}} = -5$$

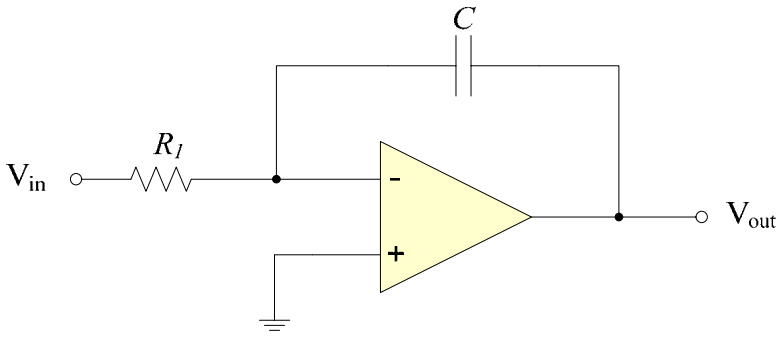
$$A_{CL_2} = -\frac{R_f}{R_2} = -\frac{100\,\text{k}}{100\,\text{k}} = -1$$

$$A_{CL_3} = -\frac{R_f}{R_3} = -\frac{100\,\text{k}}{50\,\text{k}} = -2$$

$$V_{out} = (-5 \times 0.5) + (-1 \times 2) + (-2 \times -1) = -2.5\ \text{V}$$

مكبر التكامل Op-Amp Integrator

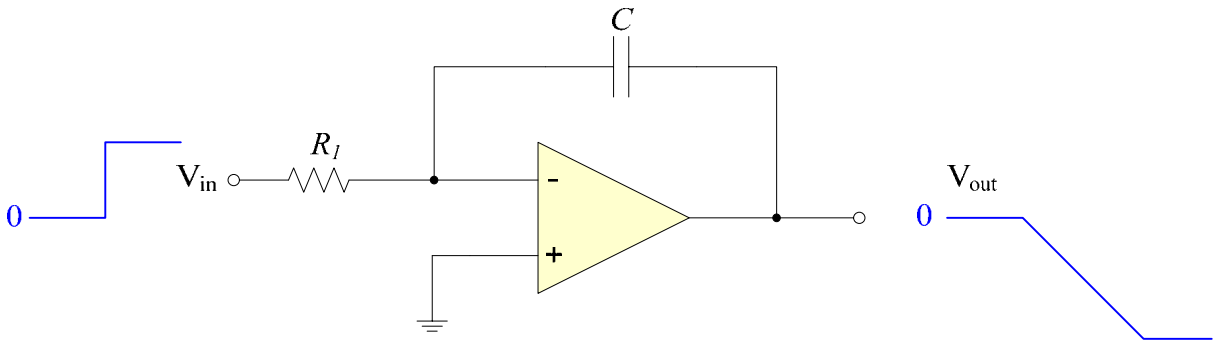
مكبر التكامل يقوم بعملية التكامل الرياضية، حيث يقوم بحساب المساحة التي تحت المنحنى. فالشكل (٩-٥) يوضح دائرة المكامل باستخدام مكبر العمليات. والدائرة عبارة عن مكبر عاكس ولكن يوجد مكثف في التغذية العكسية السالبة.



الشكل (٩-٥) دائر المكامل

فإذا أدخلنا جهداً مستمراً والذي يمثل رقماً ثابتاً رياضياً، فناتج التكامل عبارة عن خط مائل كما في الشكل (٩-٦). وبذلك يمكن تحويل الموجة المربعة إلى موجة مثلثة. ويكون معدل التغير في الخرج هو:

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

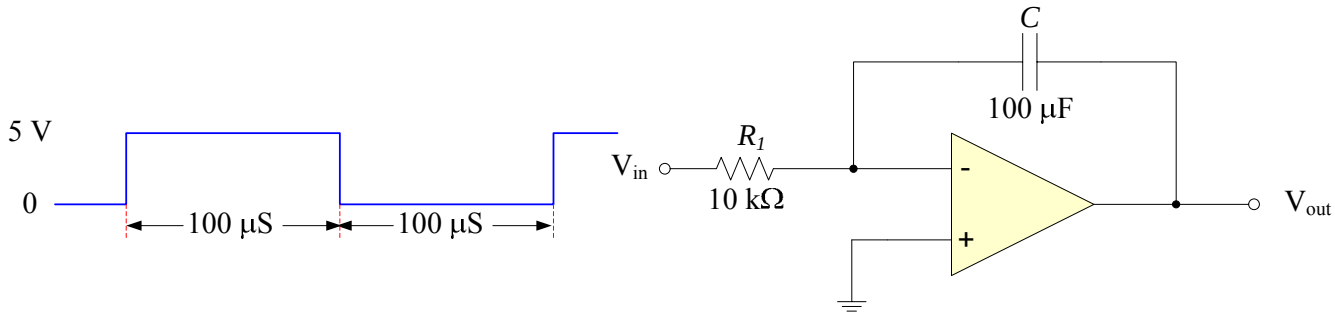


الشكل (٩-٦) تكامل قيمة ثابتة يعطي خطاً مائلاً

وإشارة السالب لأنه مكبر عاكس، قيمة الثابت الزمني والمحدد بالمقاومة R و المكثف C تتحكم في ميلان موجة الخرج. كلما كان حاصل ضربهما صغيراً كان النزول أو الصعود سريعاً، والعكس صحيح.

مثال (٩-٤)

ارسم موجة الخرج لدائرة المكامل.



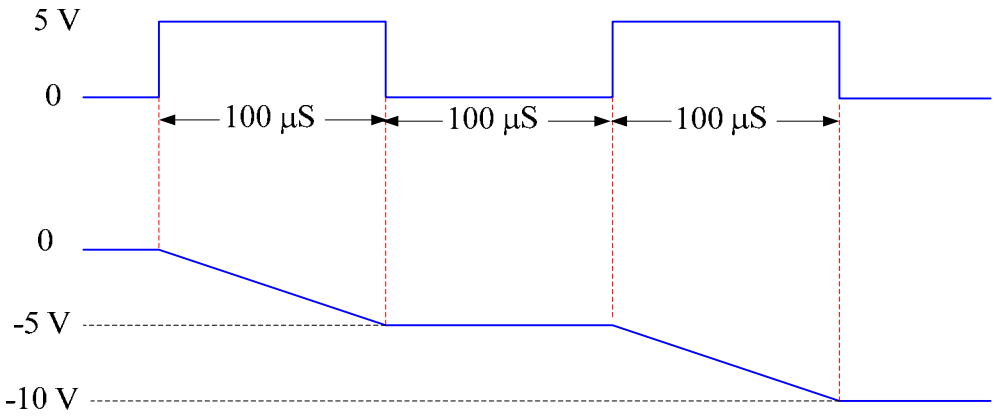
يجب أولاً حساب قيمة جهد الخرج التي يصل إليها:

$$\frac{\Delta V_{out}}{\Delta t} = -\frac{V_{in}}{RC} = -\frac{5}{10\,\text{k} \times 0.01\,\mu} = -50\ \text{kV}/\mu\text{s}$$

أي إن معدل ميلان النزول هو 50 kV لكل $1\mu s$. وبالتالي فإن النزول لمدة 100 µs هو:

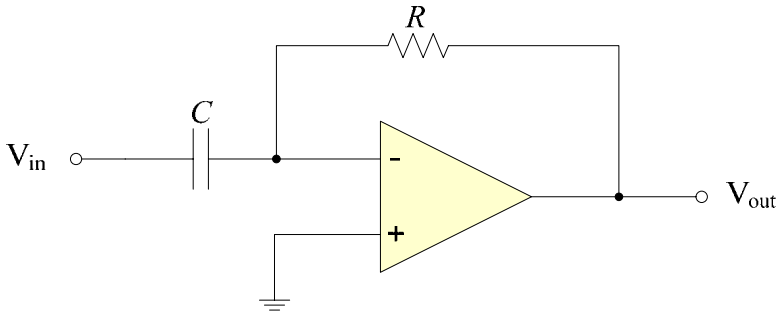
$$\Delta V_{out} = -50\,\text{k} \times 100\,\mu = -5\ \text{V}$$

ويكون شكل موجة الخرج:



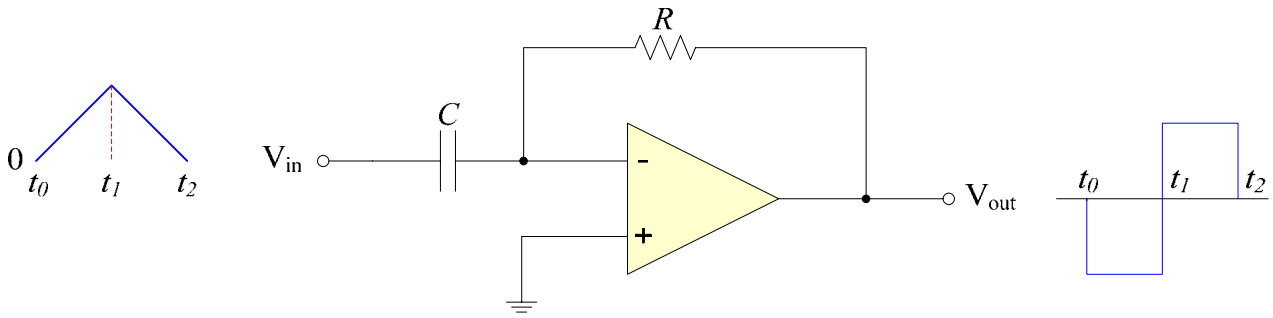
مكبر التفاضل Op-Amp Differentiator

مكبر التفاضل يقوم بعملية التفاضل الرياضية، حيث يقوم بإيجاد ميل المنحنى. فالشكل (٩-٧) يوضح دائرة المفاضل باستخدام مكبر العمليات. والدائرة عبارة عن مكبر عاكس مع مكثف عند دخل الإشارة بدلاً من المقاومة.



الشكل (٩-٧) المفاضل

فإذا كان الدخل عبارة عن خط مستقيم بميلان معين، فإن ناتج التفاضل هو رقم ثابت يعبر عن مقدار الميلان. ولذلك يمكن استخدام المفاضل في تحويل الموجة المثلثة إلى موجة مربعة كما في الشكل (٩-٨).



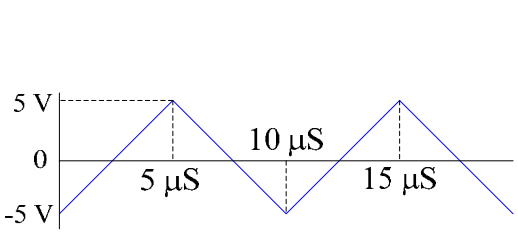
الشكل (٩-٨) تفاضل خط مائل يعطي خطاً مستقيماً

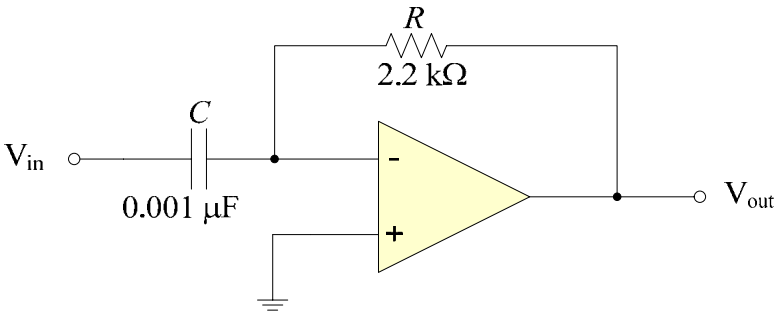
ويُعبر عن قيمة جهد الخرج بالمعادلة التالية:

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

مثال (٩-٥)

ارسم موجة الخرج لدائرة المفاضل التالية:





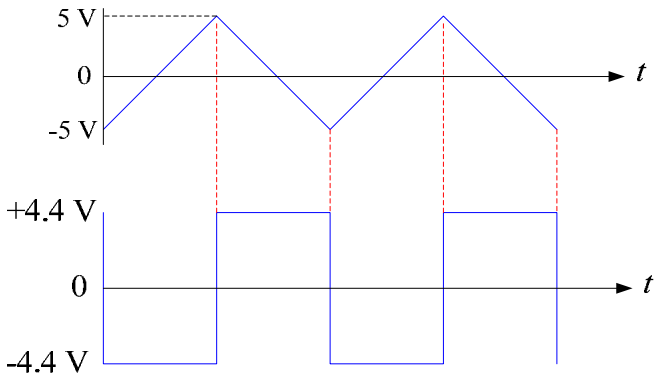
أولاً نوجد قيمة جهد الخرج في حالة الميلان الموجب (صعود):

$$V_{out} = -\left(\frac{V_{in}}{t}\right)R_f C = -\left(\frac{10}{5\,\mu}\right)2.2\,\text{k} \times 0.001\,\mu = -4.4\,\text{V}$$

وفي حالة الميلان السالب (نزول):

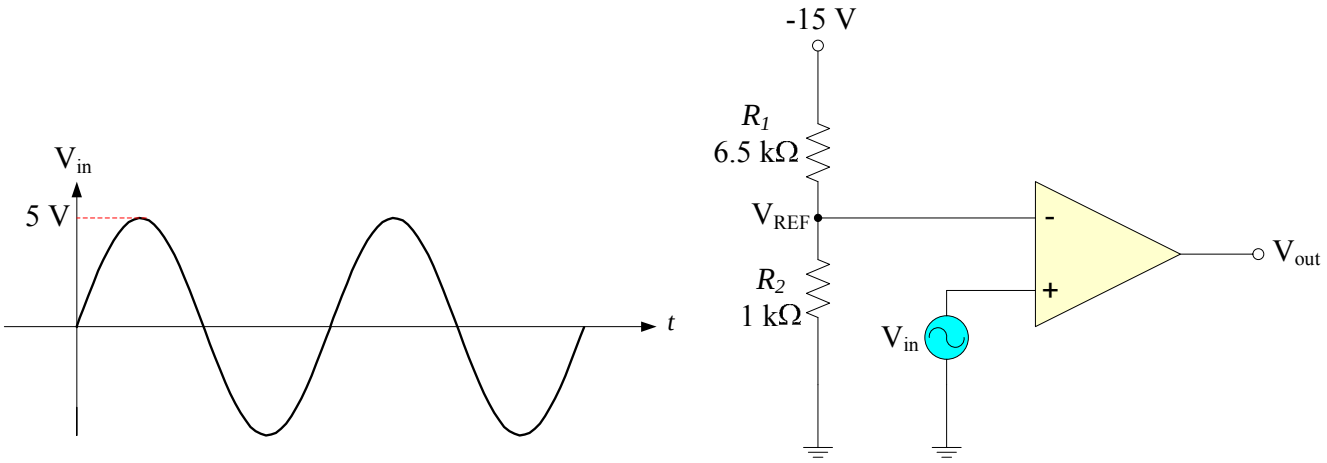
$$V_{out} = -\left(\frac{V_{in}}{t}\right)R_f C = -\left(-\frac{10}{5\,\mu}\right)2.2\,\text{k} \times 0.001\,\mu = +4.4\,\text{V}$$

فيكون شكل موجة الخرج كالتالي:

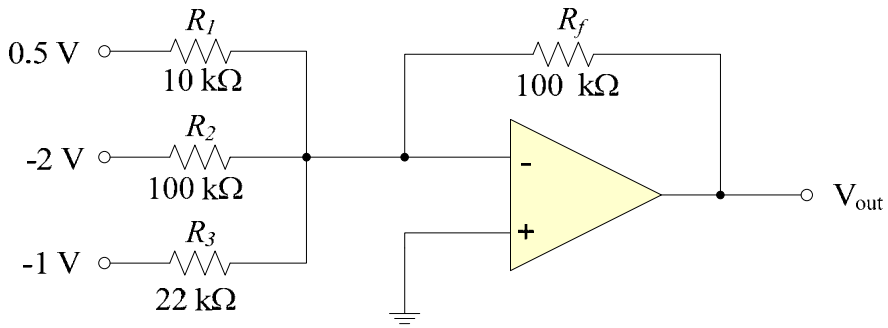


مسائل

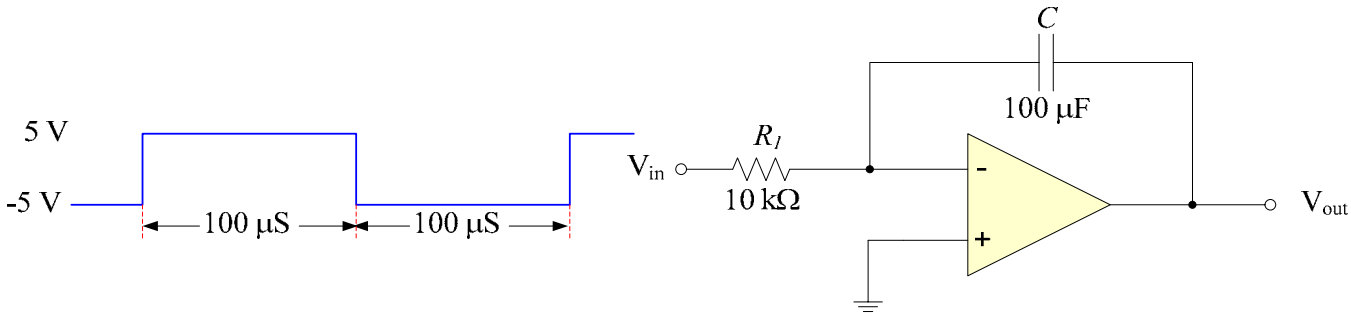
١. ارسم موجة خرج المقارن الموضح بالشكل.



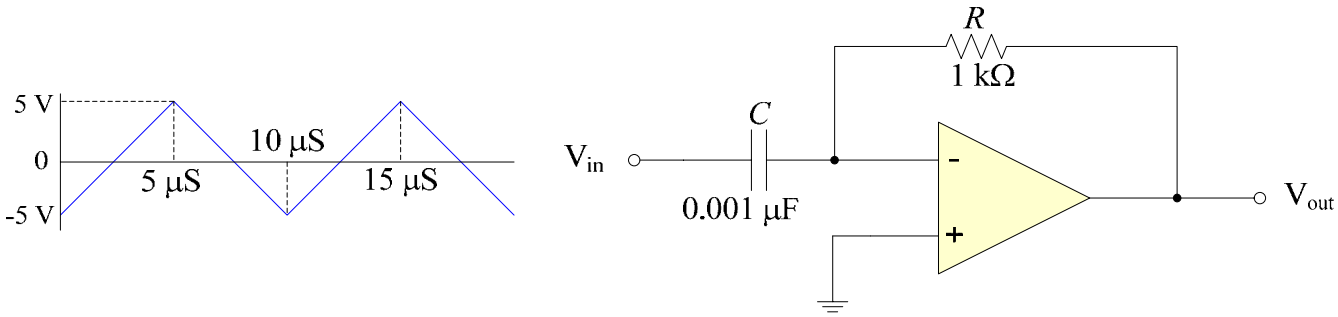
٢. أوجد قيمة جهد الخرج.



٣. ارسم موجة الخرج لدائرة المكامل.



٤. ارسم موجة الخرج لدائرة المفاضل التالية:

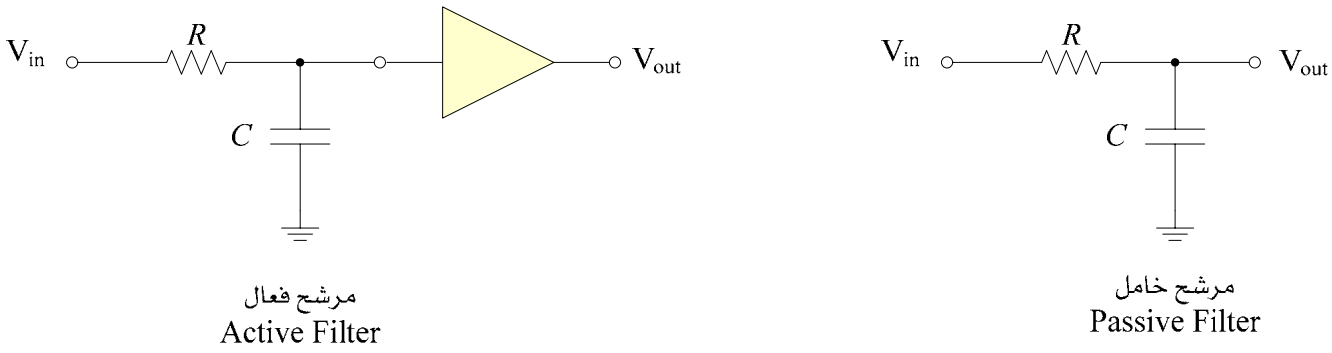


الإلكترونيات

المرشحات

الوحدة العاشرة: المرشحات
Filters

تستخدم المرشحات لتمرير ترددات معينة ولمنع الترددات غير المرغوب فيها وذلك حسب نوع المرشح. وهي تستخدم بكثرة في دوائر الاتصالات حيث لا يخلو أي مرسل أو مستقبل منها. ويتركب المرشح عادة من مقاومات، ومكثفات،و ملفات ولكن لا يفضل في بعض التطبيقات استخدام الملف وذلك لأن حجمه يكون كبيراً جداً عند الترددات المنخفضة. وهذا النوع من المرشحات يُسمى بالمرشحات الخاملة Passive Filters حيث تتحكم قيم المقاومات والمكثفات في اختيار الترددات المرغوب فيها. وإذا أردنا أن نتحكم في كسب الجهد، فإننا نضيف دائرة تكبير. ويُسمى هذا النوع بالمرشح الفعال Active Filter كما في الشكل (١٠-١).

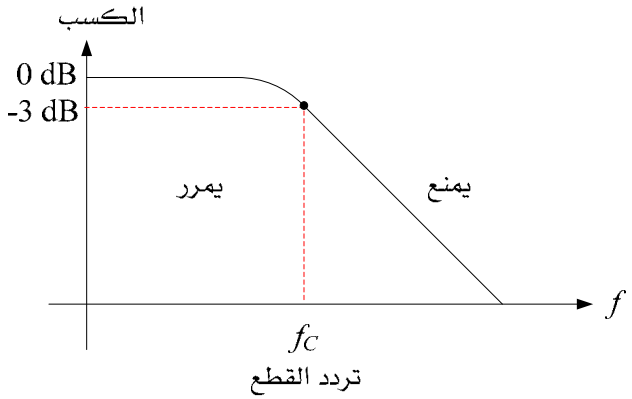


الشكل (١٠-١) تصنيف المرشحات

ويعتمد أداء المرشح على عدد الأقطاب (المكثفات) المبني منها. فكلما زاد عدد المكثفات، زادت فعالية المرشح وزادت أيضاً درجة منعه للترددات غير المرغوب فيها. فمثلاً إذا كان يحتوي على مكثف فهو من الدرجة الأولى، وهكذا. ويجب الانتباه إلى أن المكثفات لا توضع جُزافاً في الدائرة، بل تعتمد على معادلات رياضية معقدة ليس هذا مجالها.

مرشح تمرير التردد المنخفض الفعال Active Low Pass Filter (LPF)

مرشح التردد المنخفض يمرر الترددات المنخفضة دون تردد القطع Cut-off Frequency، ويمنع مرور الترددات العالية فوق تردد القطع. كما في الشكل (١٠-٢).



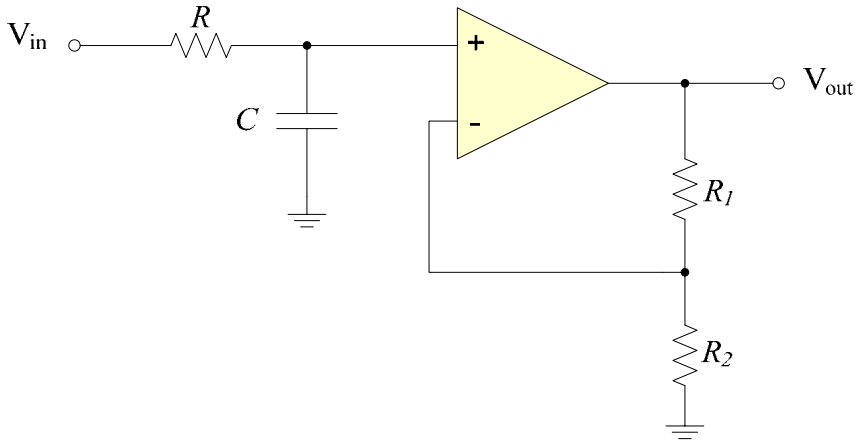
الشكل(١٠-٢) منحنى استجابة مرشح تمرير تردد منخفض

وقد تُعُورِفَ على أن يُحدد تردد القطع على الرسم عند 3 dB- وذلك عندما يساوي جهد الإشارة الخارجة من المرشح نصف قيمة إشارة الدخل حيث:

$$10\log\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right)=10\log\left(\frac{1}{2}\right)=-3\text{ dB}$$

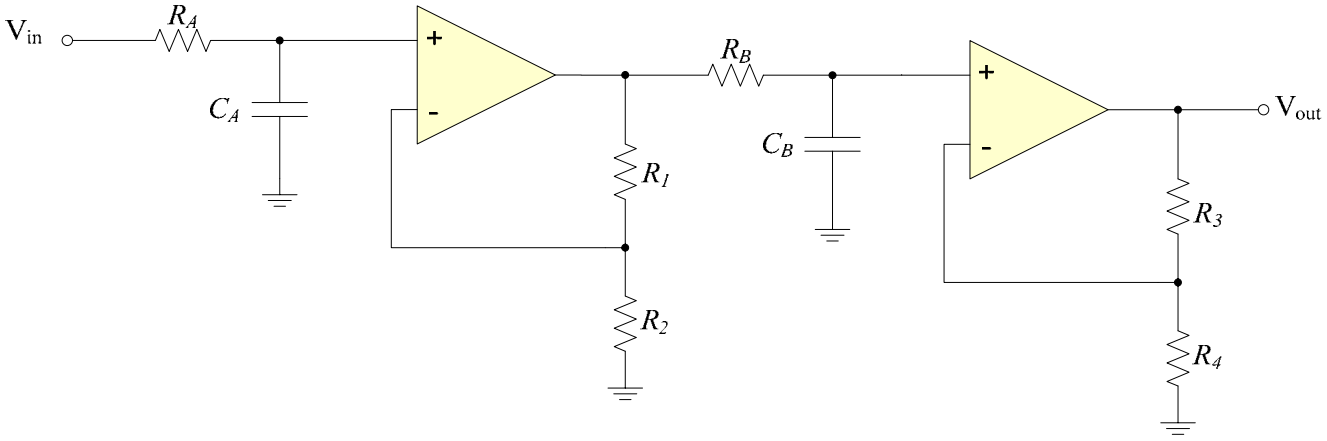
الشكل (١٠-٣) يوضح دائرة مرشح تردد منخفض فعال من الدرجة الأولى. ويتم تحديد تردد القطع حسب القانون:

$$f_C=\frac{1}{2\pi RC}$$



الشكل (١٠-٣) دائرة مرشح تردد منخفض فعال

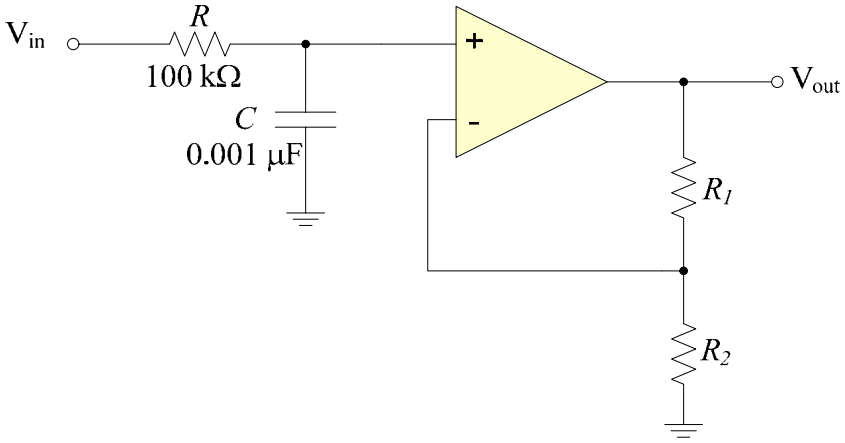
فالمقاومة R والمكثف C مسؤولان عن تحديد قيمة تردد القطع. والمقاومتان R_1 و R_2 يتحكمان في قيمة كسب الجهد كما مر معنا حين دراسة المكبر غير العاكس. وعند الرغبة في الحصول على مرشح من الدرجة الثانية مثلاً، فيمكننا ربط مرشحين من الدرجة الأولى على التوالي كما في الشكل (١٠-٤).



شكل (١٠-٤) ربط مرشحي تمرير تردد منخفض من الدرجة الأولى
للحصول على مرشح من الدرجة الثانية

مثال (١٠-١)

احسب تردد القطع لمرشح تمرير الترددات المنخفضة التالي:

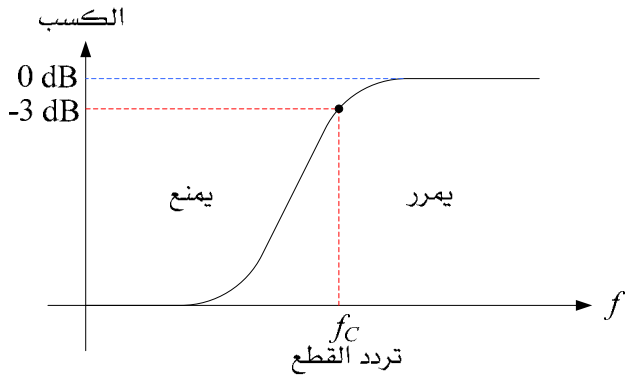


$$f_C = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi(100\,\text{k})(0.001\,\mu\text{F})} = 1.59\,\text{kHz}$$

أي أن المرشح يمنع الترددات الأعلى من 1.59 kHz

مرشح تمرير التردد العالي الفعال Active High Pass Filter (HPF)

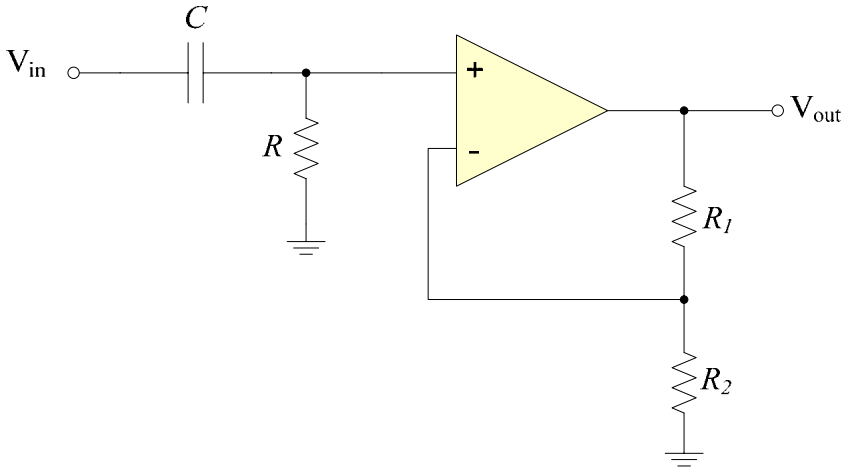
وهو مرشح يمرر الترددات العالية فوق تردد القطع، ويمنع مرور الترددات المنخفضة دون تردد القطع كما في الشكل (١٠-٥).



الشكل(١٠-٥) منحنى استجابة مرشح تمرير تردد عال

الشكل (١٠-٦) يوضح دائرة مرشح تردد عال فعال من الدرجة الأولى. ويتم تحديد تردد القطع حسب القانون:

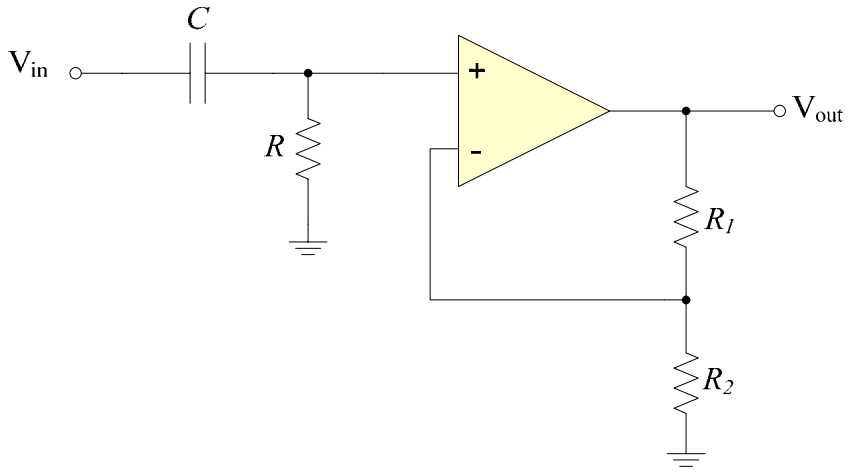
$$f_C = \frac{1}{2\pi RC}$$



الشكل (١٠-٦) دائرة مرشح تردد عال فعال

مثال (١٠-٢)

أوجد قيمة المقاومة اللازمة لتمرير الترددات الأعلى من 10 kHz



طالما أن قيمتا R و C مجهولتين، فسوف نفرض أحدهما وليكن $C = 0.001\ \mu F$. ونأخذ في عين الاعتبار أن تكون قيمة عملية ومتوفرة. فعلى سبيل المثال، لا يمكن أن نفترض أن يكون $C = 1\ F$

$$f_C = \frac{1}{2\pi RC}$$

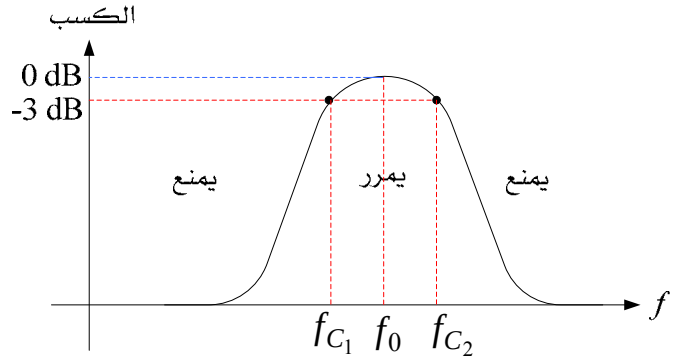
$$\therefore R = \frac{1}{2\pi C f_C} = \frac{1}{2\pi(0.001\,\mu)(10\,k)} = 16\,k\Omega$$

ويمكن اختيار $R_1 = R_2 = 16\,k\Omega$ أيضاً.

إن مرشح تمرير التردد المنخفض ومرشح تمرير التردد العالي من أهم المرشحات لكون أن المرشحات الأخرى تتركب منهما، كما سنرى في النوعين الآخرين.

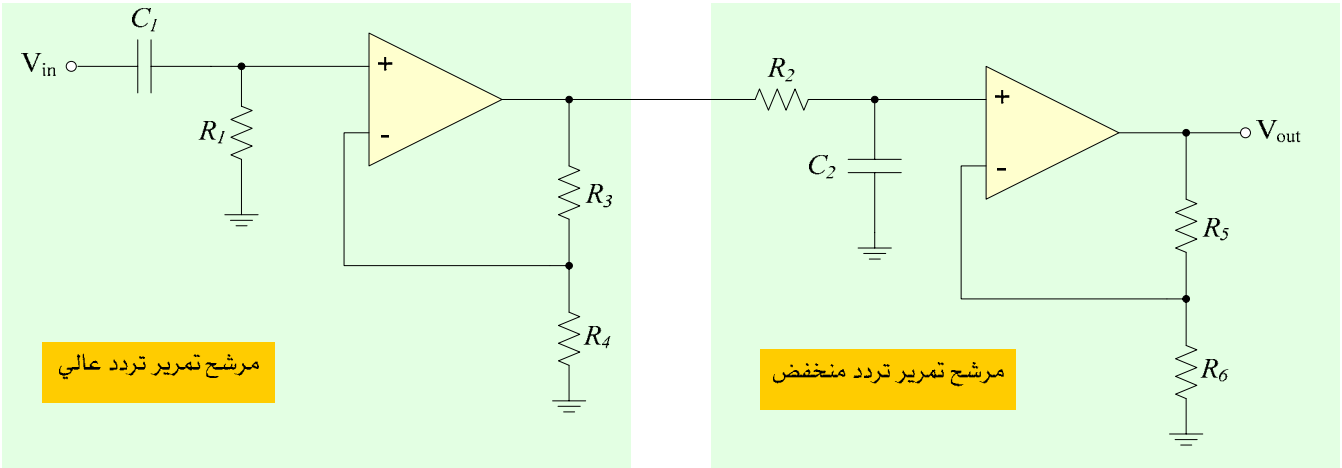
مرشح تمرير تردد في نطاق محدد Active Band Pass Filter (BPF)

مرشح تمرير تردد في نطاق محدد يقوم بتمرير ترددات محددة في نطاق معين محصور بين تردد القطع f_{C_1} وتردد القطع f_{C_2} ويمنع مرور باقي الترددات كما في الشكل (١٠-٧).



الشكل (١٠-٧) منحنى استجابة مرشح تمرير نطاق محدد

وهذا المرشح عبارة عن مرشح تمرير تردد منخفض متبوع بمرشح تمرير تردد عال على التوالي. ولا يهم الترتيب. حيث إن مرشح تمرير التردد العالي يحدد تردد القطع الأول f_{C_1} و مرشح تمرير التردد المنخفض يحدد التردد الثاني f_{C_2} والشكل (١٠-٨) يوضح دائرة مرشح تمرير تردد نطاق محدد.



الشكل (١٠-٨) دائرة مرشح تمرير نطاق محدد

ويمكن تحديد تردد القطع الأول بالمعادلة:

$$f_{C_1} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}$$

ويمكن تحديد تردد القطع الثاني بالمعادلة:

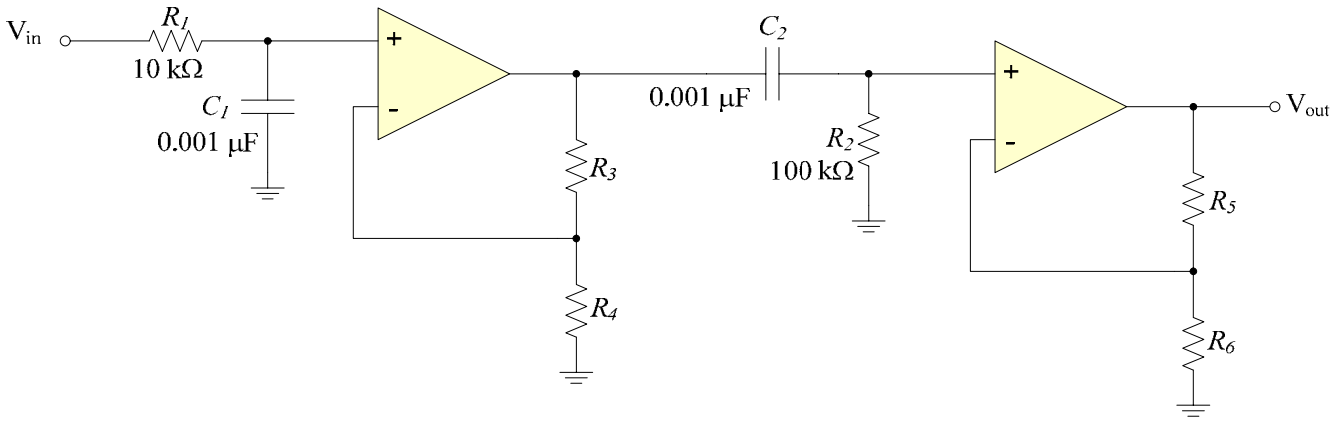
$$f_{C_2} = \frac{1}{2\pi R_2 C_2}$$

ويمكن حساب تردد الوسط بين الترددين f_{C_1} و f_{C_2} كالتالي:

$$f_0 = \sqrt{f_{C_1} f_{C_2}}$$

مثال (١٠-٣)

أوجد تردد الوسط لمرشح تمرير تردد نطاق محدد الموضح في الشكل:



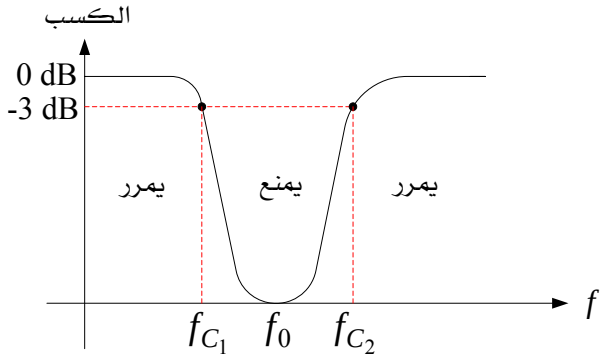
$$f_{C_1} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} = \frac{1}{2\pi(10\,\text{k})(0.001\,\mu\text{F})} = 15.9\,\text{kHz}$$

$$f_{C_2} = \frac{1}{2\pi R_2 C_2} = \frac{1}{2\pi(100\,\text{k})(0.001\,\mu\text{F})} = 1.59\,\text{kHz}$$

$$\therefore f_0 = \sqrt{f_{C_1} f_{C_2}} = \sqrt{(1.59\,\text{k})(15.9\,\text{k})} = 5\,\text{kHz}$$

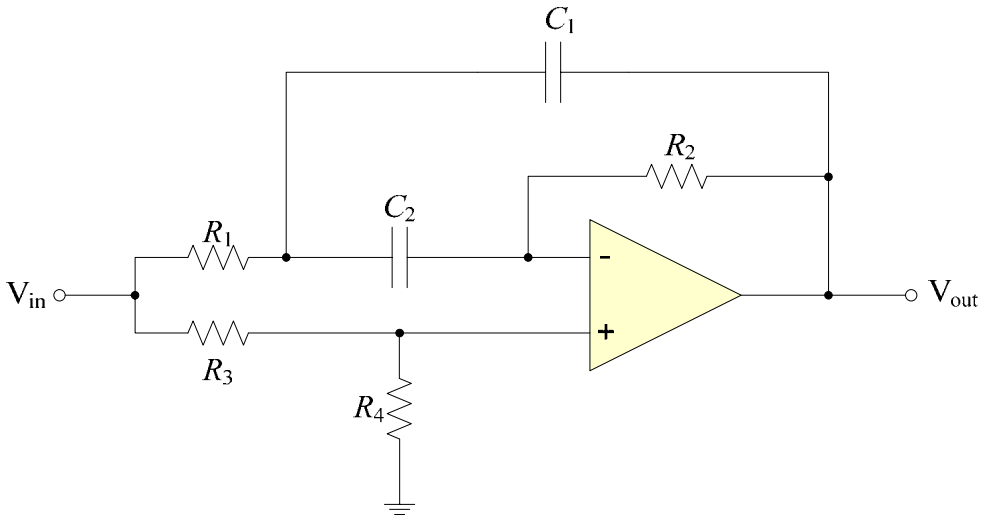
مرشح إيقاف نطاق محدد Active Band Stop Filter

مرشح إبقاف نطاق محدد يقوم بمنع مرور ترددات محددة في نطاق معين محصور بين تردد القطع f_{C_1} و تردد القطع f_{C_2} ويمرر باقي الترددات كما في الشكل (١٠-٩).



الشكل (١٠-٩) منحنى استجابة مرشح إيقاف نطاق محدد

ويتركب المرشح من حاصل جمع مرشح تمرير تردد منخفض ومرشح تمرير تردد عال . ودائرة مرشح تمرير تردد نطاق محدد موضحة في الشكل (١٠-١٠).



الشكل (١٠-١٠) دائرة مرشح إيقاف نطاق محدد

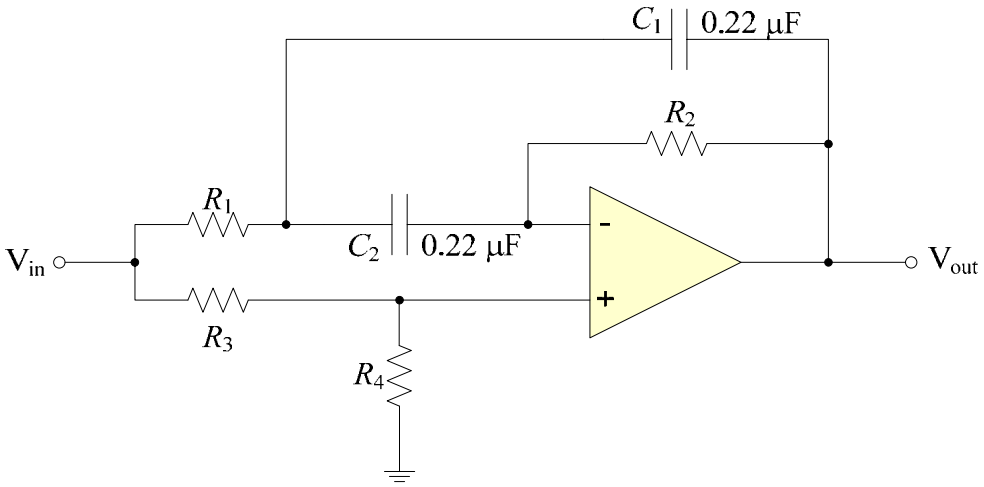
ومن تطبيقات هذا المرشح المهمة، منع تردد التشويش 60 Hz من المذياع. ومن أجل ذلك، يجب أن تكون المقاومات R_1 و R_2 متساوية، وكذلك C_1 و C_2 . ولهذا فإن:

$$f_{C_1} = f_{C_2}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

مثال (١٠-٤)

ما قيمة R_1 و R_2 اللازمة لمنع التردد 60 Hz ؟



$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

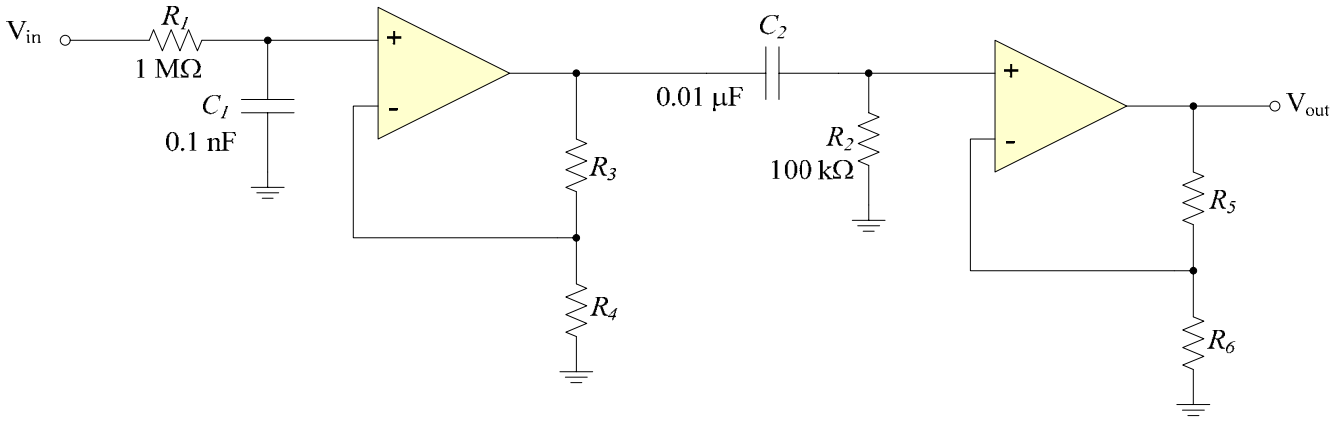
$$\therefore R = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2\pi \times 60 \times 0.22\,\mu} = 12\,\text{k}\Omega$$

مسائل

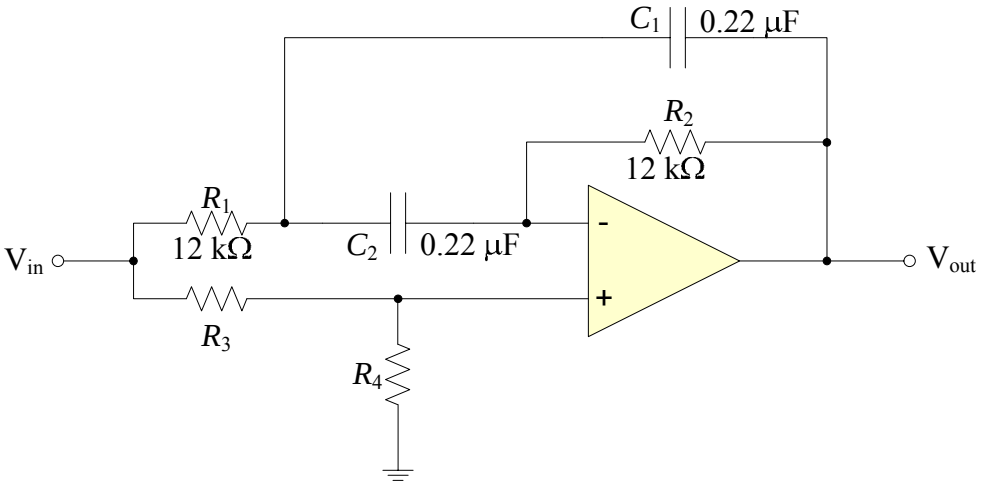
١. ارسم دائرة مرشح تمرير تردد منخفض خامل من الدرجة الأولى. واحسب تردد القطع إذا كان $R = 1\ \text{k}\Omega$ و $C = 0.002\ \mu\text{F}$.

٢. ارسم دائرة مرشح تمرير تردد عال نشط من الدرجة الأولى. وما قيمة المكثف إذا كان تردد القطع يساوي $1\ \text{kHz}$ والمقاومة $R = 3.2\ \text{k}\Omega$.

٣. حدد تردد القطع للمرشح الموضح في الشكل. وارسم منحنى الاستجابة موضحاً عليه القيم المحسوبة.



٤. احسب تردد الوسط f_0 لمرشح إيقاف نطاق محدد الموضح في الشكل.

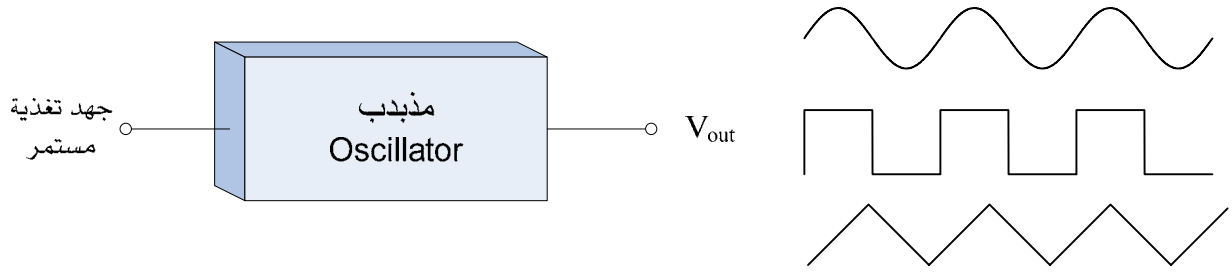


الإلكترونات

المذبذبات

الوحدة الحادية عشر: المذبذبات Oscillators

المذبذبات عبارة عن دوائر إلكترونية تنتج موجات دورية. وهذه الموجات إما أن تكون جيبية، مربعة ، أو مثلثة كما في الشكل (١١-١). وتعتمد دوائر الاتصالات على المذبذبات بشكل كبير. فأجهزة الإرسال لا تعمل بدون وجود مذبذب.



الشكل (١١-١) مخرجات المذبذب

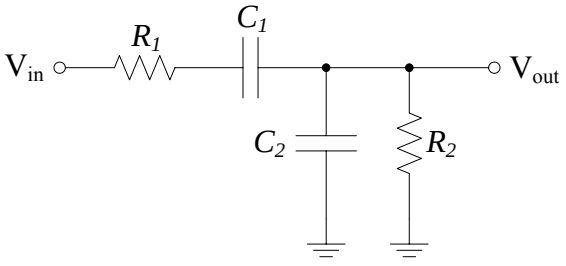
وتعتمد المذبذبات في عملها على مبدأ التغذية العكسية الموجبة والتي تتسبب كما أسلفنا في تذبذب النظام وعدم استقراريته. وهناك شرطان يجب توافرهما في المذبذب لكي يعمل:

١. يجب أن يكون الفرق في زاوية الطور بين الدخل والخرج صفراً.
٢. أن يكون كسب الجهد الكلي حول المسار المغلق مساوياً للوحدة.

مذبذبات توليد الموجة الجيبية

مذبذب قنطرة واين (فاين) Wien Bridge Oscillator

وهذا المذبذب يولد موجة جيبية باستخدام دوائر RC. والشكل (١١-٢) يوضح قنطرة واين.



الشكل (١١-٢) دائرة قنطرة واين

ويمكن تحديد تردد التذبذب (الرنين Resonance) بالعلاقة:

$$f_r = \frac{1}{2\pi RC}$$

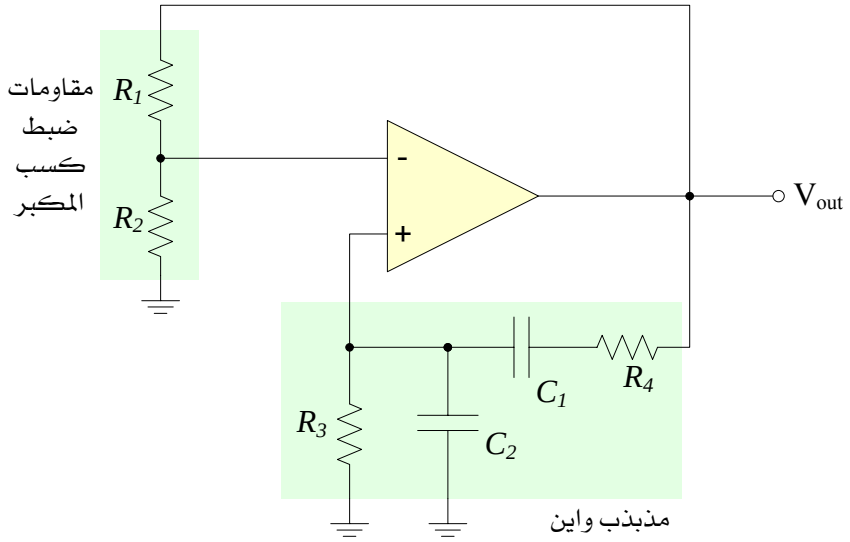
حيث إن قيم المقاومات متساوية وكذلك المكثفات. وعند تردد الرنين يكون فرق زاوية الطور بين الدخل والخرج مساوياً للصفر. وهذا هو الشرط الأول لحدوث التذبذب. ولكن عند هذا التردد، فإن نسبة جهد الخرج إلى جهد الدخل هي:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{3}$$

ولتحقيق الشرط الثاني للتذبذب، وهو أن الكسب مساوياً للواحد، فيجب أن نضرب النسبة في (3). حيث إن:

$$A_{CL} = \frac{V_{out}}{V_{in}}(3) = \frac{1}{3}(3) = 1$$

ولذلك لا بد من إضافة مكبر غير عاكس له نسبة تكبير تساوي (3) كما في الشكل (١١-٣).



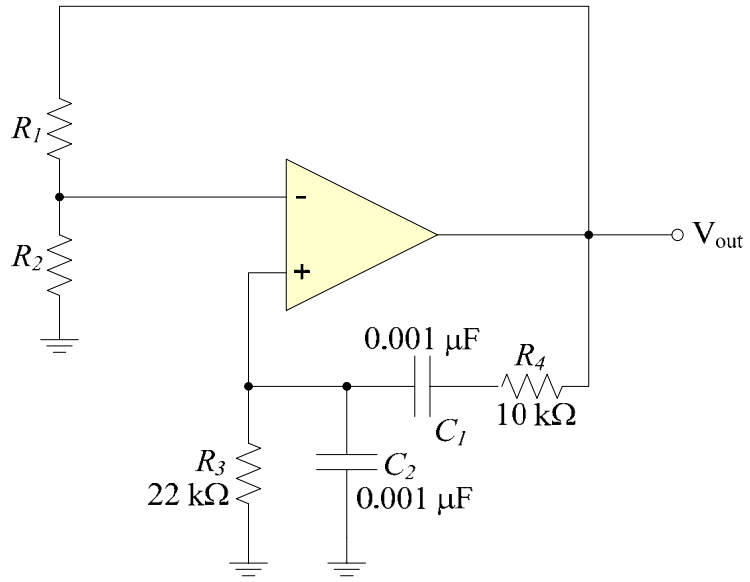
الشكل (١١-٣) دائرة مذبذب قنطرة واين

ويجب أن تكون قيم المقاومات R_1 و R_2 كالتالي:

$$R_1 = 2R_2$$

مثال (١١- ١)

حسب تردد الرنين لمذبذب واين.

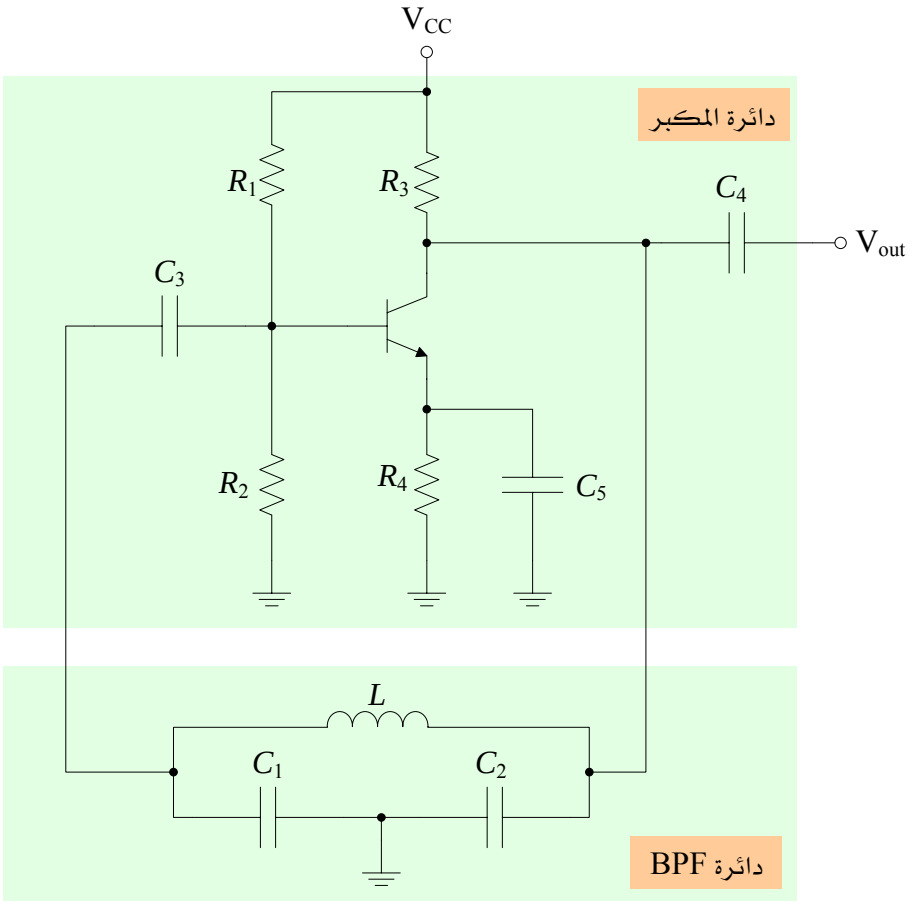


$$f_r = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi(22\,\text{k})(0.001\,\mu)} = 7.23\,\text{kHz}$$

مذبذب كولبتس Colpitts Oscillator

وهذا المذبذب يستخدم لتوليد الموجة الجيبية أيضاً، ولكنه يستخدم دوائر LC بدلاً من RC. وتتميز مذبذبات LC بأن لها القدرة في توليد موجات ذات ترددات عالية تناسب دوائر الاتصالات، بينما تناسب مذبذبات RC توليد موجات جيبية ذات ترددات منخفضة تصل إلى 1MHz فقط.

ومذبذب كولبتس مكون من مرشح نطاق محدد BPF حيث يمرر تردد التذبذب المرغوب فيه فقط. فالشكل (١١-٤) يوضح دائرة المذبذب حيث إن جزء المرشح يحقق الشرط الأول والخاص بفرق زاوية الطور. ويحقق المكبر الشرط الثاني.



الشكل (١١-٤) دائرة مذبذب كولبتس

ويمكن تحديد تردد الرنين كالتالي:

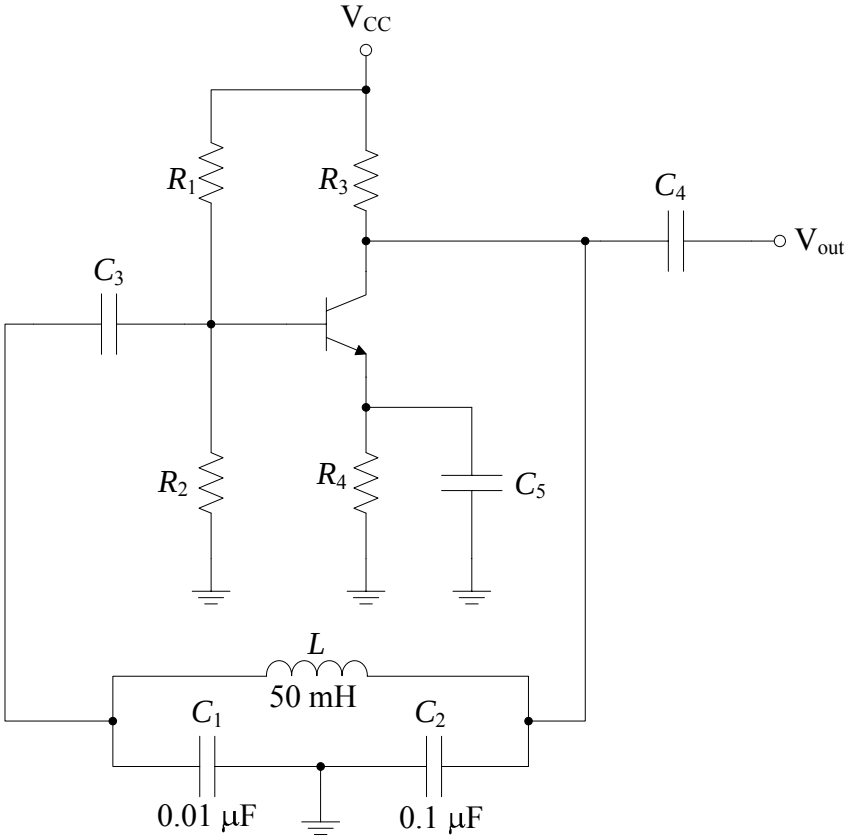
$$f_r \cong \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_T}}$$

حيث إن C_1 و C_2 متصلان على التوالي، ولذلك فإن:

$$C_T = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

مثال (١١-٢)

حسب تردد المذبذب:

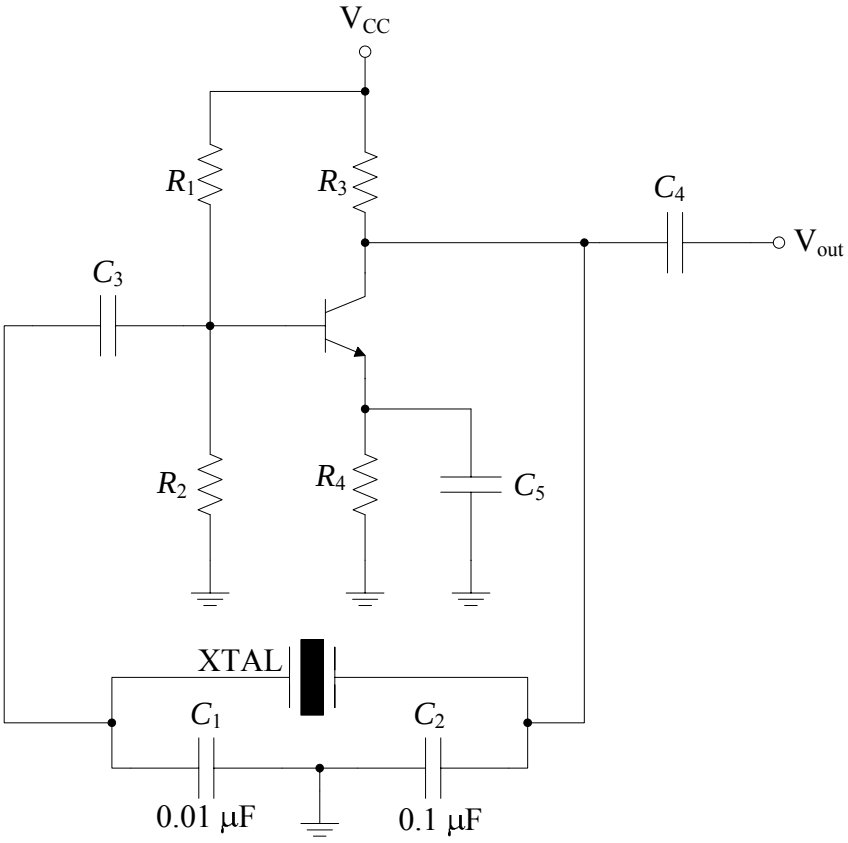


$$C_T = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{(0.01\,\mu\text{F})(0.1\,\mu\text{F})}{0.01\,\mu\text{F} + 0.1\,\mu\text{F}} = 0.0091\,\mu\text{F}$$

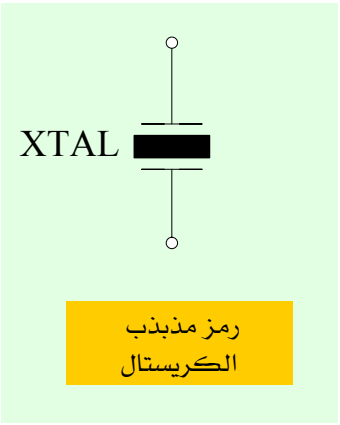
$$f_r \cong \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_T}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(50\,\text{m})(0.0091)}} = 7.46\,\text{kHz}$$

المذبذب الكريستالي Crystal Oscillator

الكريستال مادة طبيعية تولد ترددات دقيقة جداً حسب حجم القطعة. ولذلك فإن المذبذبات التي تستخدم الكريستال في التغذية العكسية هي الأكثر دقة واستقراراً. ويرمز إلى المذبذبات الكريستالية كما في الشكل (١١-٥ أ). ويمكن إضافتها إلى مذبذب كولبتس كما في الشكل (١١-٥ ب).



(ب)

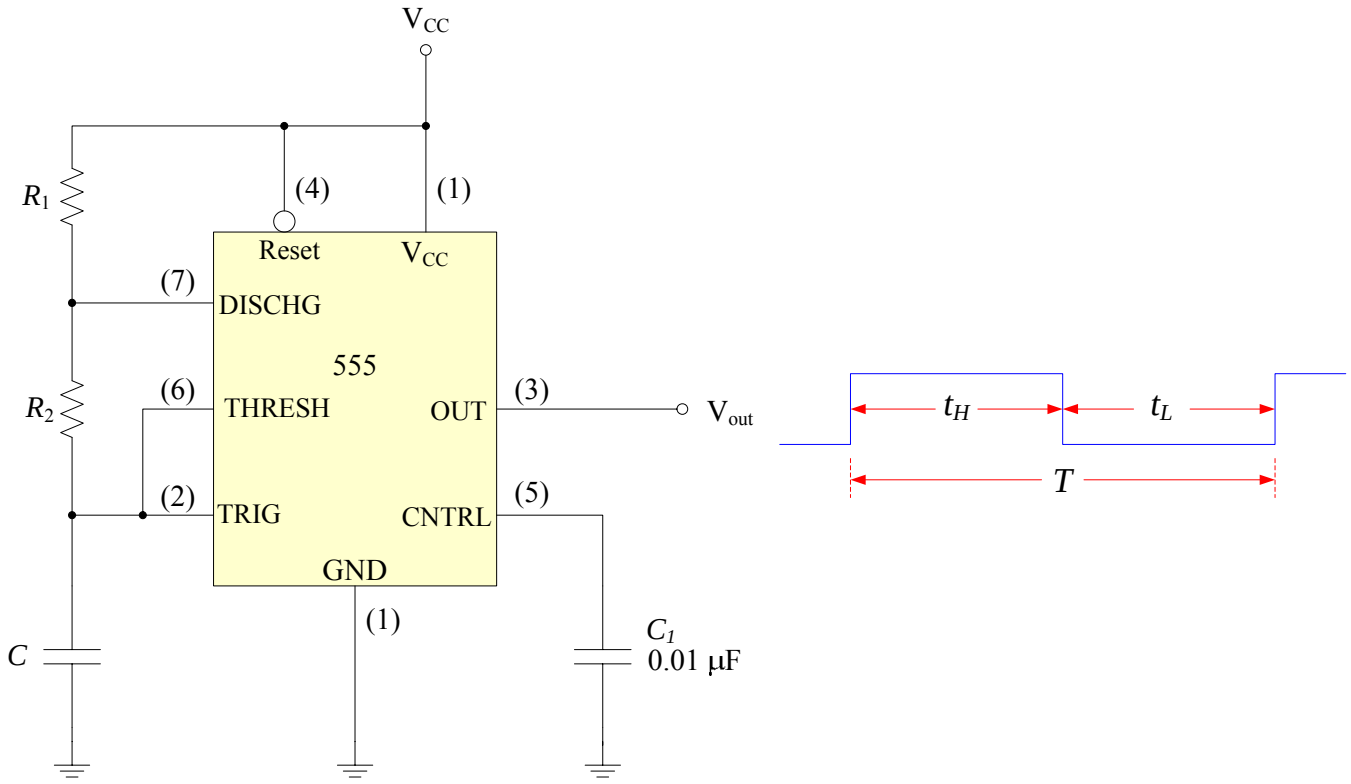


(أ)

الشكل (١١-٥) استخدام الكريستال في مذبذب كولبتس

مذبذبات توليد الموجة المربعة

من أشهر الدوائر التي تُستخدم لتوليد الموجة المربعة هي دائرة المزمن المتكاملة المزمن (555 Timer). و لها تطبيقات كثيرة. ومن أحد تطبيقاتها المشهورة، مذبذب عديم الاستقرار والمستخدم لتوليد الموجة المربعة. وتوصل الدائرة كما في الشكل (١١- ٦).



الشكل (١١-٦) دائرة مذبذب عديم الاستقرار باستخدام المزمن 555

حيث إن t_H هو الزمن الذي تبقى فيه الموجة في الوضع العالي High ويساوي:

$$t_H = 0.694(R_1 + R_2)C$$

والزمن t_L هو الزمن الذي تبقى فيه الموجة في الوضع المنخفض Low ويساوي:

$$t_L = 0.694R_2C$$

ويكون الزمن الدوري للموجة هو:

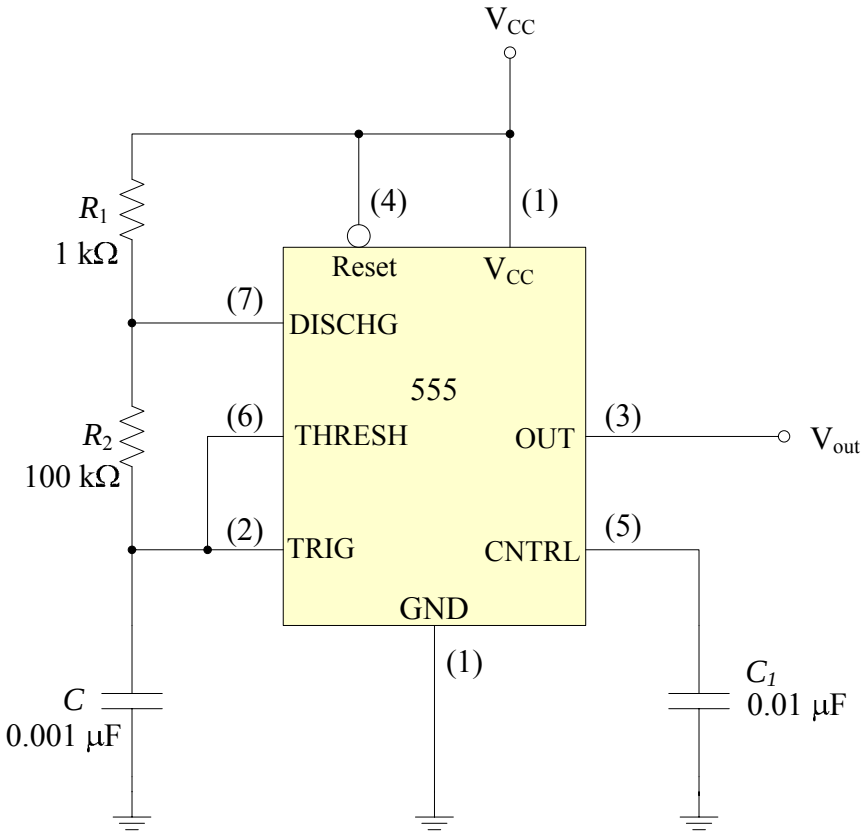
$$T = t_H + t_L = 0.694(R_1 + 2R_2)C$$

ويمكن حساب التردد بالعلاقة المعروفة:

$$f_r = \frac{1}{T} = \frac{1.44}{(R_1 + 2R_2)C}$$

مثال (١١-٣)

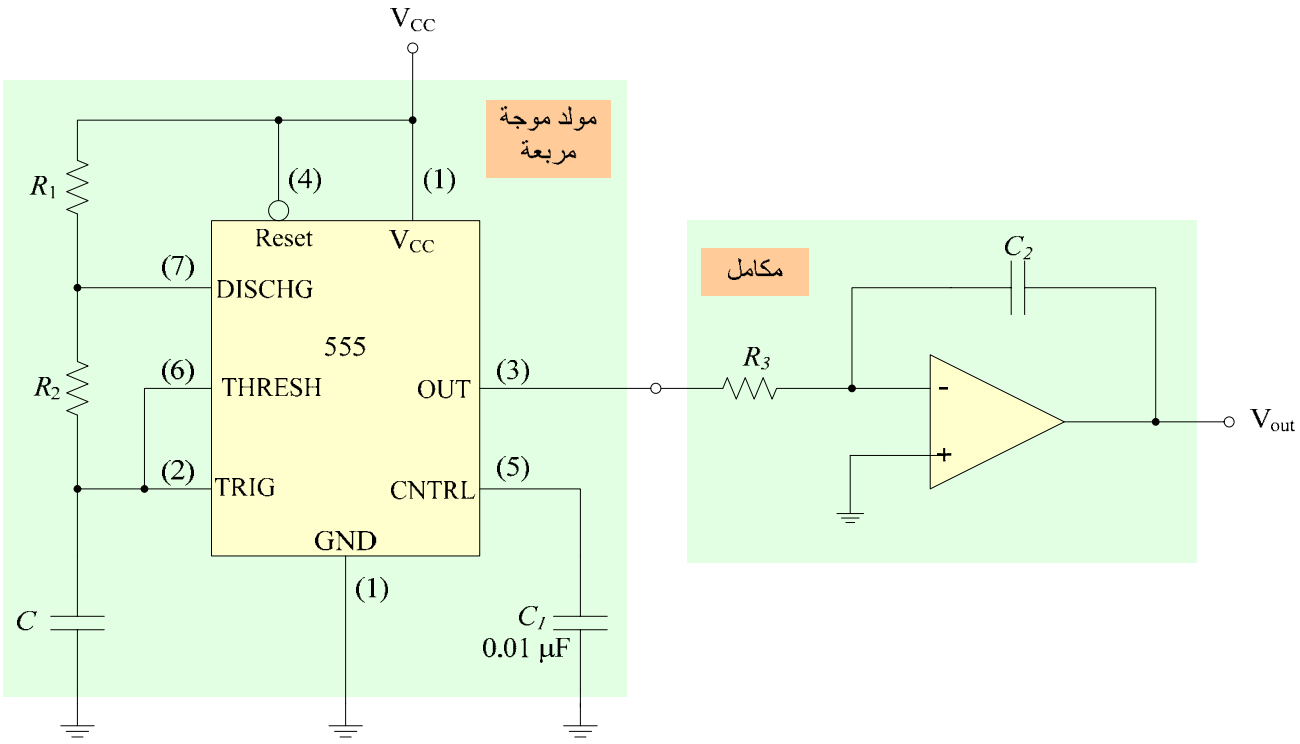
حسب تردد الخرج لدائرة المذبذب الموضحة في الشكل:



$$f_r = \frac{1.44}{(R_1 + 2R_2)C} = \frac{1.44}{(1\,\text{k} + 2 \times 100\,\text{k})0.001\,\mu} = 7.16\,\text{kHz}$$

توليد الموجة المثلثة

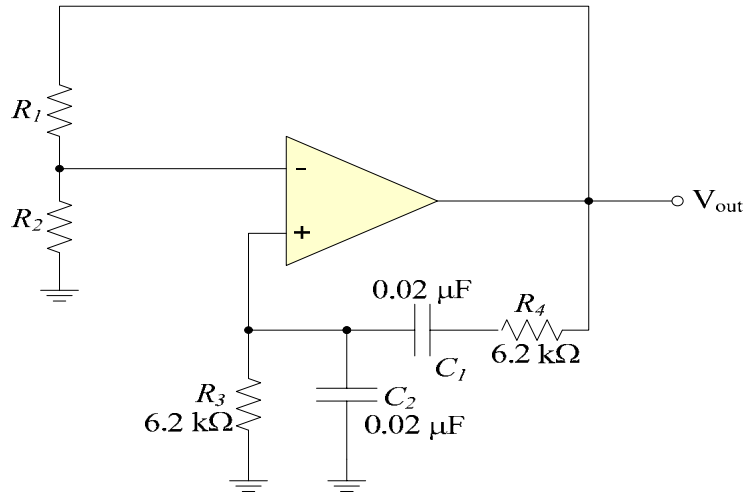
يمكن توليد الموجة المثلثة وذلك بإدخال الموجة المربعة على مكامل كما في الشكل (١١-٧). حيث إن المكامل يقوم بتحويل الموجة المربعة إلى مثلثة كما مر معنا في الوحدة العاشرة.



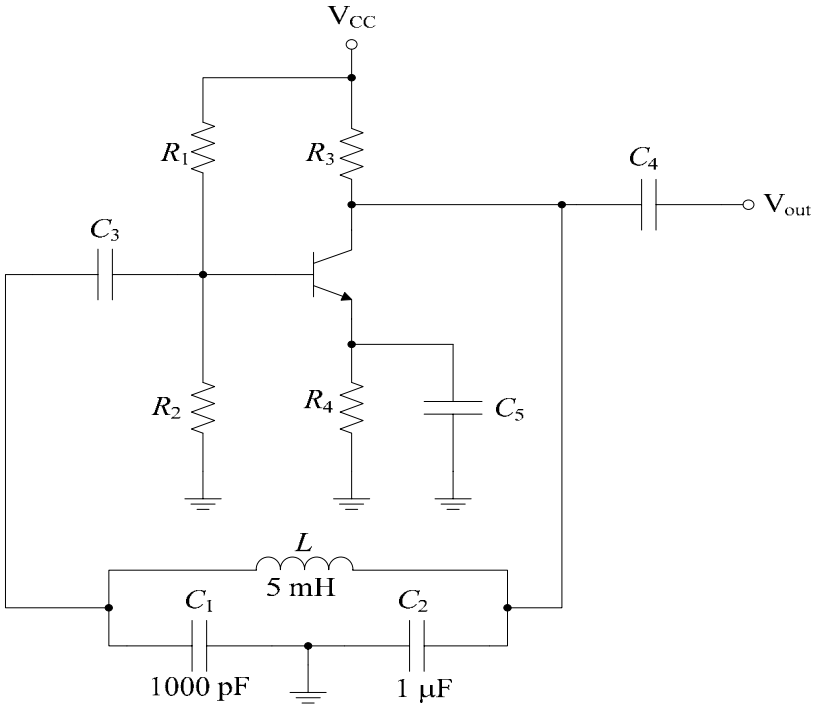
الشكل (١١-٧) توليد موجة مثلثة بتكامل موجة مربعة

مسائل

١. احسب تردد الخرج لمذبذب واين التالي:



٢. احسب تردد الرنين لمذبذب كولبتس التالي:



صمم مذبذب موجة مربعة باستخدام المزمن 555 بحيث إن $t_H = 0.7$ ms و $t_L = 0.3$ ms

المحتويات

مقدمة .....
الوحدة الأولى : الدايود الثنائي ١
أشباه الموصلات ١
ثنائي الوصلة (الدايود Diode) ٥
خصائص الجهد والتيار للدايود ٨
الوحدة الثانية : تطبيقات على الدايود ١٧
دائرة توحيد نصف الموجة Half-wave Rectifier Circuit ١٧
استخدام المحول في دوائر التوحيد ٢٠
توحيد الموجة الكاملة Full-wave Rectifier ٢٢
ترشيح (تنعيم) موجة الدخل Filtering ٢٤
الوحدة الثالثة : الدايود الثنائي ذو الوظائف الخاصة ٢٧
دايود زينر Zener Diode ٢٧
طرق توصيل الزينر ..... - ٢٨ -
دايود الفراكتور Varactor Diode ٣٤
الدايود الضوئي ٣٦
الوحدة الرابعة : الترانزستور ٤٠
تركيب الترانزستور ثنائي القطبية ٤٠
شروط عمل الترانزستور ٤٢
تيارات الترانزستور ٤٣
تحليل التيار والجهد ٤٣
منحنى خصائص المجمع ٤٨
الوحدة الخامسة : انحياز الترانزستور ٥٦
دوائر انحياز الترانزستور ثنائي القطبية ٥٦

الانحياز باستخدام مقسم الجهد ٦٠
انحياز القاعدة Base Bias..... ٦٤
انحياز الباعث..... ٦٦
انحياز المجمع..... ٦٧
الوحدة السادسة : مكبرات الترانزستور..... ٦٩
مكبر الباعث المشترك:..... ٦٩
مكبر المجمع المشترك ٧٥
مكبر القاعدة المشتركة..... ٧٨
الوحدة السابعة : مكبرات القدرة ٨٢
مكبرات القدرة عائلة (أ) Class A Power Amplifier ٨٢
مكبرات القدرة عائلة (ب) وعائلة (أ-ب) Class B and AB Power Amplifier..... ٨٥
مكبر القدرة عائلة (ج) Class C Power Amplifier ٨٧
الوحدة الثامنة : المكبرات التشغيلية ٩٠
خصائص المكبر التشغيلي..... ٩١
١. المكبر الغير عاكس ٩٣
٢. تابع الجهد Voltage Follower ٩٤
٣. المكبر العاكس Inverting Amplifier ٩٥
الوحدة التاسعة : تطبيقات مكبرات العمليات ٩٨
المقارن Comparator ٩٨
المكبر الجامع Summing Amplifier ١٠٢
مكبر التكامل Op-Amp Integrator..... ١٠٤
مكبر التفاضل Op-Amp Differentiator..... ١٠٦
الوحدة العاشرة: المرشحات ١١٠
مرشح التردد المنخفض الفعال Active Low Pass Filter (LPF) ١١١
مرشح التردد العالي الفعال Active High Pass Filter (HPF)..... ١١٤
مرشح تردد في نطاق محدد Active Band Pass Filter (BPF) ١١٦

مرشح قطع نطاق محدد Active Band Stop Filter ١١٨
الوحدة الحادية عشر: المذبذبات..... ١٢٣
مذبذب قنطرة واين (فاين) Wien Bridge Oscillator..... ١٢٣
مذبذب كولبتس Colpitts Oscillator ١٢٦
المذبذب الكريستالي Crystal Oscillator..... ١٢٨
مذبذبات توليد الموجة المربعة..... ١٢٩
توليد الموجة المثلثة ١٣١