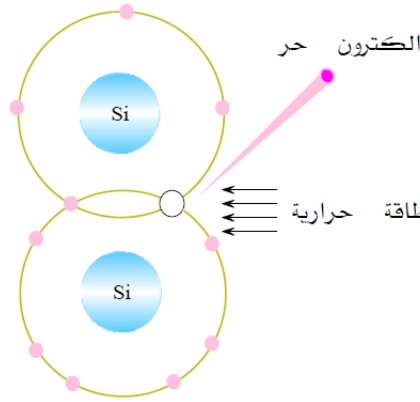


العناصر الفعالة المستخدمة بالدوائر الالكترونية

تتعدد العناصر الفعالة في الدوائر الإلكترونية وتعدد استخداماتها ولكننا في هذا الفصل من الكتاب سوف نتطرق الى اهم هذه العناصر وهى المقوم الكهربى (Diodes) والترانزستور (Transistors) والثيسترور (Silicon controlled rectifier) والمكبر (Operational amplifier). لكن قبل ان نبدأ بالتعرف على هذه العناصر علينا ان نتعرف على الوحدة المكونة لهذه العناصر وهى ذرة السيلكون او ذرة الجرمانيوم ونظرا لانتشار ذرة السيلكون في تصنيع هذه العناصر مقارنة بذرة الجرمانيوم فإننا سوف نركز على ذرة السيلكون.

١-٢ مقدمة في اشباه الموصلات:

تعتبر ذرة السيلكون من الذرات الشبه موصلة اى انها تقع في منطقة وسط ما بين العوازل والموصلات. تحتوى تلك الذرة على عدد أربعة الكترونات في مستوى الطاقة الأخير مما يجعلها ترتبط بذرة أخرى من نفس المادة مكونة رابطة تساهمية وفى درجة حرارة الصفر المطلق تصبح المادة بحالة الترابط هذه عازلة كهربيا وعند اكسابها كمية من الحرارة ونظرا لضعف قوى تماسك الرابطة التساهمية المكونة بين ذرات السيلكون فان بعض الالكترونات تتحرر من ذلك التماسك وتصبح حرة الحركة مما يؤدي لمرور تيار كهربى والشكل ١-٢ يبين تحرر احد الالكترونات من ذرتى سليكون مرتبطتين معا ارتباطا تساهميا نتيجة تعرضهما لطاقة حرارية.



شكل ١-٢ أثر الحرارة على ذرتى سليكون مرتبطتان تساهميا

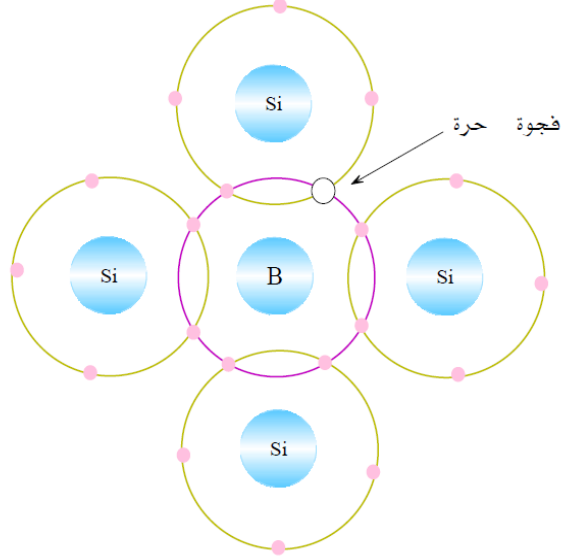
وبشكل عام يمكن تقسيم اشباه الموصلات من ناحية التركيب الى اشباه موصلات نقية واشباه موصلات غير نقية وكما المحنا فان اشباه الموصلات النقية عند تعرضها للحرارة تنكسر بعض روابطها وتحرر الالكترونات ليصبح مكانها فجوات تعمل على جذب الكترونات من ذرات أخرى ليترك مكانها فجوات وتستمر هذه العملية

حيث يبدو ان هذه الفجوات تتحرك في الاتجاه المعاكس لحركة الالكترونات وبناء على ذلك يمكن اعتبار شحنة هذه الفجوات موجبة بما انها تعمل على جذب الكترونات ولذلك يبدأ مرور تيار كهربى.

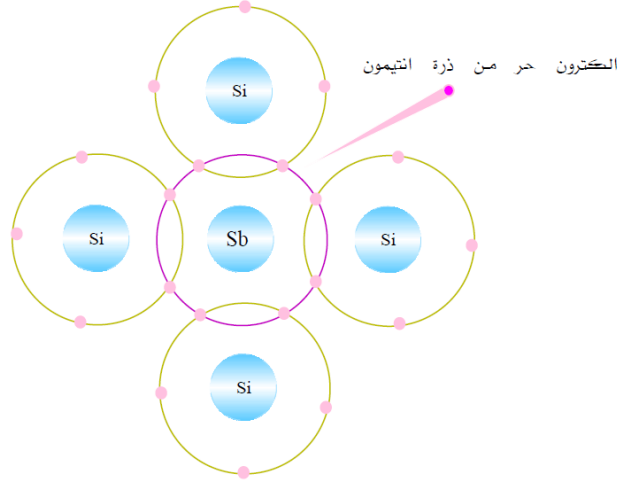
ويمكن ملاحظة ان عدد الشحنات الموجبة (الفجوات) او ما يسمى حاملات الشحنات الموجبة تساوى عدد الالكترونات المتحررة او ما يسمى حاملات الشحنات السالبة وعلى هذا نتيجة زيادة تلك الشحنات الحرة سواء كانت موجبة او سالبة بسبب تسليط الحرارة عليها فان التيار المار يزداد مما يدل على ان المقاومة الكهربائية انخفضت مع زيادة درجة الحرارة على عكس المواد الموصلة حيث مع زيادة درجة حرارتها تزداد مقاومتها. واشباه الموصلات في صورتها النقية لا تستخدم في الصناعة حيث بتسليط جهد عليها يلاحظ مرور تيار ضعيف جدا نتيجة لتحرك عدد قليل من الالكترونات الى القطب الموجب للبطارية وعدد قليل من الفجوات الى القطب السالب للبطارية ولزيادة عدد الفجوات والالكترونات فإننا يجب ان نزيد من درجة الحرارة التي تتعرض لها المادة الشبه موصلة وهذا لا يمكن عمليا.

اما في الحالة الثانية وهى وجود شبه موصل غير نقى وهذا يمكن تحقيقه بتطعيم او حقن المادة شبه الموصلة بمادة أخرى تسمى تلك المادة بالشائبة حيث يتم إضافة عدد محدود من تلك الشوائب وتكون تلك الشوائب اما مادة ثلاثية التكافؤ مثل الالومنيوم او خماسية التكافؤ مثل الفسفور وعلى ذلك فانه مع ارتباط ذرة السيلكون كمادة شبه موصلة تحتوى على أربعة الكترونات في مستوى التكافؤ الخارجى مع ذرة الألومنيوم او الانديوم او البورون التي تحتوى على ثلاثة الكترونات في مستوى التكافؤ الخارجى وحتى يصل المادة الشبه موصلة الغير نقية الى التركيب الثماني الثابت لابد لها من جذب الكترون ليترك مكانه فجوة اى ان حاملات الشحنات هنا هي الفجوات لذلك يسمى ذلك النوع بالنوع الموجب (P type) ويمكن رؤية ذلك بالشكل ٢-٢.

اما عند ارتباط ذرة السيلكون مع ذرة عنصر خماسى التكافؤ مثل الفوسفور او الانتيمون او البزموت فان عدد الالكترونات في مستوى التكافؤ الخارجى خمسة الكترونات وبإضافتها الى الأربعة الكترونات (الكترونات التكافؤ) من عنصر السيلكون فإنها تصبح تسع الكترونات اى تزيد بمقدار الكترون عن حالة الثبات (ثمان الكترونات في مستوى الطاقة الاخير) وعلى هذا فانه يظل الكترون واحد مفرد حر الحركة كما بالشكل ٢-٣ وهو يمثل حاملات الشحنات السالبة لذلك يسمى هذا النوع بالنوع السالب (N type). هذا عند درجة الصفر المطلق اتضح من ما سبق ان به الكترونات حرة الحركة اى ان البلورة الناتجة تكون موصلة عند تلك الدرجة (الصفر المطلق) اما عند درجة حرارة الغرفة فان عدد الالكترونات الحرة تتزايد وتزداد التوصيلية وتجدر الإشارة الى انه كل شائبة تضاف الى مليون ذرة سيلكون او مائة مليون ذرة سيلكون تلك الإضافة لا تؤثر على الخواص الفيزيائية لذرة السيلكون ولكنها تؤثر تأثيرا كبيرا على الخواص الكهربائية لها.



شكل ٢-٢ تكوين بلورة غير نقية موجبة

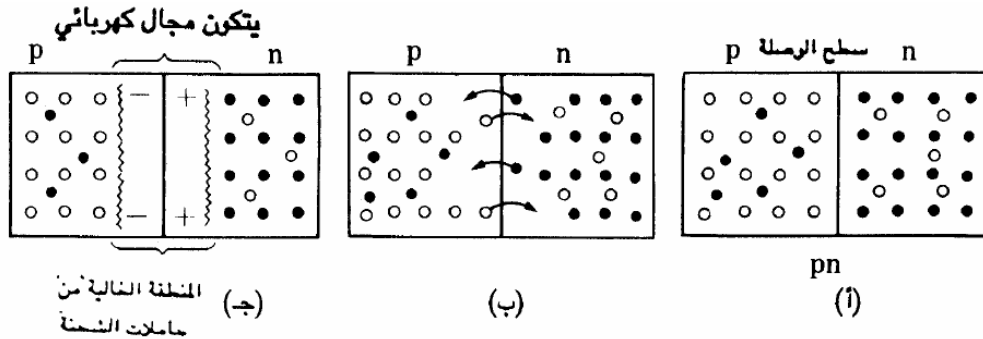


شكل ٣-٢ تكوين بلورة غير نقية سالبة

وبشكل عام يمكن ملاحظة انه في التصنيع لا يوجد مادة نقية مائة بالمائة وانما يتواجد بها بعض الشوائب مما يجعلها تحتوى على بعض الشحنات السائدة وبعض الشحنات الأقلية اى ان حاملات الشحنات الموجبة تتواجد جنباً الى جنب مع حاملات الشحنات السالبة في نفس الوقت سواء كانت البلورة المصنعة من النوع السالب او النوع الموجب ويمكن رؤية ذلك بالشكل ٢-٤ حيث يلاحظ ان البلورة الموجبة تحتوى على فجوات كثيرة وعدد قليل من الالكترونات الحرة والبلورة السالبة تحتوى على عدد كبير من الالكترونات وعدد قليل من الفجوات اى تحتوى كلا منهما على عدد من حاملات الشحنات السائدة بكثرة طبقاً لنوع البلورة وعدد من الشحنات الأقلية

تبعاً لنوع البلورة ولكن دعونا نتسأل ماذا يحدث عند توصيل بلورة من النوع الموجب مع بلورة من النوع السالب لتكوين الوصلة الثنائية أو ما يعرف بالمقوم الكهربى (Diode) وللإجابة على ذلك دعونا نتعرف على ذلك من خلال التالى

- الشكل الظاهر للوصلة الثنائية ليس قطعتين منفصلتين متصلتين معا (P type – N type) وإنما هي عبارة عن قطعة مصنعة من السيلكون تم حقنها أو تطعيمها من الجانبين وعلى هذا فان الالكترونات والفجوات تملك حرية الحركة داخل تلك الوصلة.
- للتبسيط فإننا نفترض وجود حاملات الشحنات الأكثرية في كلا من النوع الموجب والنوع السالب واختفاء حاملات الشحنات الأقلية ونفترض ان البلورة السالبة والموجبة متعادلة كهربياً
- فى البداية تبدأ الالكترونات في التحرك شكل ٢-٤ ب نحو الفجوات مكونة منطقة تسمى منطقة الجهد الحاجز ويتوقف مرور الالكترونات بعد فترة لان الجهد الحاجز قد وصل الى ٠,٧ فولت وتسمى هذه المنطقة، المنطقة الخالية من حاملات الشحنات شكل ٢-٤ ج ويجب التغلب على ذلك الجهد حتى يتم استمرار مرور الالكترونات والفجوات ويتم ذلك بإضافة جهد أكبر من ٠,٧ فولت باى وسيلة حتى نضمن استمرار مرور التيار الكهربى وعدم توقفه. وتجدر الإشارة الى ان قيمة الجهد الحاجز مع استخدام ذرات الجرمانيوم بدلا من السليكون تكون ٠,٣ فولت.

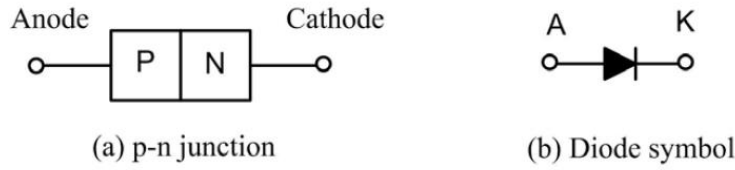


شكل ٢-٤ الوصلة الثنائية (اتصال البلورة الموجبة والسالبة)

٢-١ المقوم الكهربى (Diode):

يعتبر المقوم الكهربى حجر الأساس في معظم التطبيقات الالكترونية وهو يعمل كمفتاح الكترونى لأداء وظائف محددة وذلك العنصر له طرفين يطلق على احدهما اسم المصعد (Anode) والآخر اسم المهبط (Cathode)، ويسمح بمرور التيار الكهربى في اتجاه واحد فقط ولا يسمح بمروره في الاتجاه الاخر ويتم توصيلة في الدائرة

اما توصيلا اماميا وفي هذه الحالة يسمح بمرور التيار الكهربى او يتم توصيله توصيلا خلفيا وفي هذه الحالة لا يسمح بمرور التيار الكهربى اى يمنع مرور التيار ويتكون المقوم (الديود) من شريحة من السيليكون مطعمة من الجانبين بمادتين احدهما عنصر خماسى التكافؤ والأخر عنصر ثلاثى التكافؤ لتكوين النوع السالب والنوع الموجب على الترتيب والشكل ٥-٢ يبين احد هذه الوصلات المستخدمة بالدوائر الالكترونية وفيها يشير راس السهم إلى القطعة السالبة N وبداية السهم الى القطعة الموجبة P اى ان القطعة الموجبة هي ال Anode والقطعة السالبة هي ال cathode. والشكل ٦-٢ يوضح صورة حقيقية للموحد السيليكونى الذى يختلف شكله باختلاف الجهد والتيار المقنن المسموح بتشغيله عندهما.



شكل ٥-٢ الوصلة الثنائية (الديود) وتمثيلها بالدوائر الالكترونية



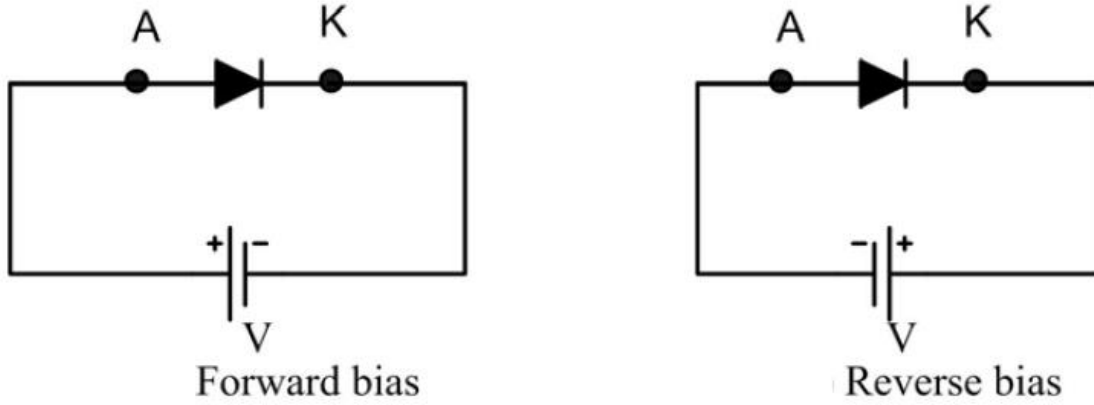
شكل ٦-٢ مظهر حقيقى لموحدات القدرة

١-٢-٢ التوصيل الأمامى للوصلة الثنائية (Forward bias):

في هذا النوع من التوصيل يتم توصيل القطب الموجب من الوصلة الثنائية (الانود) بالقطب الموجب للبطارية ويتم توصيل القطب السالب (الكاثود) بالقطب السالب للبطارية كما هو مبين بالشكل ٧-٢ وعلى هذا تكون المقاومة ما بين الانود والكاثود للوصلة الثنائية صغير جدا مما يسمح بالتغلب على الجهد الحاجز ما بين البلورة الموجبة والبلورة السالبة بوضع جهد صغير أكبر من ٠,٧ فولت فيؤدى ذلك الى مرور التيار الكهربى.

٢-٢-٢ التوصيل الخلفى للوصلة الثنائية (Reverse bias):

في هذا النوع من التوصيل يتم توصيل القطب الموجب من الوصلة الثنائية (الانود) بالقطب السالب للبطارية ويتم توصيل القطب السالب للوصلة الثنائية (الكاثود) بالقطب الموجب للبطارية ويقال في هذه الحالة ان الديود في حالة انخياز عكسى او في حالة توصيل خلفى كما هو مبين بالشكل ٨-٢ وفى هذا النوع من التوصيل تكون المقاومة ما بين الانود والكاثود للوصلة الثنائية كبيرة جدا مما يؤدى الى مرور تيار صغير جدا يسمى بتيار التسرب (Leakage current) ويمكن زيادة ذلك التيار بزيادة الجهد المسلط على الديود حتى نصل الى جهد الانهيار العكسى (Break over voltage) وفى هذه الحالة يمر تيار كبير جدا ويفقد الديود (الموحد) خواصه ويمكن رؤية خواص الديود في حالة التوصيل الامامى والعكسى في الشكل ٩-٢ حيث تم رسم العلاقة ما بين الجهد المسلط على الديود (V_{ak}) والتيار المار به (I_A) نتيجة لطريقة التوصيل ويلاحظ انه في حالة التوصيل الامامى فان التيار المار به يتزايد زيادة غير خطية مع تزايد الجهد المسلط على الديود اما في التوصيل الخلفى فان التيار المار يكون صغيرا جدا حيث لا يزيد عن بضعة مللى امبيرات حتى يصل الجهد الى جهد الانهيار العكسى عندها يتزايد التيار بصورة كبيرة وتفقد الوصلة الثنائية خواصها وتصبح غير صالحة للاستخدام مرة اخرى.



شكل ٨-٢ التوصيل الامامى والتوصيل الخلفى للوصلة الثنائية

٣-٢ أنواع موحّدات القدرة:

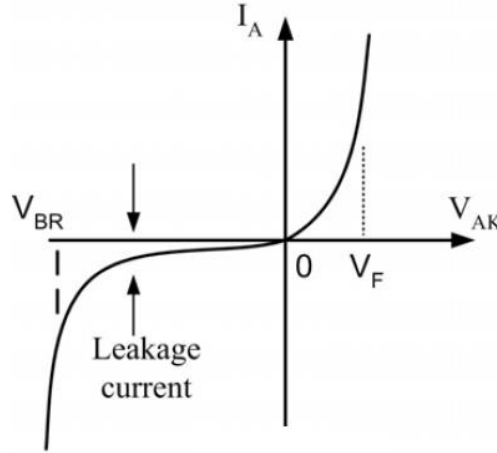
توجد انواع عديدة للمقومات الكهربائية (Diodes) ويختلف تصنيعها اعتمادا على التطبيق المستخدمة به فمنها على سبيل المثال لا الحصر الديود النفقى والديود السعوى وديود الزينر وديود القدرة لكننا هنا سوف نركز على ديود القدرة باعتبار اننا نتحدث عن الجبر الكهربى. بالنظر الى تلك الأنواع (موحّدات القدرة) نجد انه

يمكن تقسيمه الى ثلاثة أنواع رئيسية تختلف في خواصها باختلاف نوع التطبيق المستخدمة به وهذه الانواع هي:-

١. موحد الأغراض العامة (General purpose diode)

٢. موحد سريع الاستعادة (Fast recovery diode)

٣. موحد شوتكي (Schottky diode)



شكل ٩-٢ خواص الأداء للموحد السيليكوني

١-٣-٢ دايود الأغراض العامة:

هو دايود يعرف باسم الموحد السيليكوني ويعمل عند الترددات التي تقل عن واحد كيلو هرتز وتمتاز هذه الموحّدات برخص ثمنها كما انها تعمل على جهود مرتفعة تتجاوز الخمسة الاف فولت وثلاثة الالاف امبير وعلى ذلك فهي مناسبة في استخدامات الجبر الكهربى والشكل ١٠-٢ يبين عددا من هذه الموحّدات.



شكل ١٠-٢ بعض دايودات الأغراض العامة

٢-٣-٢ الدايود سريع الاستعادة:

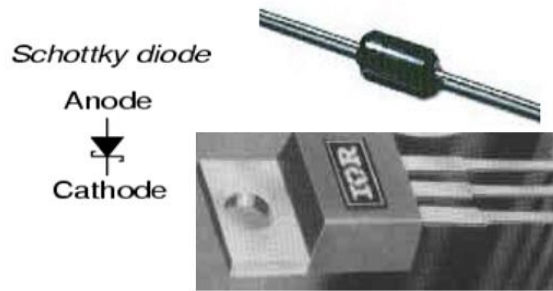
يتميز هذا النوع عن النوع السابق بأنه سريع الاستعادة للحالة التي كان عليها من ناحية الفصل أو التوصيل ولذلك يستخدم في التطبيقات التي تتطلب ترددا مرتفعا حيث يمكن التغير من حالة الفصل الى حالة التوصيل وبالعكس في زمن لا يتجاوز خمسة ميكرو ثانية ويعمل هذا الموحد عند جهود تصل الى ثلاثة الالاف فولت وقد يصل تياره الى ألف امبير والشكل ١١-٢ يوضح اشكال مختلفة لهذا النوع.



شكل ١١-٢ اشكال مختلفة للدايود سريع الاستجابة

٣-٣-٢ دايود شوتكي:

من اهم خصائص ذلك النوع ان تيار التسرب له مرتفع نوعا ما مما يجعل جهد الكسر العكسي له منخفض مقارنة بالأنواع الأخرى لذلك يستخدم في التطبيقات التي تتطلب تيارا مرتفعا مع جهد منخفض وقد يصل الجهد الذي يعمل عنده الى ٢٠٠ فولت وتياره الى ٣٠٠ امبير والشكل رقم ١٢-٢ يوضح بعض اشكال هذه الموحدات.



شكل ١٢-٢ الشوتكي دايود

٢-٤ التأكد من سلامة الديود للعمل:

للكشف عما إذا كان الدايود معطوبا ام لا يتم ضبط الأفوميتر على وضع الـ Buzzer ثم نقيس قيمة المقاومة الداخلية للموحد في الاتجاهين فلا بد أن يعطي في أحد الاتجاهين قيمة صغيرة للمقاومة وفي الاتجاه الآخر يعطى مقاومة كبيرة جدا أي open circuit هذا إذا كان الموحد سليم اما اى شيء اخر يعنى ان الدايود تالف. والشكل ٢-١٣ يبين طريقة اختبار الديود كما أشرنا في هذه الفقرة



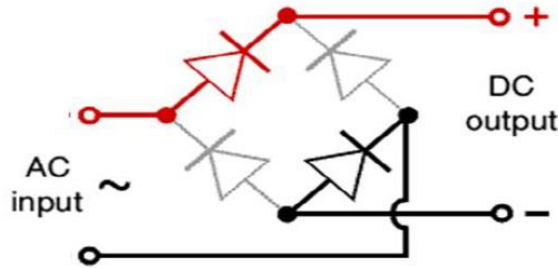
القراءة عند التوصيل الامامى

القراءة عند التوصيل العكسى

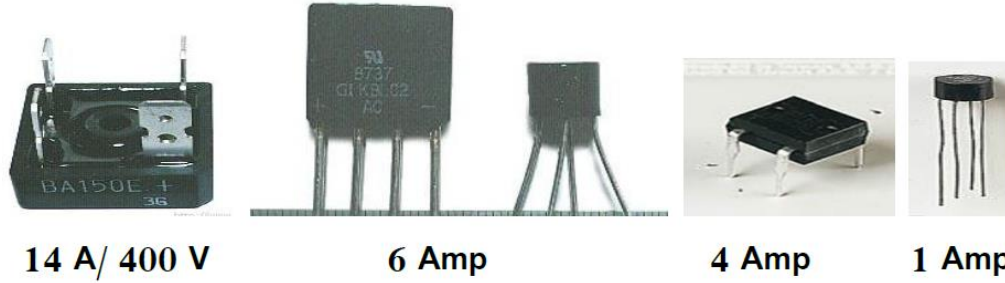
شكل ٢-١٣ طريق اختبار الديود باستخدام الافوميتر

٢-٥ قنطرة التوحيد Rectifier bridge:

تتكون قنطرة التوحيد من عدد ٤ دايود موصلين كما بالشكل ٢-١٤ ويخرج من القنطرة أربعة أطراف اثنين منهما يمثلان الدخل الذى هو عبارة عن تيار متردد وبينهما الرمز ~ والطرفان الاخران يمثلان الخرج هو ناتج الجهد بعد ان تم تحويله من جهد متردد الى جهد مستمر ويرمز للطرف الموجب بالرمز + اما الطرف السالب فيرمز له بالرمز - والشكل ٢-١٥ يوضح بعض الاشكال الحقيقية لقنطرة التوحيد.



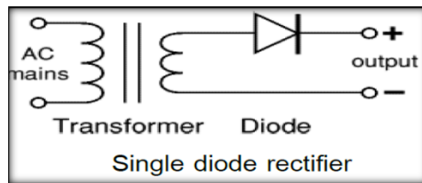
شكل ٢-١٤ رسم توضيحي لقنطرة التوحيد



شكل ١٥-٢ مجموعة من قناطر التوحيد مختلفة السعة

٦-٢ تطبيقات الموحد السيليكوني في دوائر الجبر الكهربى:

ان من أشهر الدوائر التي يستخدم فيها الديود (الموحد السيليكوني) في تطبيقات الجبر الكهربى هي دوائر التقويم حيث يتم تحويل التيار المتردد الى تيار مستمر من اجل تغذية محركات الجبر ذات التيار المستمر بالقدرة المطلوبة أيضا تستخدم مثل هذه الدوائر في شحن بطاريات التيار المستمر وكشافات الانارة وتعدد اشكال دوائر التقويم فمنها التقويم النصف موجى وتقويم الموجة الكاملة وتفضل عملية التقويم الأخيرة لنظرا لسعتها الكهربائية واقترابها من الشكل المثالى للتيار المستمر والشكل رقم ١٦-٢ يبين الخرج الناتج من التقويم النصف موجى والشكل الاصطلاحي لتلك الدوائر.



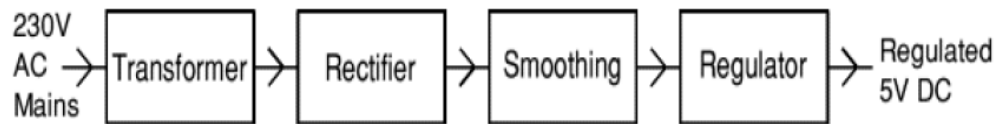
الشكل الاصطلاحي للدائرة



شكل الجهد الناتج او التيار

شكل ١٦-٢ تقويم نصف موجى الشكل الاصطلاحي للدائرة وشكل الجهد الناتج او التيار

ونظرا لأننا نتعامل مع تطبيقات الجبر الكهربى فإننا سوف نركز على دوائر التقويم ذات الموجة الكاملة والشكل ١٧-٢ يوضح مخطط صندوقى لهذه النوع من أنواع التقويم وسوف نوضح مراحلها بشئ من التفصيل.



Block Diagram of a Regulated Power Supply System

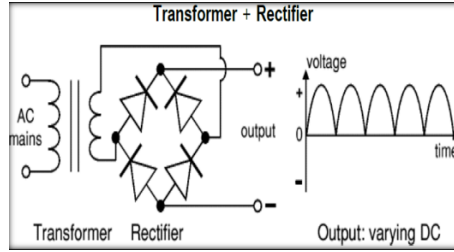
شكل ١٧-٢ المخطط الصندوقى لدائرة التقويم ذات الموجة الكاملة

من المخطط الصندوقى يتضح ان الحصول على جهد مستمر من جهد متردد لابد ان يمر عبر مجموعة من المراحل تلك المراحل هي

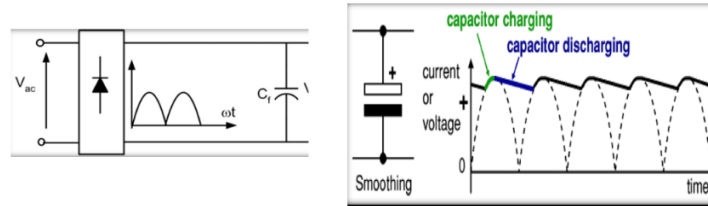
١. عملية تحويل الجهد المتردد وهو جهد المصدر الى جهد مناسب باستخدام محول كهربى.
٢. تحويل الجهد المتردد الى جهد مستمر.
٣. نظرا لان الجهد المستمر الناتج من عملية التقويم في الخطوة السابقة أقرب ما يكون الى النبضات لذلك سوف يتم عمل تنعيم له في هذه المرحلة.
٤. ياتى أخير دور عملية التنظيم (Regulator) حيث انه سوف يتم مزيدا من الضبط للجهد باستخدام

ويمكن إضافة مزيدا من الايضاح على عملية التقويم كالتالى

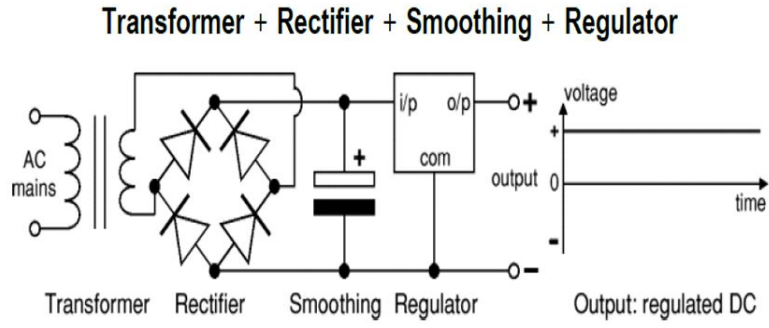
يتم تسليط الجهد الرئيسى على المحول الكهربى الذى ربما يستخدم في رفع او خفض الجهد طبقا لجهود متطلبات الحمل والجهد الناتج من المحول الكهربى يتم تقويمه باستخدام قنطرة توحيد كما بالشكل ١٨-٢ لينتج الجهد بالصورة التى بنفس الشكل هذا الجهد غير مناسب نظرا لاحتوائه على تموجات مرتفعة وعلى ذلك لابد من الحد من تلك الموحّدات قدر الإمكان وبناء على ذلك لابد من استخدام مكثف ليقوم بعملية تنعيم الجهد كما يتضح من الشكل ١٩-٢ هذا الجهد وان اصبح بصورة افضل الا انه يمكن إضافة مزيد من التحسين عليه باستخدام منظم الجهد ويمكن رؤية الشكل الناتج للجهد بعد استخدام ذلك العنصر الالكترونى بالشكل ٢٠-٢.



شكل ١٨-٢ شكل المحول الكهربى مع قنطرة التوحيد والجهد الناتج بعد استخدام القنطرة



شكل ١٩-٢ شكل الجهد الناتج بعد استخدام مكثف التنعيم مقارنة بقبل استخدام المكثف



شكل ٢٠-٢ الجهد بعد استخدام منظم الجهد

ومنظم الجهد هذا عبارة عن شريحة لها ثلاثة أطراف أحدهما دخل ويرمز له بالرمز I والأخر خرج ويرمز له بالرمز O اما الثالث فهو عباره عن الارضى ويرمز لمنظم الجهد تجاريا بالرمز 78XX إذا كان خرج جهد موجب اما إذا كان جهد الخرج له سالبا فيرمز له بالرمز 79XX وترمز XX الى الجهد المطلوب انتاجه من منظم الجهد والتالى يوضح امثلة لبعض منظّمات الجهد الموجب

المنظم 7805A يعطى خرجا جهد موجب مقداره +٥ فولت وتيار حمل ٠,١ امبير

المنظم 7812B يعطى خرجا جهد موجب مقداره +١٢ فولت وتيار حمل ٠,٥ امبير

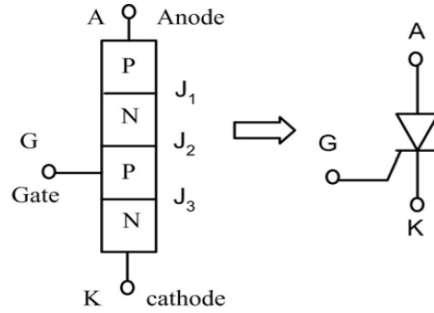
المنظم 7815C يعطى خرجا جهد موجب مقداره +١٥ فولت وتيار حمل ١,٥ امبير

٧-٢ الثايرستور (Silicon controlled rectifier (SCR):

يعتبر الثايرستور من أقدم العناصر الالكترونية التي تمت صناعتها في مجال الكترونات القوى حيث يعمل كمفتاح مثالى في دوائر القوى اى يصبح مفتاح مغلق في حالة التوصيل الأمامي ومفتوح في حالة التوصيل الخلفى ويعتبر الثايرستور من أكثر أنواع العناصر الالكترونية المستخدمة في دوائر الجر الكهربى لما يتمتع به من تشغيل عند جهود مرتفعة تصل الى الاف الفولتات كما انها تتحمل تيارات مرتفعة تصل الى الاف الامبيرات.

١-٧-٢ تركيب الثايرستور وتشغيله:

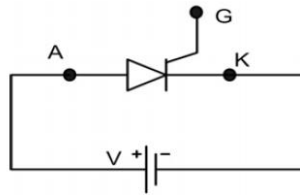
يتكون الثايرستور من أربع طبقات يطلق عليها PNPN وثلاثة وصلات (Junctions) J_1, J_2, J_3 وثلاثة أطراف هي الانود (A) والكاثود (K) والبوابة (G) Gate ويمكن رؤية هذه التفاصيل بالشكل ٢١-٢ ويوضح ذلك الشكل أيضا الرمز الذى يرسم به الثايرستور في الدوائر الالكترونية والمرسوم جهة اليمين.



شكل ٢١-٢ تركيب الثيرستور ورمزه في الدوائر الالكترونية

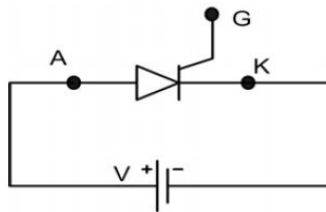
وللثيرستور ثلاث حالات تشغيل هي حالة الإعاقة الامامية وحالة الإعاقة الخلفية وحالة التوصيل الامامية.

أولا حالة الإعاقة الامامية: ففي هذه الحالة يوصل الانود بالجهد الموجب ويوصل الكاثود بالجهد السالب فتكون الوصلات الأولى J_1 والثالثة J_3 في حالة توصيل أمامي اما الوصلة الثانية J_2 فتكون في حالة توصيل خلفي وفي هذه الحالة لا يمر بالثيرستور الا تيارا صغيرا يسمى تيار التسرب ويمكن رؤية ذلك النوع من التوصيل بالشكل ٢٢-٢



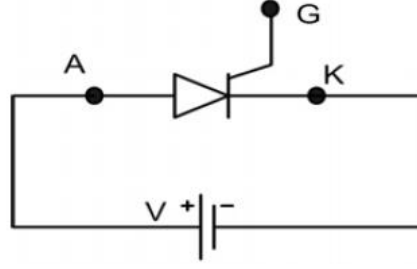
شكل ٢٢-٢ توصيل الإعاقة الامامية للثيرستور

ثانيا حالة الإعاقة الخلفية: ففي هذه الحالة يوصل الانود بالجهد السالب ويوصل الكاثود بالجهد الموجب فتكون الوصلات الأولى J_1 والثالثة J_3 في حالة توصيل خلفي اما الوصلة الثانية J_2 فتكون في حالة توصيل أمامي وفي هذه الحالة لا يمر بالثيرستور الا تيارا صغيرا يسمى التيار العكسي ويمكن رؤية ذلك النوع من التوصيل بالشكل ٢٣-٢



شكل ٢٣-٢ توصيل الإعاقة الخلفية للثيرستور

ثالثا حالة التوصيل الامامى: ففي هذه الحالة يوصل الانود بالجهد الموجب ويوصل الكاثود بالجهد السالب فتكون الوصلات الأولى J_1 والثالثة J_3 في حالة توصيل أمامي ويطبق جهد موجب ما بين البوابة والكاثود وعلى هذا تكون الوصلة الثانية J_2 فتكون في حالة توصيل أمامي أيضا وفي هذه الحالة يمر بالثيристور تيارا تعتمد قيمته على قيمة الجهد المسلط والحمل الموصل بالثيристور ويمكن رؤية ذلك النوع من التوصيل بالشكل ٢٤-٢



شكل ٢٤-٢ التوصيل الامامى للثيристور

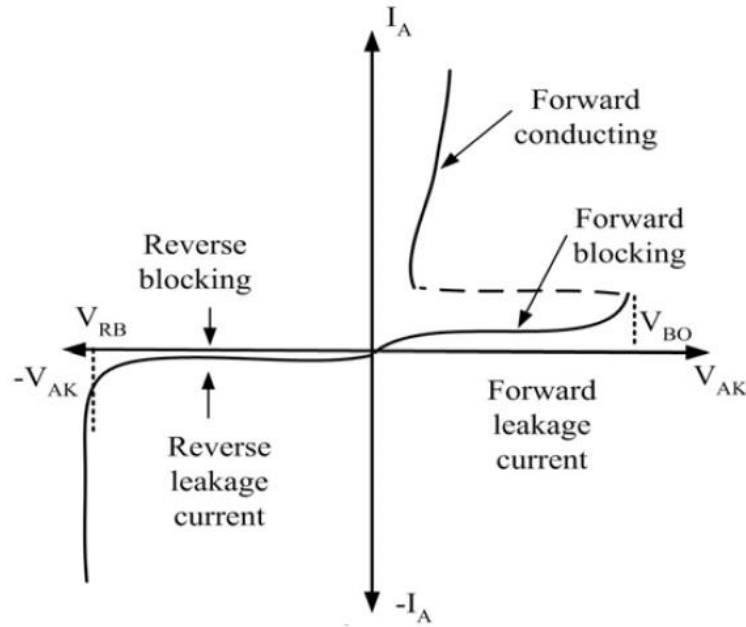
٢-٧-٢ خواص الأداء للثيристور Thyristor characteristics:

المقصود خواص الاداء للثيристور هو إيجاد العلاقة ما بين الجهد المسلط عليه والتيار المار خلاله فالشكل ٢-٢٥ يبين تلك العلاقة ويمكن شرح كيف تم الحصول على ذلك المنحنى من خلال التوصيل الامامى والتوصيل الخلفى للثيристور.

ففي حالة الاعاقة الامامية وهي تتم كما ذكرنا سابقا بتسليط جهد كهربى ما بين الانود والكاثود حيث يتم توصيل الانود بالجهد الموجب والكاثود بالجهد السالب دون توصيل البوابة باى جهد او بتعبير اخر عندما يكون جهد الانود اعلى من جهد الكاثود نجد انه يمر تيار صغير يسمى تيار التسرب (Leakage current) وبزيادة ذلك الجهد يزيد تيار التسرب زيادة طفيفة جدا الى ان نصل الى الجهد الذى يسبب انهيارا في الوصلات الداخلية للثيристور وبناء على ذلك يزداد التيار بسرعة وتكون تلك الزيادة غير خطية ويسمى الجهد الذى تبدأ عنده تلك الزيادة بجهد الانحياز الامامى V_{BO} (Break over voltage) ويسمى التيار المتولد عند ذلك الجهد تيار الانحياز الامامى I_{BO} ويبدأ التيار بالزيادة ويسمى ذلك التيار بتيار التوصيل الامامى (Forward current) والسبب في حدوث ذلك هو انهيار الوصلة الثانية ما بين البوابة والكاثود التي كانت في حالة توصيل عكسى وبشكل عام فان التيار المار في الثيристور في هذه اللحظة يعتمد على قيمة مقاومة الحمل وعند زيادة مقاومة

الحمل بصورة تدريجية ينخفض التيار الى ان يصل الى التيار الماسك (I_H Holding current) وفي هذه الحالة يصل التيار الى حالة الإعاقة الامامية.

اما في حالة التوصيل الخلفى او الإعاقة الخلفية ويتم ذلك كما ذكرنا سابقا بتوصيل الانود بالجهد السالب والكاثود بالجهد الموجب دون توصيل البوابة باى جهد اى ان جهد الكاثود يكون اعلى من جهد الانود نجد انه يمر تيار صغير يسمى تيار التسرب (Leakage current) وبزيادة الجهد المسلط على الثيرستور يزداد تيار التسرب زيادة طفيفة جدا الى ان نصل الى الجهد الذى يسبب انهيارا في الوصلات الداخلية للثيرستور وهو جهد الانهيار العكسى فيمر تيار كبيرا دون حدوث اية مشكلة بالثيرستور ولكن عند زيادة الجهد اكثر من ذلك يتلف الثيرستور.

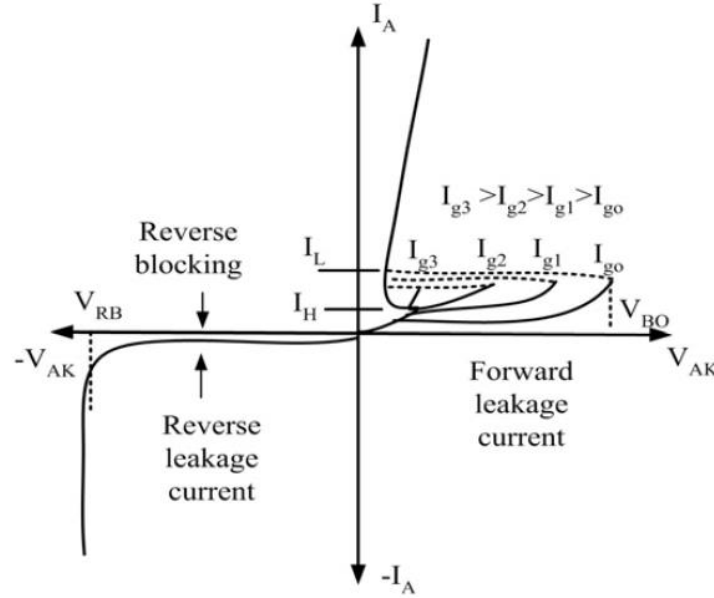


شكل ٢-٢٥ خواص تشغيل الثيرستور

٢-٧-٣ خواص الأداء للثيرستور في حال تسليط جهد ما بين البوابة والكاثود (حالة التوصيل الامامى):

يوضح الشكل ٢-٢٦ خواص تشغيل الثيرستور عند تشغيل دائرة البوابة اماميا وتوصيل الانود بالقطب الموجب والكاثود بالجهد السالب للبطارية او عندما يكون جهد المسلط على الانود اعلى من الجهد المسلط على الكاثود فيما يسمى باسم التوصيل الامامى للثيرستور حيث نجد انه مع الزيادة في تيار البوابة ينخفض جهد التوصيل الامامى للثيرستور حتى يصبح مشابها تماما لخواص الديود في حالة التوصيل الامامى وتجدر الإشارة الى انه اذا تم توصيل الثيرستور فان زيادة تيار دائرة البوابة لن يؤثر على حالة تشغيل الثيرستور كما

ان إزالة تيار البوابة لن يؤثر على عمل الثيرستور حينما يكون في وضع التوصيل الامامى كما تجدر الإشارة الى ان تيار الثيرستور يجب ان لا يقل عن تيار التعشيق (I_L) حتى يظل الثيرستور في حالة توصيل امامى وتجدر الإشارة الى ان تيار التعشيق يجب ان يكون اكبر من تيار الماسك ($I_L > I_H$)



شكل ٢-٢٦ خواص تشغيل الثيرستور مع توصيل دائرة البوابة

٨-٢ طرق اشعال الثيرستور Thyristor firing:

حتى يصبح الثيرستور مشتعلًا لابد ان يصبح تيار الثيرستور أكبر من تيار التعشيق ويحدث ذلك نتيجة لظروف مرغوب فيها وظروف غير مرغوب فيها وعلى ذلك لابد من دراسة تلك الظروف حتى يمكننا تشغيل الثيرستور بأمان وهنا سوف نشرح كيفية تشغيل الثيرستور

الاشعال بالحرارة: ان الحرارة الزائدة قد تؤدي الى تشغيل الثيرستور وهذا النوع من التشغيل غير مرغوب فيه لذلك لابد من التخلص من الحرارة الزائدة حتى نتجنب هذا النوع من التشغيل الذى ربما يؤدي الى حدوث بعض المشاكل لذلك فان استخدام قطعة معدنية لسحب الحرارة يكون مفيدا في هذه الحالة (Heat sink).

الاشعال بالضوء: يمكن اشعال الثيرستور عن طريق تسليط الضوء على الوصلة J_2 الموجودة بالثيرستور وهو ما تم عمله في بعض أنواع الثيرستور مثل المتحكم السيليكونى المثار بالضوء Light activated silicon controlled rectifier LASCR

الاشعال بالجهد: من دراستنا لخواص الثيرستور وجدنا ان الزيادة الكبيرة للجهد تعمل على اشعال الثيرستور بل من الممكن ان تؤدي الى تدميره لذلك يجب ان لا يتم تسليط جهد زائد على الثيرستور

الاشعال بمعدل الجهد المسلط dv/dt : يزداد الجهد المسلط بالتدرج لتشغيل الثيرستور ولكن إذا زاد الجهد من ٢٠ الى ٢٠٠ فولت لكل ميكرو ثانية فان ذلك من الممكن ان يؤدي الى اشعال الثيرستور ولان ذلك الاشعال غير مرغوب فيه فأنه علينا ان نتجنب ذلك.

الاشعال بتيار البوابة: عند تسليط جهد مناسب على دائرة البوابة وامرار تيار مناسب فان ذلك سوف يؤدي الى اشعال الثيرستور وذلك النوع من الأنواع المرغوب فيها لتشغيل الثيرستور. وتجدر الإشارة الى ان الحدود المسموح بها لتيار البوابة يكون ما بين ١, الى ٥٠ مللى امبير.

٢-٨-١ دوائر الاشعال الخاصة بالثيرستور Firing circuit:

لإنجاح عملية الاشعال الخاصة بالثيرستور فان ذلك يتطلب شروط معينة تخص دائرة الاشعال من ناحية عرض النبضة وارتفاعها اى قيمتها والفترة الزمنية التي يجب ان لا تقل عنها عرض تلك النبضة وان يكون زمن الصعود قصير كما يجب ان تطبق هذه النبضة في حالة الانحياز الامامى للثيرستور فقط.

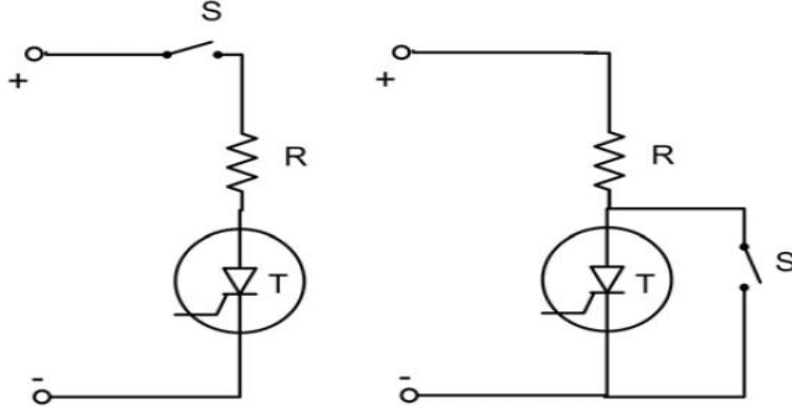
اما بخصوص دوائر الاشعال فيمكن تقسيم هذه الدوائر الى

- دوائر الاشعال بالتيار المستمر
- دوائر الاشعال بالتيار المتردد
- دوائر الاشعال بالنبضات

٢-٩ طرق اخماد الثيرستور Thyristor firing:

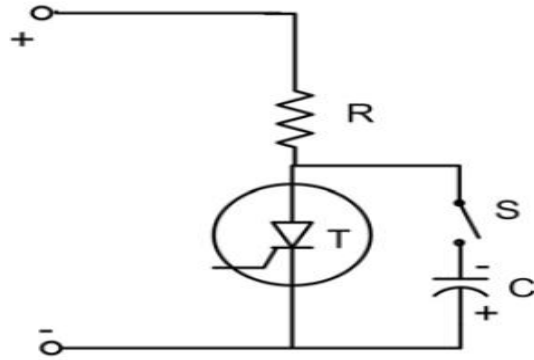
لكي يتم اطفاء الثيرستور يجب ان يقل التيار المار به عن تيار الإمساك (I_H) ويتم ذلك اما طبيعيا عن طريق ان ينعكس الجهد من تلقاء نفسه كما في موجات الجهد المتردد او عن طريق اجبار الثيرستور على الإطفاء باستخدام دوائر مساعدة كما في دوائر التيار المستمر ويمكن توضيح ذلك في التالى: -

أولا الإطفاء الطبيعي (Natural commutation): ويمكن الوصول الى ذلك بتوصيل مفتاح على التوالي مع الثيرستور وعند فتحه يتم عمل إطفاء لدائرة الثيرستور او بتوصيل مفتاح على التوازي مع الثيرستور وعند غلقه يتم إطفاء الثيرستور كما يتضح من الدائرة بالشكل ٢-٢٧ الا انه فى هذه الطريقة عند وضع المفتاح الى وضعه الاصلى قد تسبب ارتفاع معدل التغير في الجهد الى اشعال الثيرستور مرة أخرى.



شكل ٢٧-٢ طرق اخماد الثيرستور الطبيعية

ثانيا الإطفاء القسري (Forced commutation): في هذه الطريقة يتم تسليط جهد عكسي على الثيرستور لإجبار التيار على النزول لقيمة اقل من تيار الماسك وبذلك يتم اخماد الثيرستور وتعتبر الدائرة الموجودة بالشكل ٢٨-٢ ابسط أنواع الدوائر المستخدمة في ذلك حيث يكون المكثف مشحونا بجهد عكسي فعند غلق المفتاح يطبق ذلك الجهد على الثيرستور ويتم إطفائه قسريا.



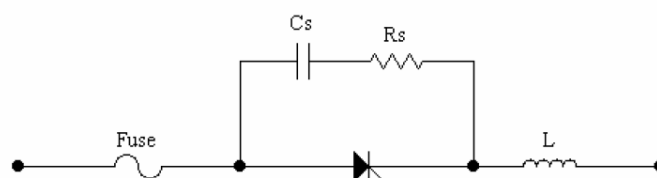
شكل ٢٨-٢ دائرة اخماد الثيرستور قسريا

١٠-٢ حماية الثيرستور Thyristor protection:

توجد العديد من الطرق للوقاية من زيادة الجهد والتيار للثيرستور حيث يتسبب زيادة الجهد او التيار او كليهما في ارتفاع درجة حرارة الثيرستور وذلك نظرا لانخفاض السعة الحرارية له ولا بد من استخدام وسيلة مناسبة لامتناس تلك الحرارة المتولدة مثل الالواح المعدنية (Heat sink) ومن المفضل عمل الثيرستور تحت الحدود المصمم للعمل عليها وذلك تجنباً للزيادة الفجائية للتيار وارتفاع الجهد والتخلص من مشكلة الجهود

العابرة التي قد تتعرض لها الكروت الالكترونية وسنذكر في التالى الحماية المفضل استخدامها مع الثيرستور من اجل تشغيله بأمان.

الحماية ضد زيادة التيار والجهد: توجد العديد من وسائل الحماية من ارتفاع التيار حيث يتوقف ذلك على شدة التيار وشكله وشكل تلك الزيادة ومعدل التغير في تلك الزيادة بالنسبة للزمن (di/dt) فاذا كان التيار مرتفعا ارتفاعا كبيرا أدى ذلك الى زيادة كبيرة في درجة حرارة الثيرستور ومن الممكن ان يؤدي الى تلفه لحظيا لذلك تستخدم فيوز من النوع سريعة الفصل ويراعى عند اختيار ذلك النوع من الفيوز ان تكون القيمة المقننة لتيار الفيوز اقل قليلا من القيمة العظمى لتيار الثيرستور ويتم توصيل الفيوز على التوالي مع الثيرستور اما عند تعرض الثيرستور لتيار عالى ولكن اقل شدة فان تأثيره لن يكون لحظيا لذلك نستخدم قاطع تيار مناسب اما اذا كان معدل التغير في التيار مرتفعا وسريعا فيتم التغلب على ذلك باستخدام ملف يوصل على التوالي مع الثيرستور أيضا ومع تعرض الثيرستور لارتفاعات في الجهد او التغير سريع في الجهد بالنسبة للزمن فأننا سوف نستخدم دائرة توصيل على التوازي مع الثيرستور (Snubber circuit) لامتناس ذلك التغير والشكل ٢٩-٢ يبين توصيل تلك الحماية الخاصة بالثيرستور.

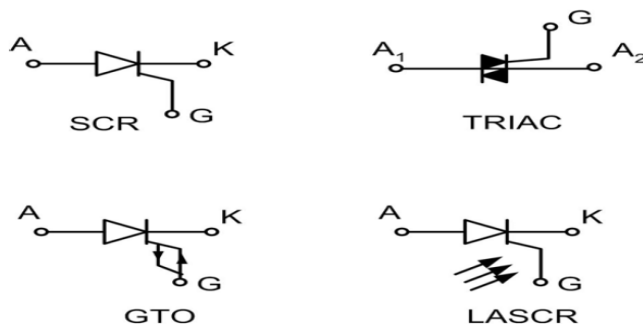


شكل ٢٩-٢ الحماية الخاصة بالثيرستور وطريقة توصيلها

١١-٢ أنواع الثيرستور Thyristor types

تتعدد انواع الثيرستور الا انها تتفق في انها مكونة من ثلاثة أطراف كما المحنا سابقا الانود والكاثود والبوابة وتختلف في حالة تشغيلها سواء من الفصل للتشغيل او من التشغيل للفصل فمنها الثيرستور السريع وهو ثيرستور يتميز بانه سريع الفصل والتوصيل (Fast switching thyristor) ومنها الثيرستور العادى (Silicon controlled rectifier) الذى يستخدم في التطبيقات المعتادة الخاصة بالتقويم المحكوم وأيضا يوجد الثيرستور الذى يعمل تحت تأثير الضوء (Light activated silicon controlled rectifier) كما ان الثيرستور ذو البوابة المغلقة هو الأكثر استخداما في مجال الجر الكهربى (Gate turn off silicon controlled rectifier) لأنه يتميز بتحملة للجهود المرتفعة وذات سعة تيارات عالية كما انه لا يحتاج لدوائر إطفاء خاصة اى انه سهل الاشعال وسهل الفصل ومن الأنواع الأخرى للثيرستور الترياك وهو يستخدم

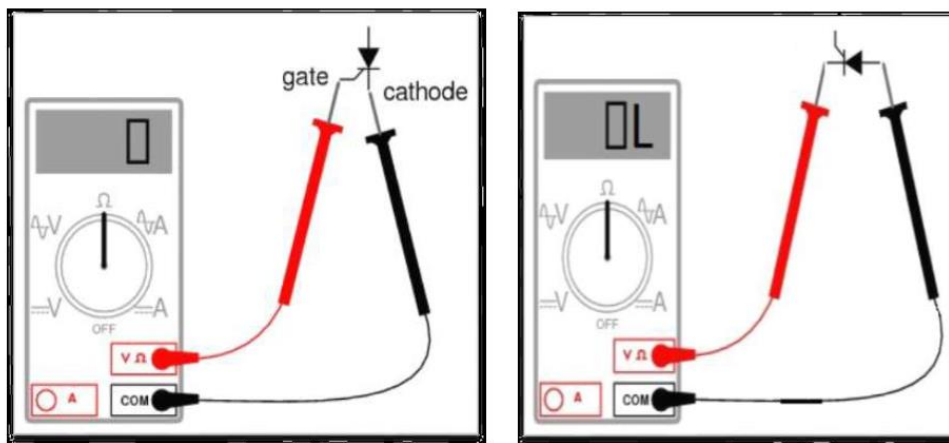
لتوصيل التيار في الاتجاه الامامى والاتجاه العكسى (Bidirectional triode thyristor) والشكل ٣٠-٢ يوضح الرموز الاليكترونية للأنواع السابق ذكرها من الثيرستور عند رسمها بالدوائر الاليكترونية.



شكل ٣٠-٢ الأنواع المختلفة للثيرستور

١٢-٢ التأكد من سلامة الثيرستور:

للتأكد من سلامة الثيرستور فانه يجب علينا قياس المقاومة ما بين البوابة والكاثود فنجد انها في الاتجاه الامامى تعطى مقاومة صغيرة وفى الاتجاه الخلفى تعطى مقاومة كبير اى تظهر كان الدائرة مفتوحة ويعطى الافوميتر الرمز التالى OL اما عند قياس المقاومة ما بين الانود والكاثود والعكس فيعطى مقاومة كبيرة اى تظهر على الافوميتر أيضا OL ويمكن رؤية ذلك في الشكل ٣١-٢.

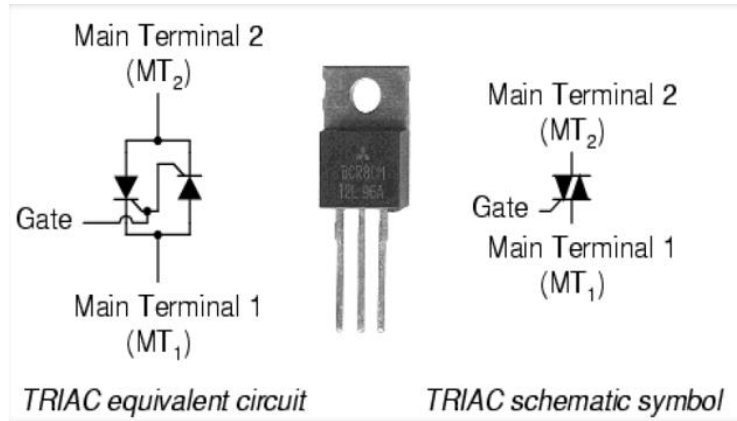


شكل ٣١-٢ طريقة التعرف على حالة الثيرستور

وتجدر الإشارة هنا ان للثيرستور استخدامات عديدة منها الحماية من الجهد العابر والتحكم في سرعة محركات الجر ذات التيار المستمر.

١٣-٢ الترياك Triak:

من الشكل ٣٢-٢ يتضح ان الترياك يمثل عدد ٢ ثيرستور موصلين معا توصيلا خلفيا اى الانود الخاص بالثيرستور الأول متصل بالكاثود الخاص بالثيرستور الثانى والكاثود بالثيرستور الأول متصلا بالأنود الخاص بالثيرستور الثانى والترياك له ثلاثة أطراف ويتم التحكم فيه عن طريق دائرة البوابة وهو يشبه الثيرستور في انه يتكون من عدة طبقات والشكل ٣٢-٢ يوضح الشكل الحقيقى للترياك ورمزه في الدائرة الالكترونية. ومن خواص الترياك انه يسمح بالتوصيل في الاتجاهين اى انه يعمل على التحكم في نصف الموجة الموجبة ونصف الموجة السالبة اى ان موجة التيار او الجهد تمر من الطرف T_1 الى الطرف T_2 اذا كان جهد الطرف T_1 اعلى من جهد الطرف T_2 وتم تسليط النبضة الكهربائية ما بين الطرف T_2 والبوابة G كما انه يمكن امرار الجهد والتيار ما بين الطرف T_2 الى الطرف T_1 اذا كان جهد الطرف T_2 الى جهد الطرف T_1 موجبا وتم تسليط النبضة الكهربائية ما بين الطرف T_1 والبوابة G وللترياك استخدامات عديدة نذكر منها استخدامه للتحكم في سرعة محركات التيار المتردد المنخفضة ومتوسطة القدرة.



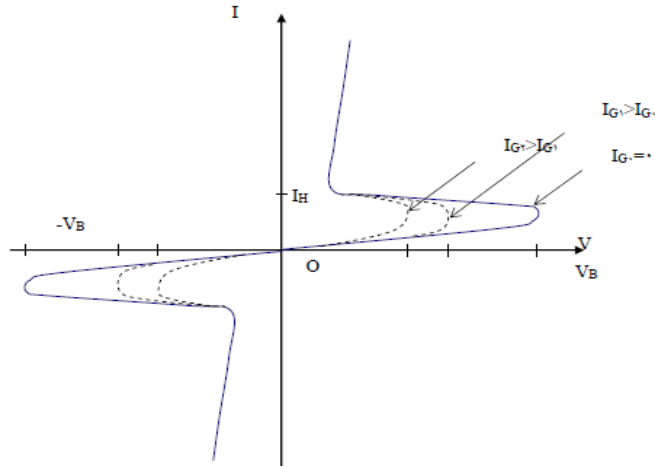
شكل ٣٢-٢ الترياك توصيله من الداخل ورمزه في الدوائر الالكترونية وشكله الحقيقى

اما الشكل ٣٣-٢ فهو يوضح خواص الأداء الترياك اى العلاقة ما بين الجهد على اطراف الترياك والتيار المار به نتيجة تسليط جهد بين طرفيه وتسليط نبضة كهربية على دائرة البوابة وعند عدم تسليط نبضة البوابة حيث يلاحظ تشابه هذه العلاقة ما بين الترياك والثيرستور وذلك خلال نصف الموجة الموجبة اى في حالة التوصيل الامامى ونظرا لان الترياك مجهز للعمل في الاتجاهين فنلاحظ تشابه الخواص في نصف الموجة السالبة مع نصف الموجة الموجبة وهو ما يشذ عن الثيرستور الذى يعمل على نصف الموجة الموجبة فقط وللحصول على نفس الخواص من الثيرستور لابد من توصيل خلفى لثيرستور اخر يعمل على نصف الموجة

السالبة أى ان الترياك كما شرحنا سابقا يمكن اعتباره عباره عن اثنين ثيرستور موصلين توصيلا خلفيا ويعتبر هذا اوفر من الناحية الاقتصادية حيث تكلفة استخدام ترياك اقل من تكلفة استخدام عدد اثنين من الثيرستور موصلين توصيلا خلفيا الا ان العيب في استخدام الترياك هو عدم توفره بتيارات وجهود مرتفعة مثل الثيرستور لذلك في حال العمل على جهود وتيارات مرتفعة تصل الى عدة الاف من فولتات وعدة الاف من امبيرات فانه لابد من استخدام عدد اثنين ثيرستور موصلين توصيلا خلفين في كل وجه من أوجه مصدر القدرة.

٢-١٣-١ الجهد الناتج عن توصيل الترياك بدائرة القوى:

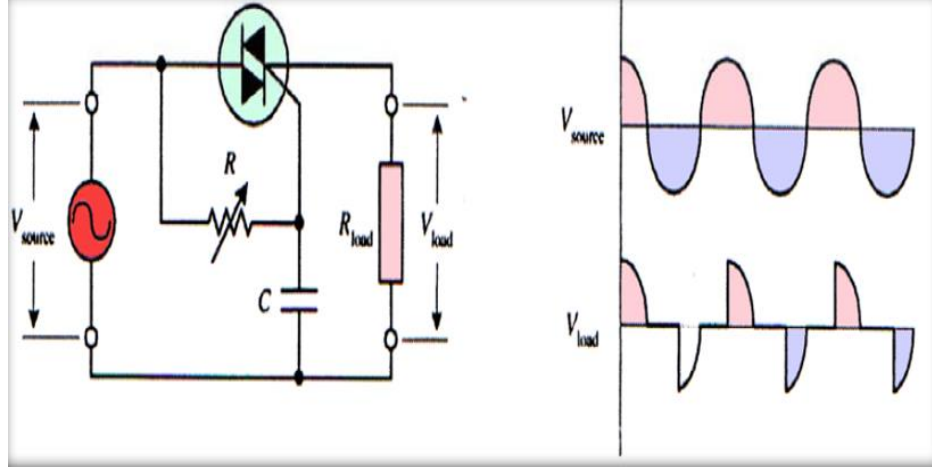
الشكل ٢-٣٤ يوضح شكل الجهد الناتج عن الترياك حال توصيله بدوائر التيار المتردد حيث لا يستجيب الترياك للجهد المسلط عليه في الدوائر العملية الا بعد تسليط النبضة الكهربائية وعلى أساس مقدار تلك النبضة وفترة تسليطها فانه ينتج الجهد ويتم تسليطه على الحمل ونظرا لاختلاف القيمة الفعالة الخاصة بذلك الجهد على أساس ما تم الحديث عنه يمكن التحكم في الحمل فاذا كان الحمل عبارة عن محرك من محركات التيار المتردد امكن التحكم في سرعته.



شكل ٢-٣٣ خواص الترياك

٢-١٣-٢ اختبار صلاحية الترياك للعمل:

لمعرفة ما إذا كان الترياك لا يزال صالح للعمل او أصبح تالفا فإننا نقوم بقياس قيمة المقاومة ما بين الطرف T_1 والبوابة G في الاتجاهين فنلاحظ ان الافوميتر يعطى قراءة في احدى الحالات وفى الحالة الأخرى يعطى OL أى ان الدائرة مفتوحة نفس الامر يتكرر عند استخدام الافوميتر مع الطرف الاخر T_2 والبوابة G .



شكل ٢-٣٤ شكل الجهد الناتج من الترياك حال عمله تحت تأثير النبضة الكهربائية

١٤-٢ الدياك Diac:

يعتبر الدياك مشابه للديود حيث ان له طرفان توصيل الا انه يمرر التيار في الاتجاهين اي انه يعمل كمفتاح ذو وضعين للتوصيل وعلى ذلك فيمكن اعتباره دايود مقسوم لنصفين وموصلين توصيلا خلفيا والشكل ٢-٣٥ يبين الدائرة المكافئة للدياك ورمزه في الدوائر الالكترونية والدياك له استخدامات عديدة نذكر منها استخدامه في دوائر اشعال الثيرستور واستخدامه كمولد للنبضات.



شكل ٢-٣٥ الدائرة المكافئة للدياك ورمزه في الدوائر الالكترونية

١٤-٢-١ اختبار صلاحية الدياك للعمل:

يصبح الدياك سليما عندما يتم استخدام الافوميتر لقياس مقاومته ونجد انه على عكس الديود يعطى نفس قراءة قيمة المقاومة الاومية في الحالتين.

١٥-٢ ترانزستور القدرة Power transistor:

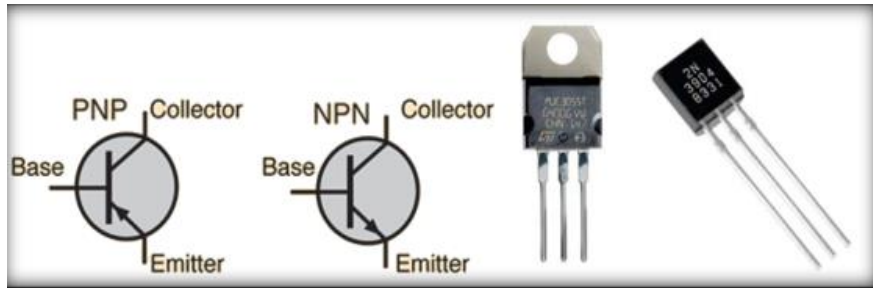
عند إضافة طبقة ثالثة للثنائي (الدايود) ينشأ لدينا وصلتين هذان الوصلتين معا يطلق عليهما الترانزستور ويستخدم الترانزستور في تكبير الإشارة سواء إشارة الجهد أو التيار أو يعمل كمفتاح للتوصيل أو الفصل على

حسب المنطقة التي يعمل فيها حيث عند استخدامه كمكبر للإشارة يعمل في منطقة تسمى المنطقة النشطة (Active region) وعند استخدامه كمفتاح توصيل يعمل في منطقة تسمى منطقة التشبع (Saturation region) ويعتبر الترانزستور منافسا قويا للثيسترور حيث يتميز بسرعته في الفصل والتوصيل كما انه مع التقدم التكنولوجي أصبح يعمل على جهود مرتفعة والتيارات مرتفعة أيضا لذلك انتشر انتشارا واسعا في الصناعة للمميزات السابقة وانه لا يحتاج الى دوائر خاصة للفصل كما في الثيسترور وتوجد أنواع عديدة للترانزستور نذكر منها

- الترانزستور ثنائي القطبية BJT (Bipolar junction transistor)
- ترانزستور تأثير المجال ذو البوابة المعزولة MOSFET (Metal oxide semiconductor field effect transistor)
- الترانزستور ثنائي القطبية ذو البوابة المعزولة IGBT (Isolated gate bipolar transistor)

١٥-٢ الترانزستور ثنائي القطبية:

يستخدم هذا النوع من أنواع الترانزستور في تكبير الإشارة الكهربائية ويتكون من ثلاثة أطراف هما القاعدة (Base) والمجمع (Collector) والباعث (Emitter) وهذا الترانزستور له نوعين رئيسيين ويرمز لهما بالرمز PNP-NPN والشكل ٣٦-٢ يبين ذلك الترانزستور. هذا الترانزستور له ثلاث حالات للتشغيل اعتمادا على قيمة التيار المار بالقاعدة حيث يعمل ذلك التيار على تغيير قيمة المقاومة ما بين المجمع والباعث ويمكن حصر حالات تشغيله في التالي: -



شكل ٣٦-٢ الشكل الترانزستور في الوضع الحقيقي وفي الدوائر الإلكترونية

- حالة القطع (Cut off region) وفيها لا يتم تسليط تيار على دائرة القاعدة وتكون المقاومة ما بين المجمع والباعث كبيرة جدا.

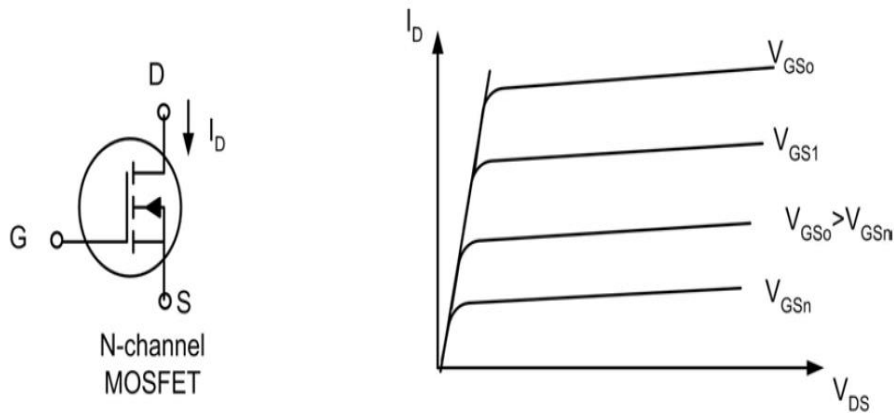
- الحالة الفعالة (Active region) ويمرر فيها تيار في دائرة القاعدة مما يجعل المقاومة ما بين المجمع والباعث صغيرة وفي هذه الحالة يتم استخدام الترانزستور كمكبر للإشارة.
- حالة التشبع (Saturation region) ويتم امرار تيار كبير في دائرة القاعدة يزيد من المقاومة ما بين المجمع والباعث ويعمل عندها الترانزستور كمفتاح.

ومن اهم عيوب ذلك الترانزستور انه لا يتحمل درجات الحرارة المرتفعة كما انه يستهلك قدرا كبيرا من الطاقة اثناء تشغيله. ولاختبار صلاحية ذلك الترانزستور نقوم بالخطوات التالية

نقيس المقاومة ما بين الباعث والمجمع فنجدها كبيرة جدا اما المقاومة ما بين القاعدة والمجمع فسوف تكون صغيرة في اتجاه وعند تبديل الأطراف باستخدام الافوميتر نجدها كبيرة جدا وهذا يدل على صلاحية الترانزستور للعمل.

٢-١٥-٢ ترانزستور تأثير المجال ذو البوابة المعزولة:

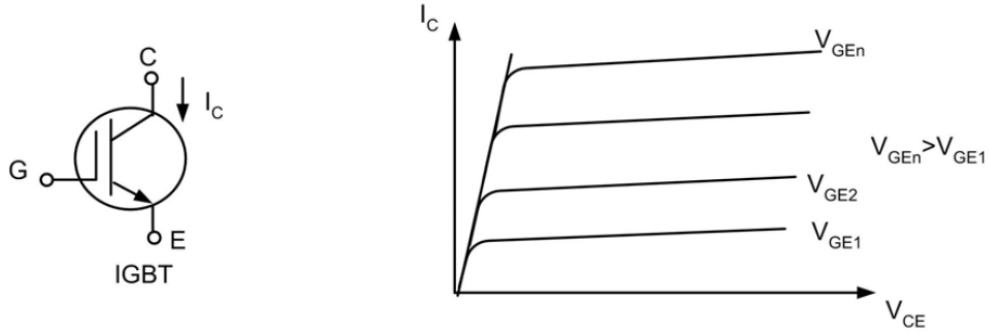
يتميز هذا النوع من الترانزستور بسرعة تشغيله اى سرعة الفصل والتوصيل والعكس او ما يسمى بالتبديل حيث تصل تلك السرعة الى ١٠٠ كيلوهرتز وربما تزيد كما انه حتى يعمل لا يحتاج جهد او تيار عالى حتى تصبح بوابة التوصيل الخاصة به في حالة عمل وبالتالي يصبح الترانزستور في حالة توصيل ولكن ما يعيبه انخفاض تياره المقنن بالإضافة الى ثمنه المرتفع ويتكون هذا النوع من ثلاثة أطراف للتوصيل هي المنبع (Source) والمصرف (Drain) والبوابة (Gate). الشكل ٢-٣٦ يبين الرمز الخاص بذلك الترانزستور في الدوائر الاليكترونية بالإضافة الخواص الخاصة به.



شكل ٢-٣٦ الرمز الإليكتروني للترانزستور تأثير المجال ذو البوابة المعزولة ومنحنيات الخواص له

٣-١٥-٢ ترانزستور ثنائي القطبية ذو البوابة المعزولة:

يتميز هذا النوع من الترانزستور بأنه يقع في مركز متوسط ما بين الترانزستور ثنائي القطبية إذا يتشابه معه في التشغيل والترانزستور تأثير المجال ذو البوابة المعزولة من ناحية سرعة التبديل إلا أن سرعة التبديل منخفضة إذا ما قورنت بسرعة تبديل ال MOSFET حيث تصل إلى حوالي ٤٠ كيلوهرتز أو أسرع قليلاً ويتوافر هذا الترانزستور للعمل بجهود تصل إلى ١٦٠٠ فولت و ١٠٠٠ أمبير في حالة توصيل ولكن ما يعيبه ثمنه المرتفع ويتكون هذا النوع من ثلاثة أطراف للتوصيل هي المجمع (Collector) والمشح (Emitter) والبوابة (Gate). الشكل ٣٧-٢ يبين الرمز الخاص بذلك الترانزستور في الدوائر الإلكترونية بالإضافة الخواص الخاصة به. كما تجدر الإشارة إلى أن ذلك النوع من أشباه الموصلات أكثر استخداماً في التحكم في سرعة المحركات الكهربائية.



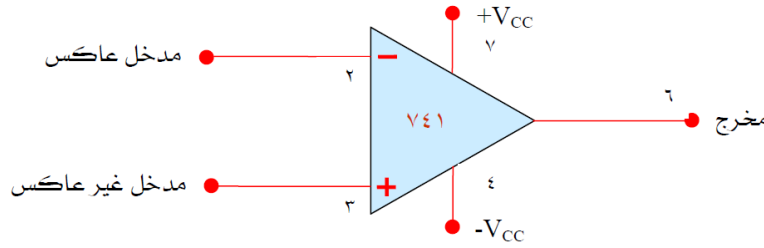
شكل ٣٧-٢ الرمز الإلكتروني للترانزستور ثنائي القطب ذو البوابة المعزولة ومنحنيات الخواص له

١٦-٢ مكبر العمليات Operational amplifier:

مكبر العمليات هو عبارة عن دائرة متكاملة (Integrated circuit) تتكون من مجموعة من المقاومات ومجموعة من المكثفات ومجموعة من الموحدات ومجموعة من الترانزستور أي أنها دائرة بالغة التعقيد تقوم بمجموعة من العمليات مثل الحسابات المنطقية (جمع طرح ضرب قسمة) أو توليد إشارات أو تكبير إشارات أو عمل فلاتر لحجب تردد معين وإمرار تردد آخر أو إجراء عملية تفاضل أو عملية تكامل أو عكس إشارة الخ.

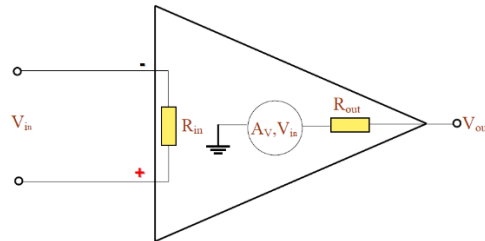
شكل ٣٨-٢ يوضح الرمز المستخدم لمكبر العمليات في الدوائر الإلكترونية حيث يتبين من خلال دراستنا للشكل أن لمكبر العمليات مدخلان ومخرج واحد أما المدخلان فاحدهما إشارته سالبة مما يعني أن أي إشارة سوف يستقبلها ذلك الطرف سوف تخرج معكوسة اعتماداً على كسب معين (Gain) أما الطرف الآخر فإنه

سوف يقوم بإخراج الإشارة المسلطة عليه اعتمادا على كسب معين دون عكسها ومن اهم خصائص المدخلان ان المقاومة بينهما مرتفعة جدا مما لا يسمح بانتقال الإشارة بينهما وانما تنقل الى الخرج فقط وحتى يعمل مكبر العمليات لابد من وجود مصدر جهد موجب يغذى به مكبر العمليات وأيضا مصدر جهد سالب. مصدر الجهد الموجب يطلق عليه $+V_{CC}$ اما مصدر الجهد السالب فيطلق عليه $-V_{CC}$ ومكبر العمليات الأشهر استخداما LM741 ويمتلك مكبر العمليات مجموعة من الخصائص او المميزات يمكن حصرها في النقاط التالية: -



شكل ٢-٣٨ رمز مكبر العمليات في الدوائر الالكترونية

١. مقاومة الدخل (Input impedance) R_{in} عالية جدا مما لا يسمح للإشارة بالمرور داخل مكبر العمليات واستهلاك جزء منها.
 ٢. مقاومة الخرج (Output impedance) R_{out} صغير جدا مما لا يؤثر على إشارة الخرج.
 ٣. كسب على القيمة (High gain).
 ٤. استجابتها للترددات كبيرة مما يجعل نطاق العمل الترددي لها من تردد صفر الى عدة ميغاهرتز.
 ٥. مستقر الأداء ويعتمد في خصائصه على الدائرة الخارجية.
- والدائرة المكافئة لمكبر العمليات يمكن رؤيتها بالشكل ٢-٣٩ وهو يعتبر من اشهر أنواع مكبر العمليات.

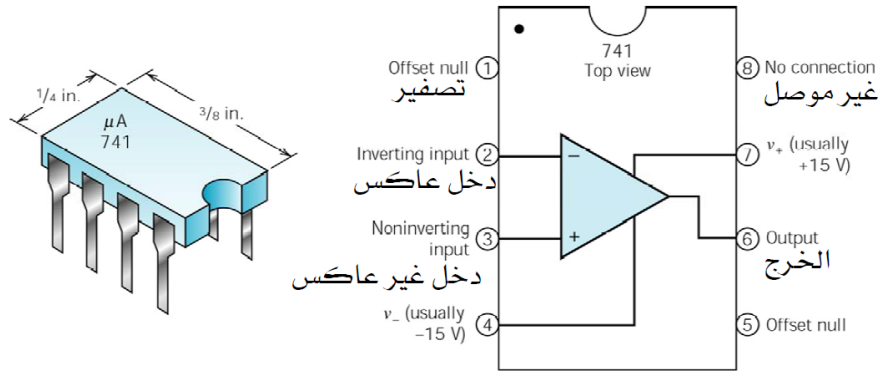


شكل ٢-٣٩ الدائرة المكافئة لمكبر العمليات

٢-١٦-١ أشهر أنواع مكبر العمليات LM741:

يعتبر أشهر أنواع مكبر العمليات هو المكبر LM741 ويمكن رؤيته من خلال الشكل ٢-٤٠ وفي ذلك الشكل نجد ان مكبر العمليات الحقيقي ناحية اليسار اما الشكل ناحية اليمين فيمثل المكبر على هيئة مخطط صندوقى موضحا عليه أطراف التوصيل وطريقة توصيل كل طرف ومن دراستنا لذلك الشكل يتضح ان مكبر العمليات

- يتكون من ثمانية أطراف
- الطرف الأول او الرجل الأولى رقم ١: يتم من خلالها ضبط الخرج عند صفر
- الرجل الثانية رقم ٢: المدخل العاكس
- الرجل الثالثة رقم ٣: المدخل غير العاكس
- الرجل رقم ٤: مدخل الجهد السالب ويكون جهدها -١٥ فولت
- الرجل رقم ٥: يضبط بواسطتها الخرج عند الصفر
- الرجل رقم ٦: الخرج الذى يأخذ منه الإشارة المكبرة
- الرجل رقم ٧: مصدر الجهد الموجب ويكون +١٥ فولت
- الرجل رقم ٨: وهى غير مستخدمة

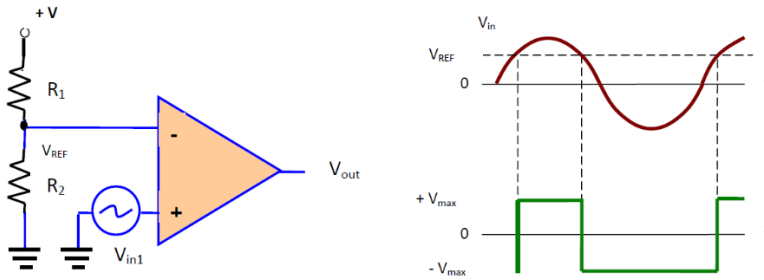


شكل ٢-٤٠ مكبر العمليات LM741

٢-١٦-٢ أهم تطبيقات مكبر العمليات LM741:

لمكبر العمليات تطبيقات عديدة نذكر منها المكبر المقارن – المكبر الجامع – المكبر التفاضلى – المكبر التكاملى وسوف نقوم بشرح تلك التطبيقات كالتالى:-

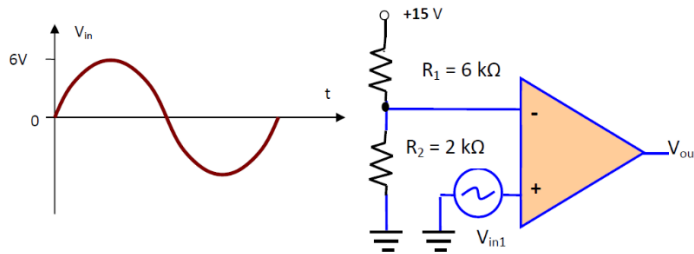
أولاً المكبر المقارن (Comparator) لعل أشهر المقارنات ما يحدث في دوائر التحكم بالقطارات ما بين إشارة الجهد المرجعية المعبرة عن سرعة معينة وإشارة الانكودر أو مولد التاكود الذي يناظر الجهد الخارج منه سرعة المحرك الحقيقية ويمكن ملاحظة ذلك من خلال الشكل ٢-١ حيث يوضع الجهد المرجعي على طرف الدخل السالب من خلال مقاومة متغيرة للسماح بتغيير الجهد طبقاً لطبيعة السرعة المراد تغييرها حيث تظهر كجهد يمكن حسابه من خلال العلاقة $V_{REF} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} (+V)$ وتجدر الإشارة إلى أن الجهد $(+V)$ يمثل جهد التغذية الخاص بالمقارن والذي يتضح من إشارته أنه جهد قيمته موجبة ثم بعد ذلك يتم مقارنة ذلك الجهد بالجهد الناتج عن سرعة محرك الجر V_{in1} ليتم إرسال إشارة إلى بقية التحكم لتأخذ الإجراء المناسب بناءً على المقارنة التي تمت بين الجهدين.



شكل ٢-١ المكبر المقارن

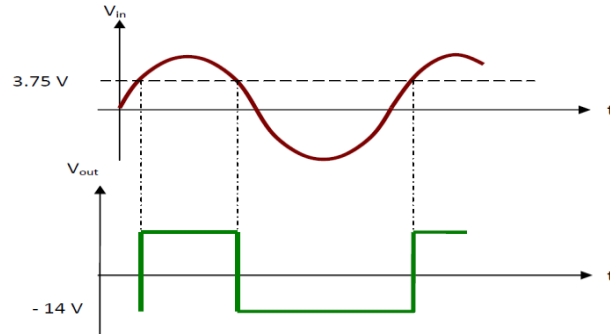
مثال محلول على المكبر المقارن

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

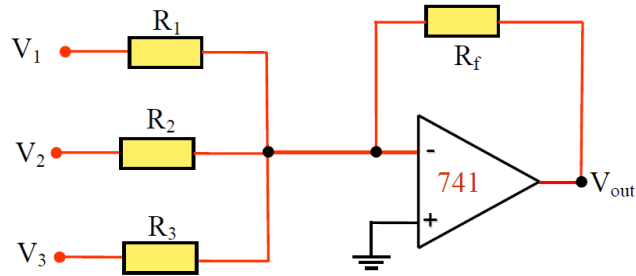


الحل:

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



ثانياً استخدام المكبر كجامع: يستخدم المكبر كجامع للقيام بعمليات الجمع والطرح وإيجاد الوسط الحسابي والشكل ٤٢-١ يبين استخدام المكبر ليقوم بعملية تجميع الإشارات وتكبيرها ويمكن إيجاد جهد الخرج من العلاقة التالية



شكل ٤٢-١ مجمع إشارات

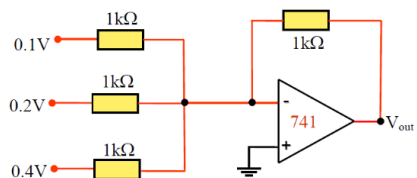
$$V_{out} = A_{CL1} V_1 + A_{CL2} V_2 + A_{CL3} V_3$$

حيث $A_{CL1} = -R_f/R_1$ (كسب جهد مكبر عاكس) و $A_{CL2} = -R_f/R_2$ و $A_{CL3} = -R_f/R_3$

$$V_{out} = \left(-\frac{R_f}{R_1} V_1 \right) + \left(-\frac{R_f}{R_2} V_2 \right) + \left(-\frac{R_f}{R_3} V_3 \right)$$

مثال محلول على استخدام المكبر كمجمع

أوجد جهد الخرج للدائرة التالية



الحل:

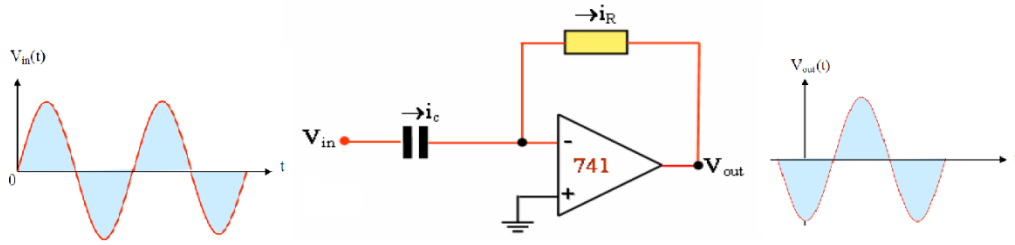
$$V_{out} = -(V_1 + V_2 + V_3) = -(0.1 + 0.2 + 0.4) = -0.7 \text{ V}$$

ثالثا المكبر التفاضلي: من اهم استخدامات المكبر إيجاد معدل تغير الإشارات الداخلة او عمل تفاضل لإشارة دالة معينة ويمكن عمل ذلك باستخدام الدائرة بالشكل ٤٣-١ ويتم ذلك من خلال استخدام مكثف ومقاومة كهربية كما بالشكل ٤٣-١ وتكون المعادلة الحاكمة لعمل ذلك المكبر هي

$$i_R = i_c$$

$$V_{out} = -Ri_R = -R \frac{dq}{dt} = -RC \frac{dv_{in}}{dt} = -\tau \frac{dv_{in}}{dt}$$

حيث $\tau = RC$

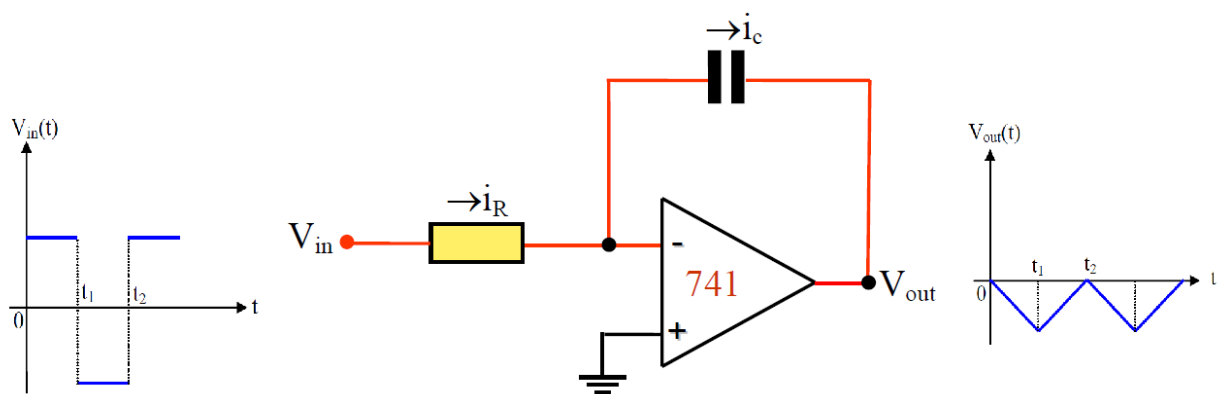


شكل ٤٣-١ استخدام المكبر لإيجاد معامل التغير او تفاضل الدالة

رابعا المكبر التكامل: كما يمكن استخدام المكبر للقيام بعملية تكامل لاي إشارة والشكل ٤٤-١ يوضح شكل الدائرة ومن الواضح عند مقارنة تلك الدائرة بالدائرة السابقة انه تم استبدال وضع المكثف والمقاومة كما ان العلاقة التي تحكم ذلك يمكن كتابتها كالتالى

$$\Delta v_{out}(t) = -\frac{1}{RC} \int v_{in}(t) dt = -\frac{1}{\tau} \int v_{in}(t) dt$$

جهد الخرج يساوى تكامل جهد الدخل مضروب في $(-1/\tau)$



شكل ١-٤ استخدام المكبر في تكامل الاشارات