



الإلكترونيات الصناعية

جامعة دمشق
الميكانيكية والكهربائية

إلكترونيات الصناعية

INDUSTRIAL ELECTRONIC

الدكتور

بديع زريقة

مدرس في قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات

مستشار

صنيع

في الإلكترونيات والاتصالات

جامعة دمشق
Damascus University

CONTENTS

الفهرس

عمل الأول: عناصر أنصاف النواقل

Semiconductor Elements

٧	1- - مدخل إلى أنصاف النواقل
١	2- - الشئائي p-n
٦	1-2-1 - نظام العمل للشئائي الحقيقي
٨	1-2-2 - الشئائي المئائي
٩	3- - شئائي زينر
٠	1-3-1 - دارات تنظيم الجهد باستخدام شئائي زينر
٥	1-3-2 - استخدام شئائيات زينر على التسنسل
٨	1-3-3 - دارات تنظيم الجهد باستخدام دارات تكاملية (IC)
٦	4- - الترانزستور ذو الوصلة شئائي القطبية BJT
٦	1-4-1 - تركيب وبنية الترانزستور
	1-4-2 - الأسس الفيزيائية لعمل الترانزستور
	1-4-3 - طرق توصيل الترانزستور
	1-4-4 - الخواص الستاتيكية للترانزستور
	1-4-4-1 - خواص الترانزستور ذي الباعث المشترك
	1-4-4-1 - خواص الترانزستور ذي القاعدة المشتركة
	٥- - الترانزستورات الحقيية FET

١-9-2	المكبر العاكس (Inverting Amplifier)
2-9-2	المكبر غير العاكس (Non-inverting Amplifier)
3-9-2	المكبر التفاضلي (Differential Amplifier)
4-9-2	المكبر الجامع (Summing Amplifier)
5-9-2	المكبر الجسري Bridge Amplifier

١١ الثالث: العناصر الكهروضوئية وتطبيقاتها

Electro-Optical Devices and Applications

١-1	عناصر أنصاف النواقل ذات الخصائص الكهروضوئية
1-1-3	٨ خلايا المقاومة الضوئية Photo Resistive Cells
2-1-3	٣ الخلايا الضوئية ذات الوصلة Junction Photocells
1-2-1-3	الخلية الشمسية أو الخلية الجهدية الضوئية
٤	Photovoltaic Cell
2-2-1-3	٦ Photo Diode الثنائي الضوئي
3-2-1-3	٨ الترانزستور الضوئي Photo Transistor
4-2-1-3	٩ الثنائي انبعاث للضوء LED، Light Emitting Diode
3-1-3	٤ أدوات الاقتران الضوئية OptoCoupler Devices
4.1.3	٧ معاملات (Parameters) القارن الضوئي

٨	قارنات عملية	-5-1-3	
٣	Photomultipliers المضاعفات الضوئية		-٢-
٢٧	تطبيقات باستخدام العناصر الكهروضوئية		-٢-
٣٧	مثال في التحكم الكهروضوئي Photoelectric Control	-1-3-3	
٣٩	دائرة تشغيل حاكمة باستخدام مقاومة ضوئية	-2-3-3	
	دائرة تشغيل حاكمة باستخدام	-3-3-3	
١٤٠	مقاومة ضوئية وترانزستور		
١٤١	دائرة إنذار باستخدام مقاومة ضوئية وثايرستور	-4-3-3	
١٤٣	مكبر إشارة محلية شمسية	-5-3-3	

نصل الرابع: عناصر التحسس، المجسات وتطبيقاتها

Transducers and Applications, Sensing Elements

١٤٥	بإستخدام جسر واتسن		-1-
١٤٨	تغير المقاومة الكهربائية للمواد بتغير درجة الحرارة	-1-1-4	
١٤٨	مجسات درجة الحرارة ذات المقاومة المعدنية	-2-1-4	
١٥٥	الثيرمستور	-3-1-4	
١٥٩	تطبيقات عن تغير المقاومة بتغير درجة الحرارة	-4-1-4	
	قياس ارتفاع مستوى سائل	-1	
١٥٩	(غاز النتروجين المميع)		
١٦٠	قياس ضغط منخفض جداً	-2	

١٤١	٥-٣ قياس سرعته لتدفق سائل	
١٦٤	تغير المقاومة الكهربائية للمادة بتغير الضغط (بحسب Bridgman)	4-1-5
١٦٥	مخزونات الجهد: (المقاومة المتغيرة، عنصر كشف إزاحات ميكانيكية)	4-1-6
١٦٩	المزدوجات الحرارية Thermocouples	4-1-7
١٧٥	مقياس الشد، Strain-Gauge	4-1-8
١٧٩	أجهزة السَّعْوِيَّة (أجهزة ذات السَّعة الكهربائية)	2-
	استخدام أجهزة السَّعْوِيَّة لقياس	4-2-1
١٨٢	إزاحات مستقيمة أو دائرية	
١٨٦	استخدام أجهزة السَّعْوِيَّة لكشف ظاهرة صوتية	4-2-2
١٨٧	استخدام أجهزة السَّعْوِيَّة لقياس ارتفاع مستوى سائل	4-2-3
١٨٨	تطبيق عن استخدام المكثف في التحكم بإحكمة (مفتاح توقيت زمني)	4-2-4
١٩٢	أجهزة التحريضية (Inductive Transducers)	3-
١٩٢	أجهزة إزاحة ذو ملف	4-3-1
١٩٣	حساسات السرعة الكهرومغناطيسية	4-3-2
١٩٤	التحول التفاضلي المتغير الخطي	4-3-3
٢٠٣	التحول التفاضلي المتغير الدوراني	4-3-4
٢٠٤	أجهزة الإزاحة الرقمي Digital Displacement Transducer	-
٢٠٥	أجهزة الكهروضغطي Piezoelectric Transducer	
١	تأثير هول Hall Effect	

الفصل الخامس: الجبر البوليني والبوابات المنطقية

Boolean Algebra and Logic Gate

٢١٥	النظام الثنائي	1-5
٢١٦	أسس المنطق الهندسي	2-5
٢١٨	البوابة AND	3-5
٢٢٣	البوابة OR	4-5
٢٢٧	البوابة NOT أو INVERTER	5-5
٢٢٩	البوابة NOR	6-5
٢٢٩	البوابة NAND	7-5

الفصل السادس: التحكم المنطقي القابل للبرمجة

Programmable Logic Control

٢٣٢	الحاكمات واستخدامها	1-6
٢٣٤	معيارية الحاكمة	1-1-6
٢٣٦	حالة المنطق	2-1-6
٢٣٧	دائرة الإمساك (الإقفال) The Latch Circuit	3-1-6
٢٤٣	مزايا التحكم باستخدام الـ PLC	2-6
٢٤٥	أسس الـ PLC	3-6
٢٤٦	مثال عن نظام تحضير الشاي The 7-day teamaker example	1-3-6
٢٤٨	عمل مُحَضِّر الشاي	1-1-3-6
٢٤٨	المدخل والمخرج	2-1-3-6

المخططات السلمية Ladder Diagrams	٢-٥-٦
٢٥٠ والرموز المستخدمة	
٢٥٢ تصميم الدارة	-3-3-6
٥٢ دارة الإمساك	-1-3-3-6
التصميم الآمن لدارات إقلاع/توقف	-2-3-3-6
٥٣ Start/Stop	
استخدام دارة الإمساك	-3-3-3-6
٥٤ للتحكم بالمحركات	
٢٥٦ Timer Function وظائف المؤقت	-4-3-3-6
٢٥٧ المحاكيات الداخلية	-5-3-3-6
٢٥٩ الوضع وإعادة الوضع	-6-3-3-6
٢٦٣ العدادات	-7-3-3-6
٢٦٦ عملية القفز (Jump)	-8-3-3-6
٢٦٧ المخطط السلمي مخضّر الشاي لسبعة أيام	-4-3-6
٢٦٩ اختبار البرنامج	-5-3-6
٢٧١ مآخذ وتوصيلات المتحكم المنطقي PLC	-6-3-6
٢٧٢ البرمجة بطريقة GRAFCET	-7-3-6
٢٧٥ أمثلة تطبيقية أخرى	-8-3-6

جـ السابع: دارات التغذية الكهربائية المستمرة C. Power Supplies

٢٨٧	-1 دارات التقويم	
٢٨٨	دارات التقويم أحادية الطور	-1-1-7
٢٨٨	تقويم نصف موجة	-1-1-1-7
٣٠٠	تقويم الموجة الكاملة	-2-1-1-7
٣٠٩	دارات التقويم ثلاثية الطور	-2-1-7
٣٠٩	دارات التقويم ثلاثية الطور ذوات النقطة المشتركة	-1-2-1-7
٣١٣	دائرة التقويم ثلاثية الطور الجسرية	-2-2-1-7
٣١٥	تقويم نصف موجة باستخدام مضخمات العمليات	-3-1-7
٣١٧	- مضاعفات الجهد	
٣٢٠	- المبدلات التايستورية	
٣٢١	فكرة التحكم بالتايستورات بطريقة إزاحة الطور	-1-3-7
	عمل المبدلات التايستورية أحادية الطور على حمل	-2-3-7
٣٢٤	أومي-تخريضي	
٣٢٩	المبدلة التايستورية ثلاثية الطور ذات النقطة المشتركة	-2-3-7

ل الثامن: التسخين الكهربائي بتيارات عالية التردد

h Frequency Heating

٨	تسخين المعادن بالتخريض الكهربائي
٥	تسخين المواد العازلة بتيارات عالية التردد

مل التاسع: القياسات وأجهزة القياس الكهربائية

٣٦١	-	مراحل عملية القياس ومهمتها
٣٦٤	2-	نظام القياس الرقمي
٣٦٥	3-	المواءمة بين ممانعات دائرة القياس
٣٦٨	4-	واحدات القياس الدولية
٣٧١	5-	دقة القياس
٣٧٢	6-	أنواع أخطاء القياس ومصادرها
٣٧٣	7-	أجهزة القياس
٣٧٣	1-7-9-	تصنيف أجهزة القياس
٣٧٤	2-7-9-	المقياس ذو الملف المتحرك
٣٧٨	3-7-9-	توسيع مجال أجهزة القياس
٧٨	1-3-7-9-	مجزئات التيار الأومية
٨٣	2-3-7-9-	مجزئات الجهد الأومية
٨٧	4-7-9-	مقياس الأوم
٨٨	5-7-9-	المقياس ذو الملف المتحرك المعدل
٩٠	6-7-9-	جهاز الأفومتر
٩٢	7-7-9-	مقياس الفولت الرقمي
٩٥	8-7-9-	راسم الإشارة
٩٧	1-8-7-9-	أنبوب الأشعة المهبطية ومبدأ عمل الراسم
١٠١	2-8-7-9-	مفاتيح راسم الإشارة

مرر "الإلكترونيات الصناعية" ذو أهمية بالغة للمهندسين المتخصصين في العلوم التقنية. فمن دون التجهيزات الإلكترونية لا يمكن في الوقت الحالي لأي فرع من فروع الصناعة أو النقل أو الاتصالات أن يحافظ على وجوده وتطوره. إن هندسة الإلكترونيات - هي مجال من مجالات العلوم و التكنولوجيا، يقوماسة ويبحث العناصر التي تعتمد في عملها على مرور التيار في الأجسام الصلبة وفي الفراغ ، كما تقوم ببحث تطبيقات هذه العناصر. أما الإلكترونيات الصناعية - فهي جزء من أجزاء هندسة الإلكترونيات، تدرسخدام العناصر الإلكترونية في الصناعة .

بغض النظر عن تعدد مجالات استخدام التجهيزات الإلكترونية الصناعية فهنا على مبدأ مشترك عام. هذا المبدأ العام لبناء الدارات الإلكترونية هو مجال دراسكترونات الصناعية.

تقسم الإلكترونيات الصناعية إلى قسمين:

- إلكترونيات القدرة- وهي تدرس تبديل الطاقة الكهربائية من شكل إلى آخر.
- إلكترونيات المعلوماتية- وتدرس التجهيزات الإلكترونية المستخدمة في قياس ومعالجة المعلومات وإظهارها.

لقد خصص هذا الكتاب لطلاب الهندسات الميكانيكية، ويتميز بسلسلة أسس ووضوح أفكاره وبعده عن التكرار والحشو، لذلك فهو مفيد لجميع الطلاب الراغبة في مجال الإلكترونيات الصناعية.

الكتاب من تسعة فصول مقسمة على الشكل التالي:

من سيرات ونسبته ونحوه

العناصر المصنوعة من أنصاف النواقل مبدئاً من نقطة الصفر أي انطلاقاً .
أنصاف النواقل مروراً بالثنائيات والترانزستورات، والثايرستورات.

الفصل الثاني: يدرس مختلف أنواع المكبرات بما في ذلك مكبرات العمليات.

الفصل الثالث: يتضمن دراسة لمختلف العناصر الكهروضوئية وتطبيقاتها.

الفصل الرابع: يتخصص هذا الفصل بدراسة صف واسع من مبدلات الك
صر التحسس والمجسات) التي تسمح بقياس مختلف المقادير الفيزيائية (حر
ط، إزاحة، سرعة، تدفق غاز، كثافة الفيض المغناطيسي، مستوى س
د..... وغيرها).

الفصل الخامس: يدرس الجبر البولياني والبوابات المنطقية المختلفة.

الفصل السادس: يتضمن شرحاً عن المتحكم المنطقي القابل للبرمجة PLC و
تسمية بما فيها طريقة البرمجة GRAFCET الحديثة.

الفصل السابع: يدرس منابع التغذية المستمرة وبشكل خاص دوائر التقويم أ
ر وثلاثية الطور لأحمان مختلفة ثم يتطرق لدراسة مضاعفات الجهد بأنواعها و
لات الثايرستورية شارحاً عملها لحالي: التقويم والتحكم بقيمة الجهد المقد
هريج أي كمبدلات عاكسة يمكن أن تُعيد القدرة للشبكة.

الفصل الثامن: يتخصص هذا الفصل بدراسة التسخين الكهربائي بتيارات ع
د.

الفصل التاسع: يتخصص بدراسة القياسات وأجهزة القياس الك
لكترونية.

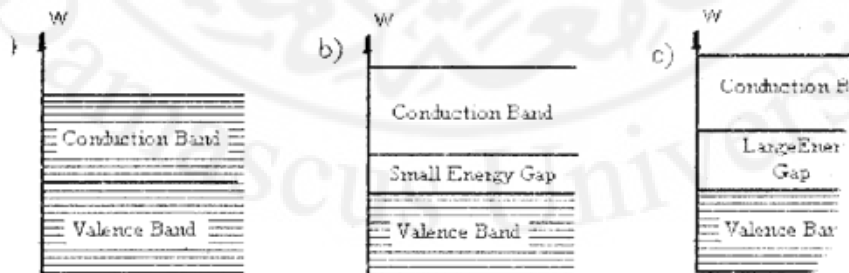
معدل الأول

ر أنصاف النواقل.

SEMICONDUCTOR DL

- مدخل إلى أنصاف النواقل [20:30:17:19].

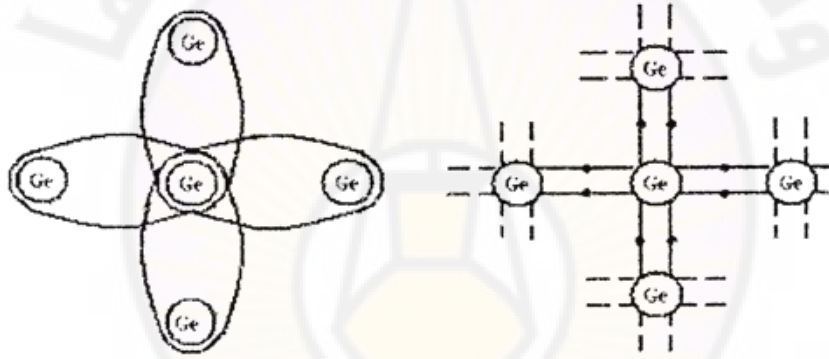
أنصاف النواقل - هي المواد التي تتمتع بمقاومة نوعية كهربائية متوسطة -
النوعية للنواقل (أقل من $10^{-4} \Omega m$) والعوازل (أكثر من $10^8 \Omega m$).
من المعروف، بأنه عندما تترايط الذرات مع بعضها، فإن إلكترونات المند،
حي من كل ذرة تشكل مستوى طاقة يسمى حزمة التكافؤ. هذه الحزمة هي التي
في التفاعلات الكيميائية والكهربائية. في المعادن يوجد عدد كبير من
رونات التي تقع على مستوى طاقة عالٍ يسمى منطقة الحزمة الناقلة. تفصل بين
التكافؤ والنقل ثغرة طاقة ΔW ، تكون عريضة للعوازل ومتوسطة لأنصاف
ومعدومة للنواقل كما يبين الشكل 1-1.



مستويات الطاقة للإلكترونات في المعادن (a) وأنصاف النواقل (b) ، (c)

الشكل 1-2 . بلورة الجرمانيوم الكريستالية

تتوي على أربعة إلكترونات تكافؤ في مدارها الخارجي. عندما تترابط هذه
وحدات الأربعة، لذرة الجرمانيوم مثلاً مع إلكترونات الذرات المجاورة، تشكل أربع
إلكترونات ترابط، مكونةً بذلك بلورة الجرمانيوم. كما هو واضح في الشكل

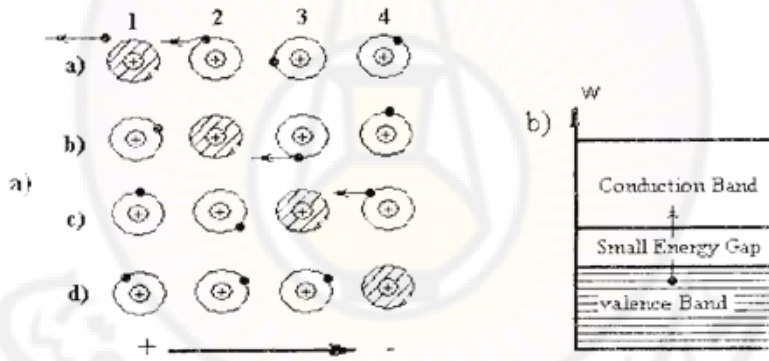


الشكل 1-2 . بلورة الجرمانيوم الكريستالية

يؤدي هذا الترابط إلى اكتمال المدار الخارجي للذرات أي جعلها مستقرة
العنصر عندئذ عازلاً. ولكن عند إعطاء طاقة إلى الذرة
ضوئية، إشعاعية) تتحرك بعض الإلكترونات من الذرات إلى الحزمة
دادت الطاقة (الحرارة مثلاً) يزداد عدد الإلكترونات التي تعبث الثغرة .
التكافؤ إلى الحزمة الناقلة (الشكل 1-3-b) وذلك لأن عرض الثغرة الناقلة
النواقل صغير ويساوي 0.7 eV للسليكون و 1.12 eV للجرمانيوم
: فولت (eV) - هو الطاقة اللازمة لتحريك إلكترون عبر فرق كمون
ت.

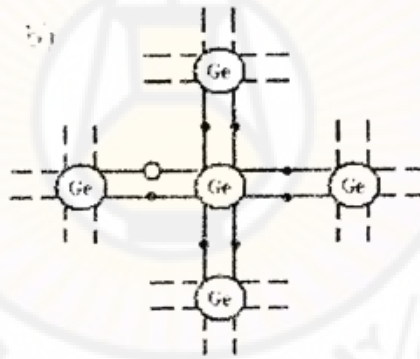
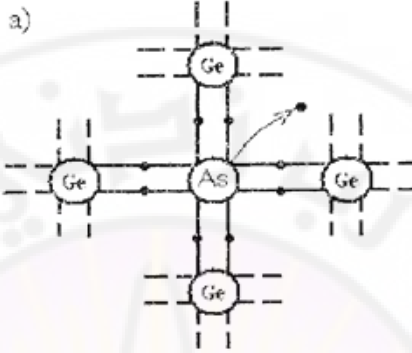
حالات طاقة الذرة المستويات المنخفضة - المستويات العالية

بة. إذا انتزعت الذرة ذات الشحنة الموجبة إلكترونًا من الذرة المجاورة، فإن الشحنة
ك، ويمكن توضيح ما سبق شرحه بالشكل 3-1.
من هنا يتبين بأن مرور التيار في أنصاف النواقل يتم ليس فقط بواسط
كترونات - كما في المعادن - وإنما بواسطة الثقوب أيضاً، حيث تتسبب
كترونات بأحد الاتجاهات والثقوب باتجاه آخر .



الشكل 3-1 . ظهور زوج إلكترون - ثقب (a) واليار الإلكتروني-الثقوب (b)

شكل وصلة p-n يتم تطعيم مادة نصف الناقل بشوائب. فلنحصل على
ضاف إلى مادة نصف الناقل شوائب مُعطية خماسية التكافؤ مثل الفسفور
As و الأنتيموان Sb والتروجين N، فنحصل على إلكترون حر في n
مانحة، كما في الشكل 4-1-a. بذلك يكون الإلكترون، ذو الشحنة الس
شحنة الأساسية. في المادة نوع n، أما النوع p، فيتم تطعيم مادة نصف الناقل بشوائب مُعطية ثنائية التكافؤ مثل الكربون C، فنحصل على ثقب في p، والذي يتصرف كجسيم حقيقي ذو شحنة موجبة.



الشكل 4-1. تشكيل الطبقة n (a) والطبقة p (b).

ل على مادة نوع p تضاف إلى مادة نصف الناقل شوائب قابلة ثلاثية الت
لمنيوم AL والبور B و الأنديوم In والغاليوم Ga فتشكل إلكتروناتها
مات ذرية مع الإلكترونات المجاورة لذرات الجرمانيوم (أو السيلكون) ويتبقى أ
الرباطات غير كامل فيتكون بذلك الثقب ذو الشحنة الموجبة، كما هو مبين في

b- 4-1.

إن حاملات الشحنة الأساسية في المادة نوع P هي الثقوب، أما الإلكترونات فهي أقلية هنا.

يوجد في أنصاف النواقل نوعان من التيارات :

تيار الجرف- وهو عبارة عن تدفق الشحنة- المتولدة حرارياً- بتأثير شدة المجال الكهربائي أو فرق كمون.

وتيار الانتشار- ينتج عن الفرق في تركيز حاملات الشحنة في المادة.

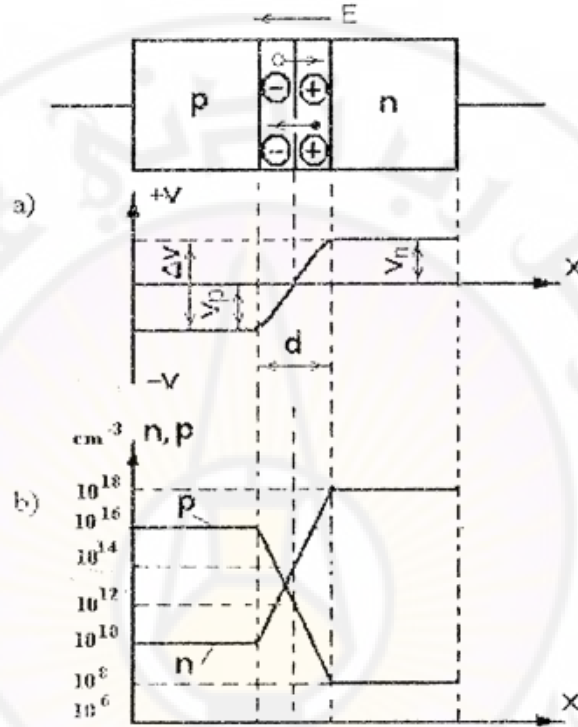
2-1- الثنائي p-n (Diode) :

الثنائي (الموحد، المقوم)- هو عنصر نصف ناقل إلكتروني ذو بنية بلورية ثنائي الطبقات و ثنائي الأقطاب، له (مصعد A و مهبط K أو C) ويتألف من وصلة p-n واحدة ويسمح بتمرير التيار الكهربائي باتجاه واحد فقط.

يعتمد مبدأ عمل الثنائي على المعبر p-n، حيث تكون مقاومة هذا المعبر صغيرة في الاتجاه الأمامي وعالية جداً في الاتجاه العكسي. ففي لحظة تشكيل الوصلة p-n (الشكل 5-1 a) تنتشر الإلكترونات من الجانب n ، حيث تركيزها فيه كبير، إلى الجانب p و تتحد بالثقوب، وكذلك الثقوب من الجانب p حيث تركيزها فيه كبير إلى الجانب n وتتحد بالإلكترونات الموجودة. فتخسر بذلك الطبقة n عدداً من الإلكترونات ويصبح كمونها موجباً أما p فتخسر ثقوباً ويصبح كمونها سالباً، مما يؤدي إلى ظهور الجهد الخازن $\Delta V = V_n - V_p$ ، وكذلك مجال كهربائي شدته E يعيق انتشار الثقوب من p والإلكترونات من n (الشكل 5-1).

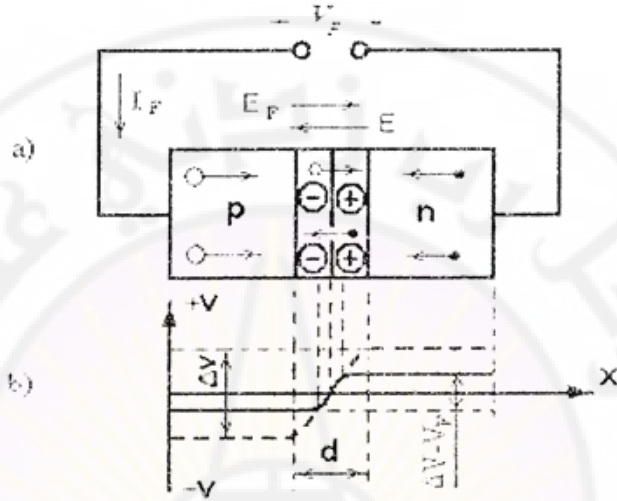
إن قيمة الجهد الخازن تساوي: للجرمانيوم $\Delta V_{ij} = 0.3 - 0.4V$ وللسيليكون

$\Delta V_n = 0.7V$ وسماكة منطقة الحجز تساوي: $d = 10^{-4} - 10^{-6} cm$.



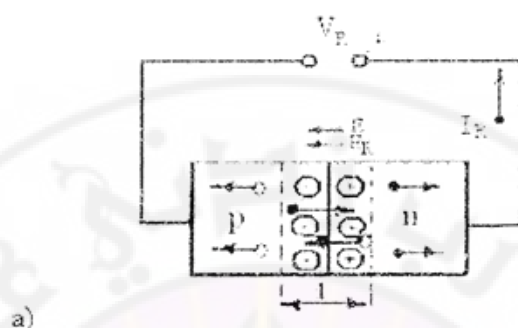
الشكل 5-1 . ظهور الجهد الحاجز على جانبي الوصلة p-n (a) وكثافة الشحنات في الطبقتين p و n (b).

عند تسليط جهد خارجي على الثنائي بأحياز أمامي، فإن قطبية الجهد الخارجي تدفع الإلكترونات و الثقوب عبر الوصلة مما يضعف الحاجز الكهربي . وكذلك فإن المجال الكهربائي الناتج عن الجهد الخارجي المطبق على الثنائي يُعاكس بالاتجاه المجال الكهربائي للوصلة و يضعفه (الشكل 6-1) . فتصبح مقاومة الوصلة صغيرة جداً تسمح بمرور التيار في الدارة الخارجية.

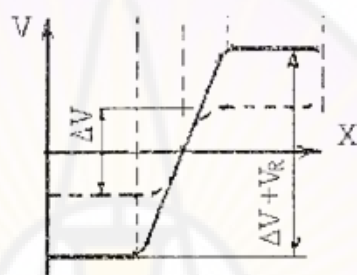


الشكل 6-1. الثنائي p-n في حالة الانحياز الأمامي (a) وجهده الحاجز (b).

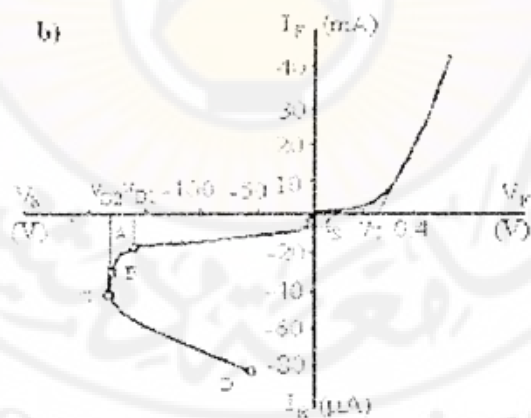
وعند تسليط جهد خارجي على الثنائي بانحياز عكسي ، فإن هذا التوصيل يقوي حاجز الكمون ويعززه ، وذلك لأن القطب الموجب للبطارية ينتزع إلكترونات من الطبقة n فيزداد كمونها الموجب وتتحرك الثقوب من p باتجاه القطب السالب وتتحد بالإلكترونات القادمة منه عند نقطة اتصال نصف الناقل بالمصعد ، فيزداد الكمون السالب للطبقة p أيضاً ، ويكبر الجهد الحاجز كما هو مبين في الشكل 7-1 ، وتصبح الوصلة عند ذلك كمقاومة عالية نسبياً ، لأن المجال الكهربائي الناتج عن الانحياز العكسي هو مجموع المجال الكهربائي للوصلة والمجال الكهربائي الناتج عن الجهد الخارجي لتطابقهما بالاتجاه. مما يمنع مرور تيار في الدارة الخارجية.



a)



b)



الشكل 1-7. الانحياز العكسي للثنائي (a) وخواص الفولت-أمبير له (b)

إن المنحنى الذي يبين العلاقة بين التيار الذي يمر في الجهاز و الجهد المطبق عليه يسمى خواص الفولت - أمبير، وهي علاقة مهمة لأي جهاز كهربائي.

يبين الشكل 7-1-b خواص الفولت - أمبير للثنائي وهي خواص غير خطية. حيث، في البداية، تكون مقاومة الثنائي الأمامية كبيرة، ولكن عند رفع الجهد إلى قيمة أكبر من جهد العتبة V_r ، يختفي الجهد الحاجز وتنخفض مقاومة الوصلة لتصبح عدة أومات فقط، وهي حاصل جمع مقاومتي الطبقة n و الطبقة p. أما جهد العتبة - فهو الجهد الذي يكون عنده تدفق التيار مهماً. و قيمته 0.2 للجermanيوم و 0.6 للسيلكون.

في حالة الانحياز العكسي تكون مقاومة الثنائي كبيرة جداً، فعند زيادة الجهد من الصفر حتى جهد الانحياز، لا يتجاوز التيار العكسي عدة مايكرو أمبيرات. ينتج هذا التيار عن تيار الجرف الذي يصل إلى قيمة تيار الإشباع I_s ، وكذلك عن تيار التسرب عبر سطح نصف الناقل I_0 . في الحياة العملية يعتمد التيار العكسي على الحرارة أكثر من اعتماده على الجهد.

عند زيادة الجهد العكسي ليقترّب من جهد الانحياز تأخذ الإلكترونات المتحركة سرعة فائقة، وعندما تضرب بذرات نصف الناقل تنتزع إلكترونات جديدة منها، وهذه بدورها تأخذ سرعة عالية أيضاً بسبب المجال الكهربائي، وتنتزع إلكترونات أخرى من الذرات، هذه الضربات تشتد مع زيادة الجهد وتسبب الانحياز.

يوجد نوعان من أنواع الانحياز: انحياز كهربائي و انحياز حراري للوصلة p-n:

أ- الانحياز الكهربائي - وهو انحياز مسموح به، حيث يستعيد الثنائي خواصه بعد إزالة الجهد عنه، أي أن الانحياز الكهربائي لا يتسبب في تفتيت الثنائي، وهو يطابق الجزء ABC على المنحني المبين في الشكل 7-1. هناك نوعان للانحياز الكهربائي - انحياز حقلي (نفقي) وانحياز فيضائي كما سنرى لاحقاً.

ب- الانحياز الحراري - (انظر الجزء CD على المنحني في الشكل 7-1) يسبب تخريب الوصلة بسبب الحرارة، أي حرق الثنائي و تعطله.

1-2-1- نظام العمل للشائي الحقيقي :

في الدارات العملية يكون الشائي موصلاً مع الحمل (الشكل 1-8- a). يمر التيار عبر الشائي إذا كان المصعد (A) أكثر إيجابية من المهبط (K) تسمى حالة عمل الشائي على الحمل بنظام التشغيل .

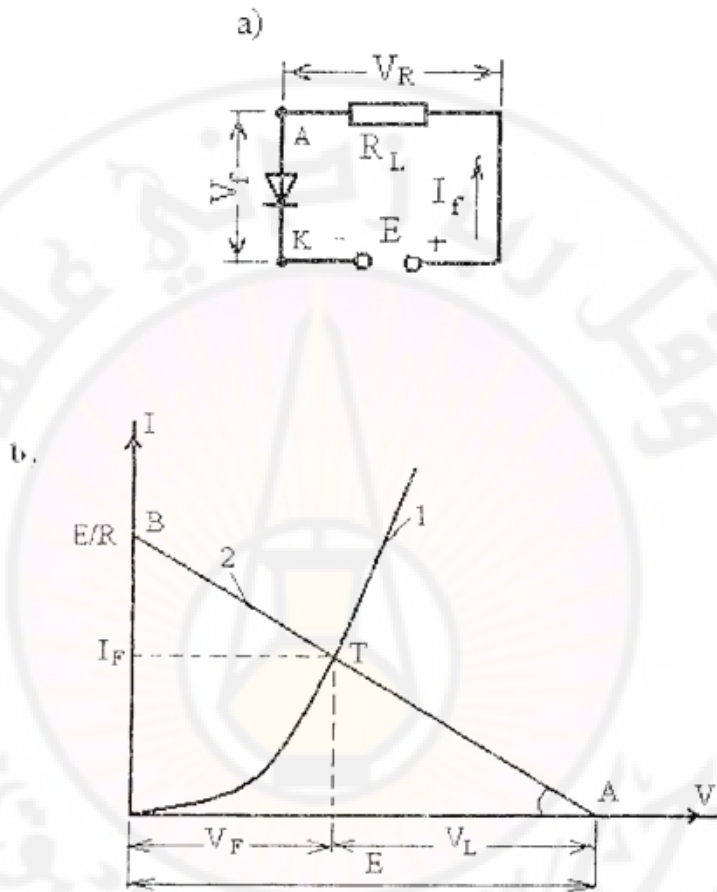
إن حسابات هذا النظام ليست صعبة لو كانت مقاومة الشائي خطية ، إلا أن مقاومة الشائي غير خطية وتتغير بتغير التيار . لذلك يتم حساب تيار الشائي بيانياً . من الشكل (1-8-a) نجد:

$$I_f = \frac{E - V_f}{R} \quad (1-1)$$

تشمل المعادلة (1 - 1) على مجهولين ونحتاج إلى معادلة ثانية. المعادلة الثانية هي خواص الشائي المعطاة بيانياً (المنحني 1 في الشكل 1-8-b) لحل هاتين المعادلتين يجب رسم منحني المعادلة (1 - 1) التي هي عبارة عن معادلة خط مستقيم يتحدد بنقطتين فعندما :

$$\begin{array}{ll} I_f = 0 & \text{فإن} \\ V_f = 0 & \text{فإن} \end{array} \quad \begin{array}{l} V_f = E \\ I_f = \frac{E}{R} \end{array} \quad \text{و}$$

يسمى هذا الخط بخط الحمل وتكون نقطة تقاطعه مع منحني خواص الشائي (النقطة T) التي تسمى (نقطة العمل) هي الحل المطلوب وتعطي جهد الشائي V_f والتيار I_f المطلوبين .



الشكل 8-1 . دائرة توصيل الثنائي (a) وبناء خط الحمل له (b)

تحدد قيمة المقاومة الستاتيكية للثنائي حسب العلاقة :

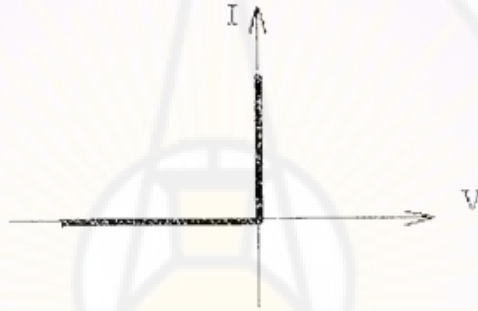
$$R_f = \frac{V_f}{I_f} \quad (1-2)$$

1-2-2- الشانني المثالي :Ideal Diode

إذا كانت مقاومة الحمل أكبر بكثير من مقاومة الشانني الأمامية $R_L \gg R_f$ فإن قيمة التيار الأمامي يتحدد من العلاقة:

$$I_f = \frac{E}{R_L} \quad (1-3)$$

أي في هذه الحالة يمكن اعتبار الشانني مثالياً.



الشكل 1 - 9 . خواص الفولت-أمبير لشانني المثالي

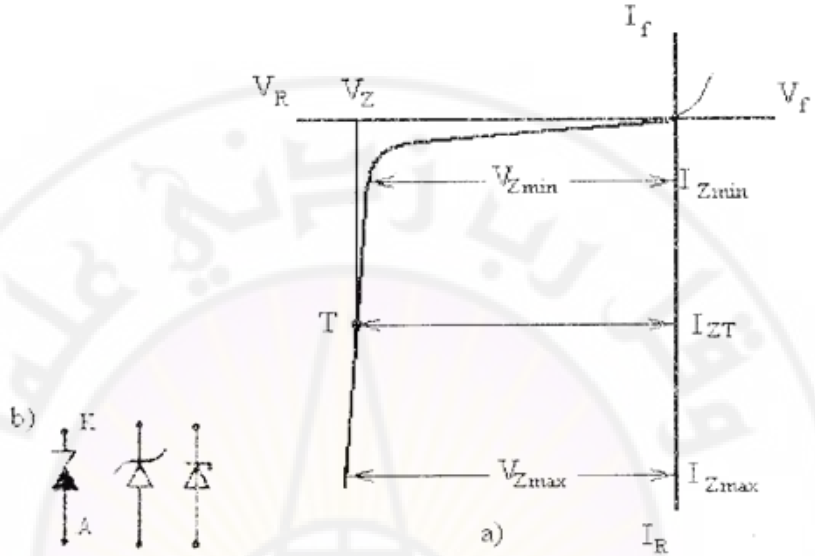
الشانني المثالي - هو عبارة عن وسيلة إلكترونية غير خطية مقاومتها الأمامية لتيار تساوي الصفر ومقاومتها العكسية تساوي اللانهاية . وبالتالي فإن هبوط الجهد على الشانني يساوي الصفر في حالة الانحياز الأمامي والتيار العكسي له يساوي الصفر ، كما هو واضح من خواص الفولت - أمبير المبينة في الشكل 1 - 9 .
يمكن اعتبار الشانني المثالي بأنه قاطع يكون مغلقاً في حالة الانحياز الأمامي ويكون مفتوحاً في حالة الانحياز العكسي .

1-3- ثنائي زينر Zener Diode:

بيننا سابقاً بأن من خواص الفولت - أمبير لثنائي الشكل 1-7، وجود جزء الانهيار الكهربائي (ABC)، الذي يمكن أن يستخدم لتثبيت الجهد، حيث يكون التيار العكسي صغيراً جداً قبل حدوث الانهيار ويصبح ذا قيمة كبيرة كالتيار الأمامي بعد حدوثه.

يبين الشكل 1-10-a خواص الفولت - أمبير لثنائي زينر في حالة الانهيار العكسي، أما خواصه الأمامية فهي نفسها لثنائي الأغراض العامة، ويبين الشكل 1-10-b رمز ثنائي زينر.

تصنع ثنائيات زينر ذات الجهد المنخفض حتى 7V من السليكون المشوّب إشابة مركزة، عندئذ يكون عرض منطقة العبور (d) صغيراً، ومقاومتها النوعية صغيرة، وحسب العلاقة $E = \frac{V}{d}$ تصبح شدة المجال الكهربائي عالية، و يحدث الانهيار بتأثير الظاهرة النفقية بشكل أساسي. فحسب قوانين الفيزياء الكوانتية يمكن للإلكترونات أن تعبر حاجز كمون ضيق دون أن تتغير طاقتها. عندئذ يصبح المعامل الحراري $(\alpha = \frac{\Delta V_Z}{V_Z \Delta T})$ سلبياً و يعمل ثنائي زينر على جزء الانهيار الكهربائي من خواصه، دون أن ترتفع درجة حرارته. أما ثنائيات زينر التي تعمل على جهود أعلى من (7V) فتصنع بمسويات إشابة قليلة، كما في الثنائي العادي، ولكن تكون بنيتها متجانسة جداً، مما يلغي إمكانية تسرب التيار عبر سطح نصف الناقل. فيمر التيار عبر سطح المعبر p-n بتركيز متساو، فتبقى كثافة التيار في الثنائي وحرارته ضمن الحدود المسموح بها. وتنخفض احتمالية حدوث انهيار حراري.



الشكل 1 - 10 . خواص القولت أمبير لثنائي زينر ورموزه

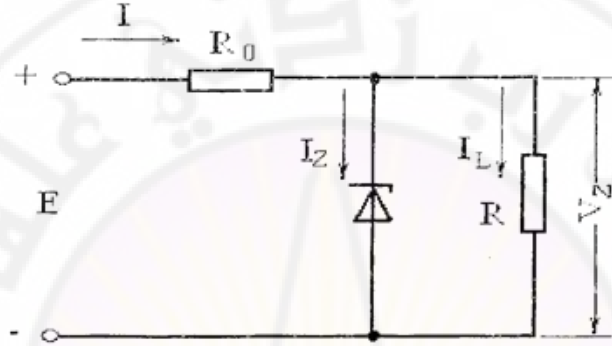
1-3-1- دارات تنظيم الجهد باستخدام ثنائي زينر:

عندما يحدث التغير في الجهد عند الركة يرتفع التيار بسرعة لتغير صغير جداً في الجهد، لذلك من الضروري وصل مقاومة خارجية R_0 للحد من هذا التيار لكي يبقى أقل من القيمة العظمى المسموح بها I_{Zmax} (الشكل 1 - 11) .
تحدد قيمة المقاومة R_0 من العلاقة:

$$R_0 = \frac{E - V_Z}{I_{ZT} + I_I} \quad (1-4)$$

حيث: $I_{ZT} = \frac{I_{Zmax} + I_{Zmin}}{2}$ - القيمة المتوسطة لتيار زينر

و $E = \frac{E_{\max} + E_{\min}}{2}$ - القيمة المتوسطة لجهد المنبع .



الشكل 1 - 11 . دائرة تثبيت جهد

في الكثير من التصميمات يفضل أن يكون $I_{ZT} = I_{L, \text{nom}}$ حيث $I_{L, \text{nom}}$ - التيار الاسمي للحمل.

إن تركيب الثنائي ومبرده الحراري يجب أن يتمكن من تبديد القيمة العظمى لحرارة المتولدة في الثنائي والمكافئة للاستطاعة $P_{Z, \text{max}}$

$$P_{Z, \text{max}} = V_Z \times I_{Z, \text{max}} \quad (1-5)$$

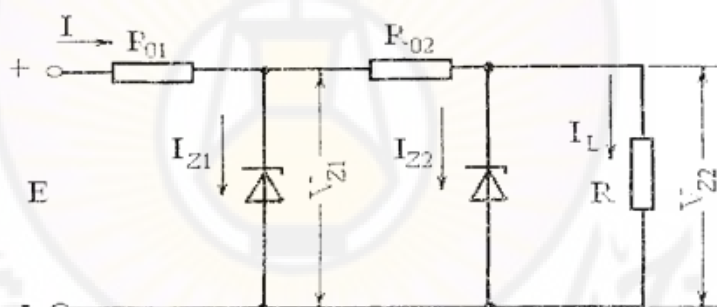
ينظم ثنائي زينر الجهد ضمن المجال $(V_{Z, \text{min}}, V_{Z, \text{max}})$ وتحدد قيمة مقاومته الديناميكية من العلاقة :

$$r_z = \frac{\Delta V_z}{\Delta I_z} \quad (1-6)$$

إذا تغيرت E ، يتغير تيار ثنائي زينر، ولكن الجهد على طرفيه وعلى الحمل يبقى ثابتاً تقريباً. أي أن جميع تغيرات جهد المنبع تمتصها المقاومة R_0 . لذا فإن تنظيم الجهد يتحقق إذا تحقق الشرط:

$$\Delta E \leq (I_{Z \max} - I_{Z \min}) \cdot R_0 \quad (1-7)$$

من أجل زيادة قدرة الدارة على تثبيت الجهد تستخدم الدارة التعاقبية المبينة في الشكل 1 - 12.



الشكل 1 - 12 . دارة تثبيت جهد تعاقبية

يجب أن يكون جهد التشغيل لثنائي زينر الأول V_{Z1} أكبر من جهد التشغيل لثنائي V_{Z2} .

تقاس فاعلية تثبيت الجهد بعامل تثبيت الجهد (عامل الاستقرار) K_{sr} الذي يبين نسبة التغير في جهد الدخل $(\Delta E/E)$ إلى نسبة التغير في جهد الخرج $(\Delta V_z/V_z)$

$$K_{ST} = \frac{\Delta E / E}{\Delta V_z / V_z} \quad (1-8)$$

ففي الدارة المبينة في الشكل 1 - 11 ، لا تتجاوز قيمة K_{ST} العشرات. في حين تصل في الدارة المبينة في الشكل 1 - 12 إلى عدة مئات، وذلك لأن عامل تثبيت الجهد K_{ST} يساوي حاصل ضرب عاملي التثبيت للدائرتين المتعاقبتين:

$$K_{ST} = K_{ST1} \times K_{ST2}$$

مثال 1-2:

لثنائي زينر المواصفات التالية:

$$P_Z = 0.5W, r_Z = 8\Omega, I_{ZT} = 13mA \text{ عند } V_Z = 20V$$

أوجد قيمة $V_{Z \max}$ ، $V_{Z \min}$ وما هو التغير بالنسبة المئوية في V_Z لهذا المجال؟
الحل:

نحدد القيمة العظمى للتيار المسموح به:

$$I_{Z \max} = \frac{P_Z}{V_Z} = \frac{0.5}{20} = 0.025A = 25mA$$

$$r_Z = \frac{\Delta V_Z}{\Delta I_Z} = \frac{V_{Z \max} - V_Z}{I_{Z \max} - I_{ZT}} \quad \text{نحدد قيمة } V_{Z \max}$$

$$V_{Z \max} = V_Z + (I_{Z \max} - I_{ZT}) \times r_Z =$$

$$20 + (0.025 - 0.013) \times 8 = 20.096V$$

$$I_{Z \min} = 2I_{ZT} - I_{Z \max} = 1mA$$

من الشكل 1 - 10 بُعد :

$$V_{Z \min} = V_z - (I_{ZT} - I_{Z \min})r_z =$$

$$20 - (0.13 - 0.001) \times 8 = 19.004V$$

وتكون النسبة المئوية للتغير بالجهد تساوي :

$$\Delta V_z \% = \frac{V_{Z \max} - V_{Z \min}}{V_z} \times 100 = \frac{20.096 - 19.004}{20} \times 100 \cong 1\%$$

مثال 2-1:

للدارة المبينة في الشكل 1 - 11 إذا كانت $R = 50\Omega$ و $E = 12.5V$ واستطاعة ثنائي زينر $0.5W$ وجهدده $10V$. فما هو مجال تغيير التيار I_1 الذي يحقق تنظيم (تثبيت) الجهد على الحمل ؟

الحل:

نحدد قيمة تيار الدخل :

$$I = \frac{E - V_z}{R_0} = \frac{12.5 - 10}{50} = 0.05A = 50mA \leftarrow E = IR_0 + V_z$$

التيار الأعظمي المسموح به للثنائي:

$$I_{Z \max} = \frac{P_z}{V_z} = \frac{0.5}{10} = 0.05A = 50mA$$

نعتبر أن أصغر تيار مسموح به يساوي الصفر:

$$I_{Z \min} = 0$$

فيكون مجال تغيير تيار الحمل هو:

$$I_{L \max} = I - I_{Z \min} = 50 - 0 = 50 \text{ mA}$$

$$I_{L \min} = I - I_{Z \max} = 50 - 50 = 0$$

مثال 3-1:

في الدارة المبينة في الشكل 11-1 لدينا:

$R_0 = 50 \Omega$ و $I_L = 25 \text{ mA}$, $P_Z = 0.5 \text{ W}$, $V_Z = 10 \text{ V}$
ما هو مجال تغير E الذي يحقق تنظيم V_Z ؟

الحل:

أعظم تيار مسموح به لثنائي زينر يساوي:

$$I_{Z \max} = \frac{P_Z}{V_Z} = \frac{0.5}{10} = 0.05 \text{ A} = 50 \text{ mA}$$

ويكون تيار الدخل الأعظمي المسموح به :

$$I_{\max} = I_L + I_{Z \max} = 25 + 50 = 75 \text{ mA}$$

وأصغر تيار دخل مسموح به:

$$I_{\min} = I_L + I_{Z \min} = 25 + 0 = 25 \text{ mA}$$

فتكون قيمة E العظمى التي تحافظ على التنظيم تساوي:

$$E_{\max} = V_Z + I_{\max} R_0 = 10 + 0.075 \times 50 = 13.75 \text{ V}$$

وقيمة E الصغرى :

$$E_{\min} = V_Z + I_{\min} R_0 = 10 + 0.025 \times 50 = 11.25 \text{ V}$$

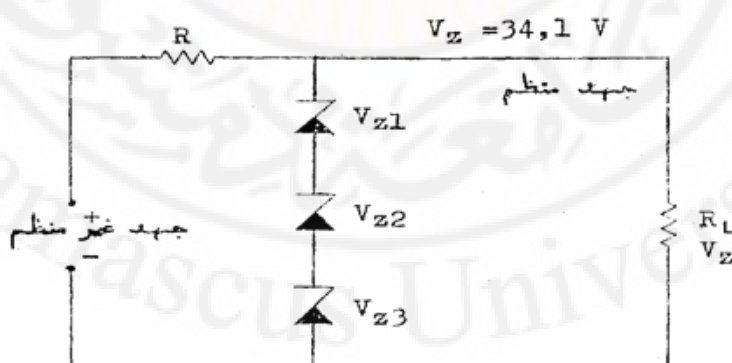
- استخدام ثنائيات زينير على التسلسل:

يمكن الحصول على ثنائيات زينير بقيم متعددة من جهد زينير، حيث يمكن أن

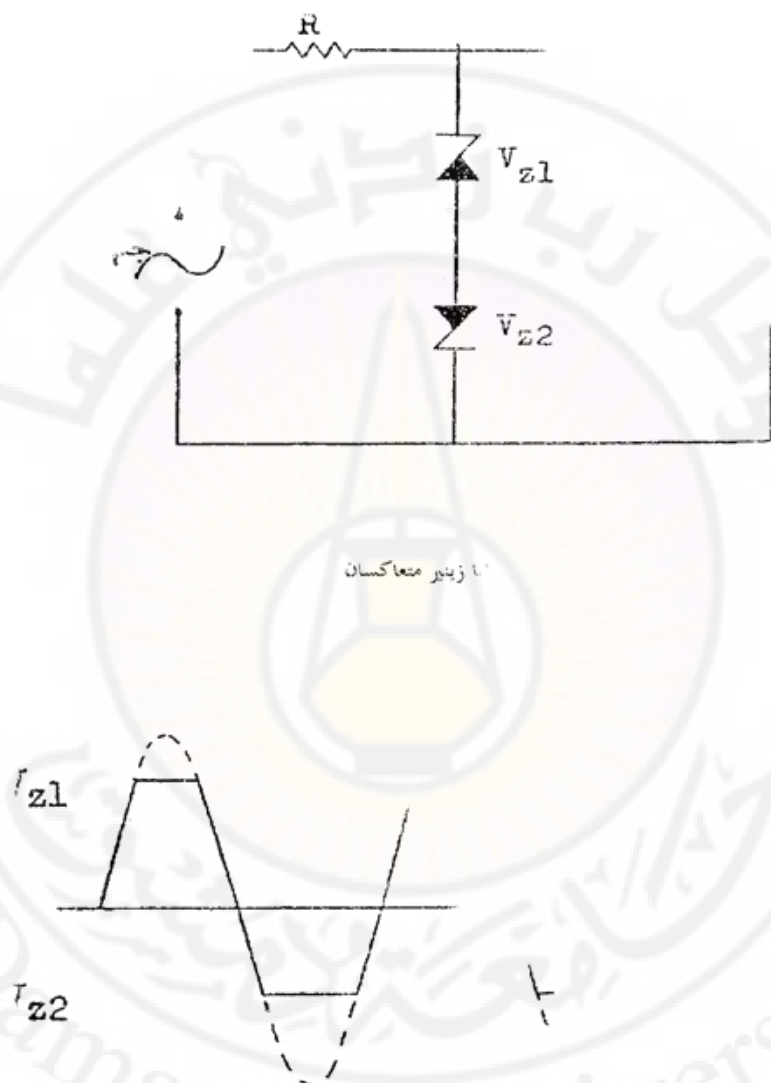
يأخذ (V_Z) إحدى القيم التالية، على سبيل المثال، 3 أو 4 أو 5.5 أو 7 فولت.
 يمكن توصيل اثنين أو أكثر من هذه الثنائيات على التسلسل مع بعضها وبنفس
 الاتجاه من أجل الحصول على جهد تنظيم جديد مساوٍ إلى مجموع جهود زينير
 للثنائيات التي تُوصَل مع بعضها على التسلسل كما يبينه الشكل 13-1.
 لنعتبر، مثلاً، أن لدينا عدداً من ثنائيات زينير لها جهود زينير التالية:
 (9 ، 12 ، 13.1) فولت. فتوصيل هذه الثنائيات على التسلسل يعطينا جهد زينير
 مكافئ كلي يساوي ما يلي:

$$V_Z = 9 + 12 + 13.1 = 34.1 \text{ Volts}$$

ويمكن توصيل ثنائي زينير مع بعضهما على التسلسل، أيضاً، لكن باتجاهين
 متعاكسين كما يبينه الشكل 14-1. فإذا طبق على مدخل هذه الدارة موجة جيبية،
 وكان مطال هذه الموجة أكبر من كل من جهد زينير لكل ثنائي، (V_{Z1}) و (V_{Z2})
 فإنه ستم عملية قص للذروتين الموجبة والسالبة عند مستويي جهد زينير كما يبينه
 الشكل 15-1.



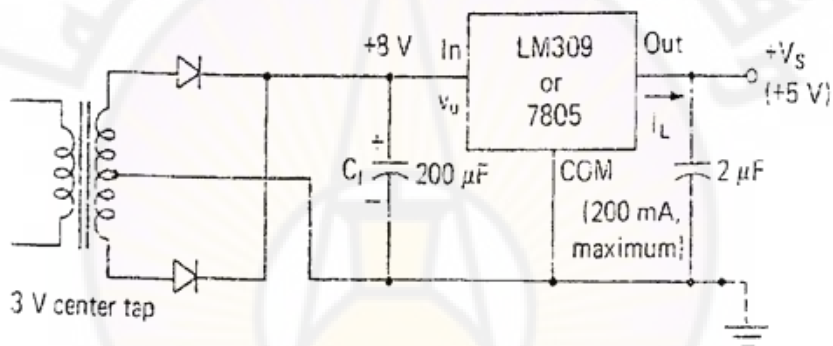
شكل 13-1. جمع جهود زينير على التسلسل



شكا 1-15. قص ذروي اشاراة الخرج عند مستويي جهد زينير

3- دارات تنظيم الجهد باستخدام دارات تكاملية (IC):

يبين الشكل 1-16 دائرة تكاملية (IC) لتنظيم الجهد. وتعتبر الجهود V_{in} هي ذات القيم (5 & 15 V). وهذه الوحدات ذات الأطراف الثلاثة. دارات تنظيم الجهد الأكثر بساطة حيث إن كل ما يحتاجه الأمر هو توصيل مرة إلى المنبع غير المنظم ويؤخذ جهد منظم ثابت القيمة من مخرج الدارة.

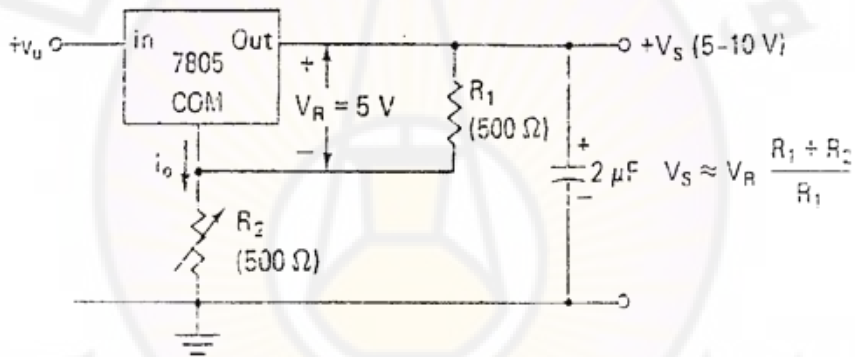


شكل 1-16. منبع تغذية مجهز بمنظم جهد موجب ثابت القيمة ذو دائرة تكاملية

تتطلب معظم المنظمات أن يكون جهد الدخل أعلى بمقدار من 2 إلى 3 فولت الأقل من جهد الخرج. إن الدارة التكاملية هذه مزودة بمحدد للتيار (من من حالات الدارة القصيرة). وعندما لا تُجهز دارات التنظيم هذه بمشعة من أجل تصريف الحرارة، كما هو متبع عادة، فإن مقدار استهلاكها للقدرة $I_L (V_{in} - V_s)$ يكون محددًا حتى قيمة تقارب (1 W). تعتبر هذه الدارة صالحة للاستخدام في التطبيقات ذات التيار المنخفض.

وحدة التنظيم المبينة في الشكل 1-16 هي منظم موجب حيث يكون كما

يضاً سلسلة من منظّمات جهد سالب ثلاثية الأطراف، نذكر منها على س
 لدارة التكاملية ذات الرقم - 7905.
 يمكن تحويل المنظّمات ذات جهد الخرج المنظّم الثابت هذه إلى منظّمات د
 خرج منظّم قابل للتغيير (جهد خرج منظّم متغير) حيث يتطلب الأمر إض
 تين كما يبينه الشكل 17-1.



شكل 17-1. منبع تغذية مجهز بمنظّم جهد موجب
 متغير القيسة ذو دارة تكاملية

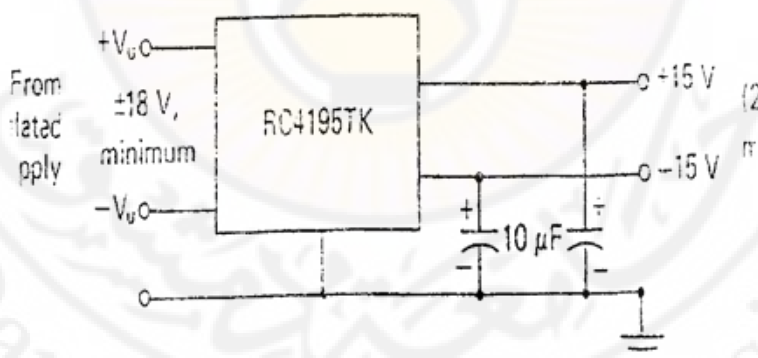
حيث إن المنظّم يحافظ على جهد (V_R) ثابت بين المخرج والطرف المشد
 إنه يمكن اعتبار أن الجهد (V_S) الذي يتوزع على المقاومتين هو جهد خرج
 ... نسبة المقاومات إلى بعضها، تقريباً، حسب المعادلة التالية:

$$V_S \approx V_R \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

إن التيار (I_0) وهو محدود (5 to 10 mA)، يمر في مسار زمني سريع. إن هذا التيار يتغير إلى حد ما مع تغير تيار الحمل، لذلك فإن جودة التنظيم نظّامات ذات جهد الخرج المنظّم المتغير القيمة هي أدنى من جودة التنظيم في المنظّات. جهد الخرج المنظّم الثابت القيمة.

هناك دوائر تكاملية مزدوجة الفعل، تعمل على منابع تغذية مزدوجة أو نتعطي جهوداً منظّمة موجبة وسالبة كما يبينه الشكل 18-1.

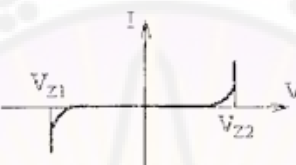
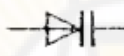
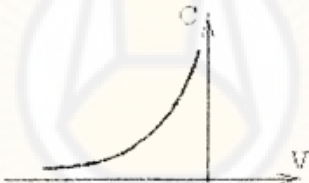
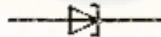
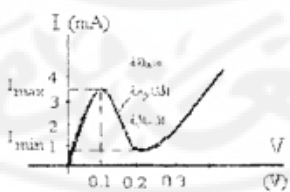
تتميز هذه الدارة بأن الجهد السالب يتبع الجهد الموجب، وهذا الأمر يعتبر نة استخدام هذه الدارة لتغذية مكبرات العمليات على سبيل المثال. بالتالي، فإن ارة مكبر العمليات يكون أقل تأثراً عندما يتغير كن من ($+V_S$) و ($-V_S$) بما سوية.

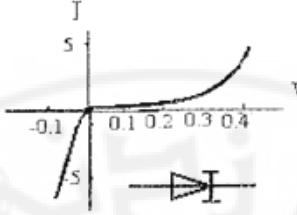
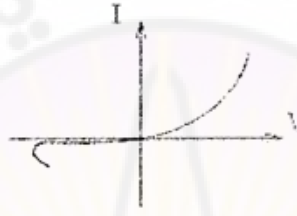


شكل 18-1. منظّم ذو دائرة تكاملية بخرج مزدوج

الجدول 1 - 1 رموز وخواص بعض أنواع الشناتيات:

الجدول 1-1

نوع الثنائي	الخواص والرمز	عمله واستخداماته
١- ثنائي مرجع الجهد	 	عباره عن ثنائي زينر موصلين بشكل متعاكس ويستخدم هذا العنصر كمرجع للجهد وكمحدد للإشارة على مستوى معين
٢- الثنائي السعوي	 	يعتمد في عمله على مكثفة الوصلة ويستخدم في دارات موالفقة الترددات
٣- الثنائي النفقي	 	يعتمد في عمله على الظاهرة النفقية ويستخدم في المهتزات وكمكبر ذي مقاومة سالبة

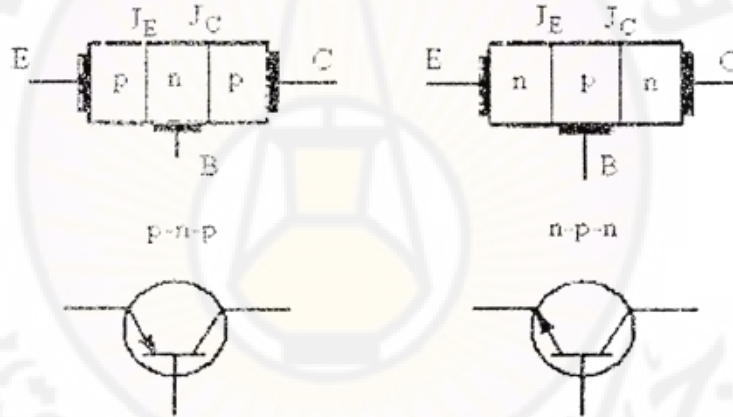
يكون جهد الاكثيار لهذا الثنائي منخفضاً جداً		٤- الثنائي الخلفي BACKWARD DIODE
يتميز بسعة منخفضة ، لذلك يستخدم في الدوائر ذات التردد العالي		٥- ثنائي التقويم ذو نقطة الاحتكاك POINT CONTACT RECTIFICATION DIODE

1-4-4- الترانزستور ذو الوصلة ثنائي القطبية:

Bipolar Junction Transistor – BJT

1-4-1- تركيب وبنية الترانزستور:

يبين الشكل 1 - 19 تركيب طبقات ورمزي نوعي الترانزستورات n-p-n و p-n-p.



الشكل 1 - 19 . تركيب طبقات الترانزستور ورمزيه

الترانزستور - هو وسيلة إلكترونية تستخدم لتضخيم الاستطاعة أو كقواطع إلكتروني، وهو عبارة عن شريحة من الجرمانيوم أو السيلكون شُكّلت عليها بالإشابة ثلاث طبقات n-p-n أو p-n-p، تكون الطبقة الوسطى رقيقة جداً وتشكل طبقة القاعدة (Base)، التي تكون أشابتها ضعيفة جداً بالمقارنة مع الإشابة المركزة للطبقتين الجانبيتين التي تشكل طبقة الباعث (Emitter) وطبقة المجمع (Collector) وتكون عادة طبقة المجمع أسمك الطبقات.

نلاحظ من الشكل 1 - 19 بأن الترانزستور يتألف من وصليتين (p-n) : الأولى: تقع بين المجمع والقاعدة وتسمى وصلة المجمع I_E ، والثانية- بين الباعث والقاعدة وتسمى وصلة الباعث I_E ، يدل السهم في رمز الترانزستور على اتجاه التيار، عندما تكون وصلة الباعث منحازة أمامياً.

ملاحظة: تسمى الطبقة التي تخرج منها حاملات الشحنة الأساسية بالباعث والطبقة المستقبلية لهذه الحاملات بالقاعدة. فإذا كان عدد الإلكترونات في n أكبر من عدد الثقب في p تكون n باعثاً و p قاعدة، فيُهمَل تدفق الثقب وينظر بتدفق الإلكترونات فقط، وإذا كان عدد الثقب في p أكبر من عدد الإلكترونات في n ينظر بتدفق الثقب فقط.

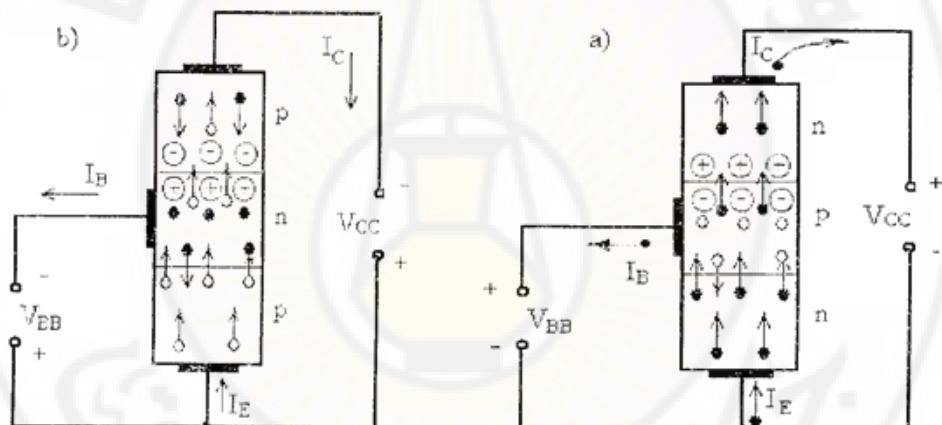
1-4-2- الأسس الفيزيائية لعمل الترانزستور:

لشرح كيفية عمل الترانزستور نأخذ أولاً الترانزستور (n-p-n) المبين بالشكل 1-20- a، عند وصله بشكل مباشر مع منبع تغذية مستمر.

عندما يكون المنبع V_{BB} مفصلاً فإن وصلة المجمع تكون منحازة عكساً مما يزيد اتساع منطقة الاستتراف والجهد الحاجر عنى هذه الوصلة أما وصلة الباعث فتكون منحازة أمامياً، ولكن باعتبار دائرة القاعدة مفتوحة فإن هذا الانحياز ليس له تأثير يذكر. عند وصل الجهد V_{BB} ، فإنه يسقط على وصلة الباعث بالتحيز أمامي فيتدفق التيار عبر الوصلة وتنطلق الإلكترونات بأعداد كبيرة، من الباعث إلى القاعدة، وينشج عن حقن الإلكترونات في القاعدة تيار الباعث (I_E) وبما أن الإلكترونات في الطبقة p هي حوامل شحنة أقلية ، فإن القسم الأعظم منها يعبر القاعدة ووصلة المجمع تحسب تأثير المجال الكهربائي لوصلة المجمع وكذلك قوة جذب القطب الموجب للمنبع V_{BB} ذي الجهد العالي نسبياً، وينتج عن هذا التدفق للإلكترونات تيار المجمع I_C قسم ضئيل جداً من هذه الإلكترونات يتحد في القاعدة أو يصل إلى القطب الموجب للمنبع V_{BB} (ذي

الجهد المنخفض بالمقارنة مع V_{cc} وينتج عن ذلك تيار القاعدة I_B . بتطبيق قانون كيرشوف على دائرة الترانزستور نجد بأن تيار الباعث يساوي مجموع تياري القاعدة و المجموع:

$$I_E = I_B + I_C \quad (1-9)$$



الشكل 1 - 20 حركة الإلكترونات والفجوات في الترانزستورات نوع (a) n-p-n و (b) p-n-p.

يسمى المعامل المستخدم لربط نسبة تيار المجمع إلى تيار الباعث المولد له بنسبة تحويل تيار الباعث (α) :

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} \quad (1-10)$$

لو أن الترانزستور صنع بقاعدة عريضة وبتركيز كبير للثقب، لاحتدت جميع الإلكترونات المنطلقة من الباعث مع ثقب القاعدة فلا تصل إلى المجمع وتكون α صغيرة جداً. ولكن تصنع الترانزستورات كما ذكرنا بقاعدة ضيقة وبتركيز خفيف وبالتالي فإن قيمة α تكون قريبة من الواحد.

$$\alpha = (0.95 - 0.998)$$

يعمل الترانزستور p-n-p (انشكال 1-20-b) بشكل مشابه لترانزستور n-p-n ، ولكن بدلاً من الإلكترونات تنطلق من الباعث ثقب تكون للقاعدة n، حوامل شحنة أقلية. ويزيادة تيار الباعث يعبر المزيد من هذه الثقب القاعدة إلى وصلة المجمع مما يؤدي إلى إنقاص جهدها الحاجز وتخفيض مقاومتها وتتحد هذه الثقب مع الإلكترونات القادمة من القطب السالب لمنع مسبة تيار المجمع I_B . وتقدر الملاحظة بأن قطبية الجهود V_{CB} و V_{BE} تكون معاكسة في هذه الحالة لما هو مطبق على الترانزستور n-p-n. باستثناء هذا التغيير في قطبية الجهود، فإنه لا يوجد اختلاف في سلوك الدارة الخارجية وتبقى المعادلات (1-9) و (1-10) وغيرها صحيحة لكلا الترانزستورين.

كما حددنا (α) بأنها نسبة تحويل تيار الباعث يمكن أيضاً تحديد نسبة تيار المجمع إلى القاعدة (β):

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad (1 - 11)$$

تسمى (β) عامل تكبير تيار القاعدة أو نسبة تحويل تيار القاعدة المستمر الأمامي يرمز لها أحياناً (h_{FE}). يمكن استنتاج العلاقة بين (α) و (β) كما يلي:

$$I_E = I_B + I_C \quad \text{و} \quad I_C = \alpha \times I_E$$

$$I_C = \alpha(I_B + I_C) \Rightarrow I_C(1 - \alpha) = \alpha \times I_B$$

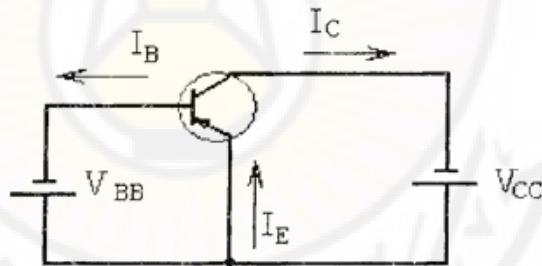
$$\text{أو} \quad \beta = \frac{I_B}{I_C} = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (1-12)$$

$$\beta(1 - \alpha) = \alpha$$

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta} \dots\dots\dots(1-13)$$

مثال 1:

للترانزستور المبين بالشكل 21-1، لدينا $I_B = 40 \mu A$ ، $\beta = 100$ حدد كلاً من I_C ، α و I_E .



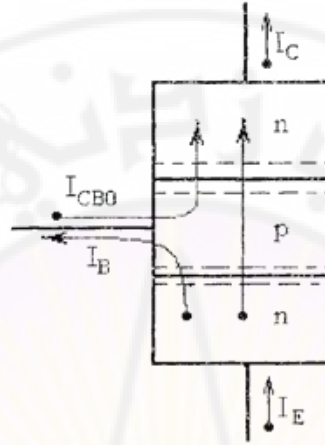
الشكل 21-1

الحل:

$$I_C = \beta I_B = 100.(40.10^{-6}) = 4mA$$

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta} = \frac{100}{1 + 100} = 0.99$$

$$I_E = I_B + I_C = 40.10^{-6} + 4.10^{-3} = 4.04mA$$



الشكل 1 - 22. تيارات الترانزستور

إن علاقات (α) و (β) و $(1 - \beta)$ و $(1 - \alpha)$ صحيحة فقط إذا أهملنا قيمة التيار العكسي المار خلال وصلة المجمع ففي حقيقة الأمر هنالك تيار عكسي صغير جداً لا يتجاوز الواحد مايكرو أمبير يمر بين القاعدة والمجمع ولا يمر من الباعث (الشكل 1-22)، يسمى هذا التيار بتيار التشبع العكسي I_{CBO} وهو ناتج من حاملات الشحنة الأقلية التي تتولد بسبب الحرارة كما في الثنائي. لذلك فإن القيمة الدقيقة لتيار المجمع هي:

$$\begin{aligned} I_C &= \alpha I_E + I_{CBO} \\ I_C &= \alpha(I_C + I_B) + I_{CBO} \\ I_C(1 - \alpha) &= \alpha I_B + I_{CBO} \quad (1 - 14) \\ I_C &= \frac{\alpha}{1 - \alpha} I_B + \frac{I_{CBO}}{1 - \alpha} \end{aligned}$$

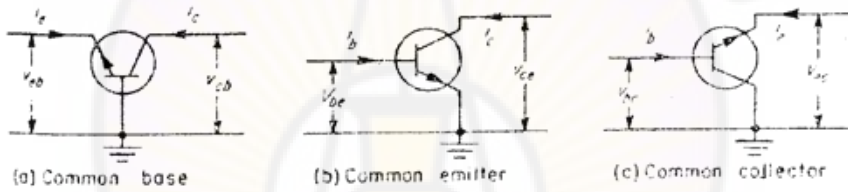
$$I_C = \beta \times I_B + I_{CEO}$$

حيث: $I_{CEQ} = \frac{I_{CO}}{1 - \alpha}$ - تيار قطع المجموع.

في بعض حسابات الترانزستور يُهمل التيار العكسي بسبب صغره.

1-4-3 طرق توصيل الترانزستور:

هناك ثلاثة أنواع لتوصيل الترانزستور في الدارات هي:



الشكل 1 - 23. دارات توصيل الترانزستور

أ- دائرة الباعث المشترك- ويكون فيها الباعث مشتركاً بين مدخل الترانزستور ومخرجه (الشكل 1 - 23-b).

ب- دائرة القاعدة المشتركة- وتكون فيها القاعدة مشتركة بين الدخول والمخرج (الشكل 1 - 23-a).

ت- دائرة المجموع المشترك- ويكون فيها المجموع مشتركاً بين دخل ومخرج الترانزستور (الشكل 1 - 23-c).

إن دائرة الباعث المشترك ودائرة القاعدة المشتركة هي المنتشرة والمستخدمه عملياً لذلك سوف تتناول خواص هاتين الدائرتين بشيء من التفصيل.

1-4-4-4- الخواص الستاتيكية للترانزستور:

الخواص الستاتيكية للترانزستور هي العلاقة بين تيارات وجهود الترانزستور الذي يعمل في دائرة تيار مستمر.

لا تختلف خواص الترانزستور p-n-p عن n-p-n سوى بالقطبية.

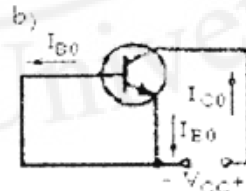
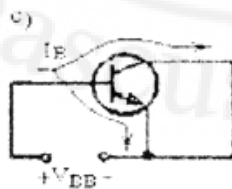
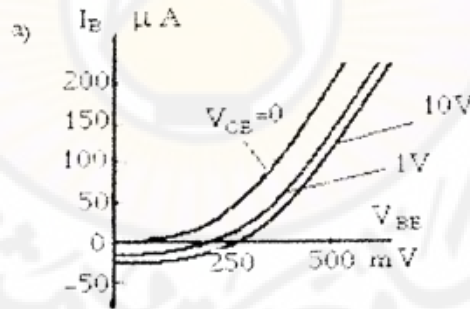
1-4-4-1- خواص الترانزستور ذي الباعث المشترك:

أ- خواص الدخل:

وهي العلاقة بين تيار الدخل I_B وجهد الدخل V_{BE} عند قيم ثابتة جهد الخرج

V_{CE} :

$$I_B = f(V_{BE})|_{V_{CE}=CONST}$$



الشكل 1 - 24. خواص الدخل لدائرة الباعث المشترك

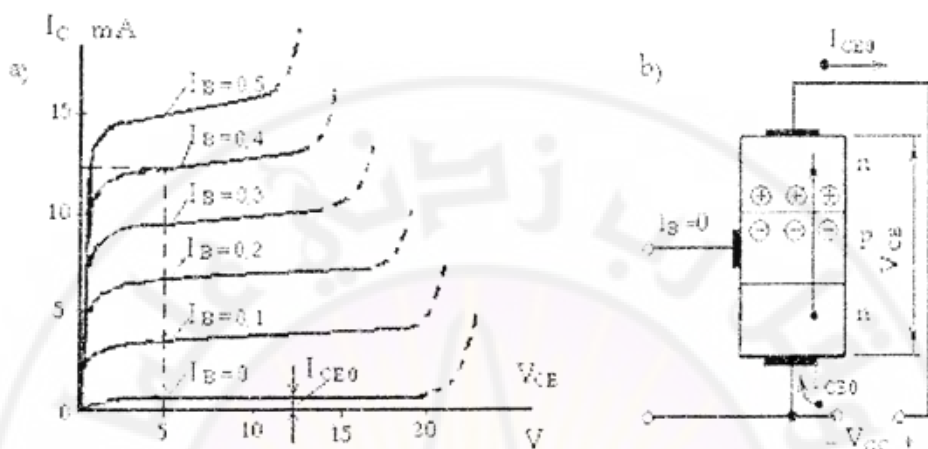
إن خواص الدخل ، وكذلك خواص الخرج للترانزستور، مشابهة تماماً لخواص الثنائي. فلو نظرنا إلى الشكل b-23-1 نجد أن خواص الدخل هي خواص وصلة انبعاث التي هي وصلة p-n منحازة أمامياً. لذلك فهي مشابهة للخواص الأمامية للثنائي العادي.

يبين الشكل a-24-1 خواص دخل الترانزستور. فعندما تكون $V_{CE}=0$ ، تبدأ الخواص من بداية الإحداثيات بسبب عدم وجود أي تيار عند هذه النقطة. فعندما تكون $V_{CE}=0$ ، أي الجمع والباعث مقصوريين مع بعضيهما كما هو مبين في الشكل c-24-1 تصبح وصلتا الباعث والجمع منحازتين بشكل أمامي فيتفرع تيار القاعدة عبر هاتين الوصلتين. وعندما تكون $V_{CE}>0$ تنحرف الخواص نحو اليمين، ومع تخفيض قيمة V_{BE} يقل تيار القاعدة ويصبح ذا قيم سالبة. وبالفعل لو نظرنا إلى الشكل b-24-1 نجد بأنه عندما تكون $V_{BE}=0$ يمر تيار ابتدائي صغير من الجمع وذلك تحت تأثير الجهد $V_{CC}=V_{CE}$ ويتفرع هذا التيار إلى تيار الباعث الابتدائي وتيار القاعدة الابتدائي I_{BO} الذي يعاكس بالاتجاه تيار القاعدة العادي I_B . فلو وصلنا الآن المنبع V_{BB} ورفعنا الجهد بشكل تدريجي فسوف ينتج عنه تيار وليكن I_{BB} ، فيكون تيار القاعدة عبارة عن محصلة الفرق بين هذين التيارين: $I_B = I_{BB} - I_{BO}$ وهذا ما يبينه الشكل a-24-1 لحالة $V_{CE}>0$. إن رفع الجهد V_{CE} (من 1 إلى 10V مثلاً) لن يكون له تأثير يذكر على خواص الدخل.

ب- خواص الخرج للترانزستور ذي الباعث المشترك:

يبين الشكل a-25-1 خواص الخرج للترانزستور ذي الباعث المشترك لعدة قيم ثابتة لتيار القاعدة، وهي العلاقة بين تيار الخرج I_C وجهد الخرج V_{CE} عند قيم ثابتة لتيار الدخل I_B .

$$I_C = f(V_{CE})|_{I_B = \text{CONST}}$$



الشكل 1 - 25. خواص الخرج للترانزستور ذي الباعث المشترك

فعند $I_B = 0$ يبدأ منحنى الخواص من بداية الإحداثيات ويشابه تماماً منحنى التيار العكسي للشانتي، لأن في حالة $I_B = 0$ تكون دائرة القاعدة مفصولة (الشكل 1-25 - b) ويمر تيار صغير جداً يسمى تيار قطع المجمع I_{CE0} . وبالفعل من العلاقة (1-14) نجد بأنه عندما يكون $I_B = 0$ فإن $I_C = I_{CE0}$.

عند زيادة تيار القاعدة ($I_B > 0$)، يصبح منحنى خواص الخرج أعلى من المنحنى الأول وكلما زدنا I_B ترتفع هذه الخواص للأعلى. إن زيادة قيمة I_B تزيد تيار الباعث I_E بسبب الانحياز الأمامي لوصلة الباعث وبنفس الوقت يزداد تيار المجمع I_C . بما يتناسب مع I_E ، $(I_C = \alpha \times I_E)$.

تبين خواص الخرج بأن I_C يتزايد في البداية بشكل حاد ومباشر مع زيادة V_{CE} ولكن عند متابعة زيادة V_{CE} تكون الزيادة في I_C طفيفة جداً، وذلك لأنه عندما يكون الجهد V_{CE} صغيراً جداً، فإن أية زيادة في هذا الجهد تزيد احتمال جذب حاملات الشحنة المحقونة، بتأثير تيار القاعدة، إلى المجمع، ولكن عندما يصل V_{CE} إلى مستوى معين، فإن كل الحاملات المحقونة تندفع عبر وصلة المجمع وبذلك فإن زيادة V_{CE} لن

تسبب زيادة ملحوظة في I_C ، بل الزيادة الطفيفة في I_C تنتج عن إعادة رفع V_{BE} من أجل إبقاء I_B ثابتاً.

عند زيادة V_{CE} فوق حد معين يحصل انحدار كهربائي (الخط المتقطع) وكلمة كان I_C أكبر تنخفض قيمة جهد الانحدار. ويعتبر مجال الانحدار مجالاً غير مرغوب به ولا يُشغّل الترانزستور عليه.

يمكن استخدام منحنيات خواص الخرج لتحديد قيم α و β .

مثال:

حدد قيمة α و β للترانزستور المبينة خواصه في الشكل 1-25، عندما تكون $V_{CE}=5V$ و $I_B=0.4mA$.

الحل:

إن القيمة الموافقة للجهد $V_{CE}=5V$ وللتيار $I_B=0.4mA$ هي $I_C=10.5mA$ هذا يعطي نقطة العمل Q ، ولذلك فإن:

$$\alpha = \frac{I_C}{I_B} = 0.963 \quad \text{و} \quad \beta = \frac{I_C}{I_B} = 26$$

تعرف نسبة التحويل الديناميكية لتيار القاعدة بأنها نسبة التغير في تيار المجموع ΔI_C إلى التغير في تيار القاعدة ΔI_B عند نقطة عمل معينة و V_{CE} ثابتة.

$$\beta_{ac} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

تعرف بصورة مماثلة نسبة التحويل الديناميكية لتيار الباعث بأنها نسبة التغير في

تيار المجموع إلى التغير في تيار الباعث عند نقطة عمل معينة و V_{CE} ثابتة .

$$\alpha_{ac} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E}$$

1-4-4-2- خواص الترانزستور ذي القاعدة المشتركة:

أ- خواص الدخل:

وهي العلاقة بين تيار الدخل I_E وجهد الدخل V_{EB} عند قيم ثابتة لجهود الخرج V_{CB} .

$$I_E = f(V_{EB})|_{V_{CB}=CONST}$$

من الشكل 1-23- a نرى بأن وصلة الباعث-القاعدة تمثل ثنائياً اشحازة أمامياً، لذلك فإن خواص الدخل مشابة تماماً لخواص الثنائي، أما بالنسبة لجهود الخرج V_{CB} فتأثيره على هذه الخواص طفيف جداً، كما في الشكل 1-26، a.

ب- خواص الخرج:

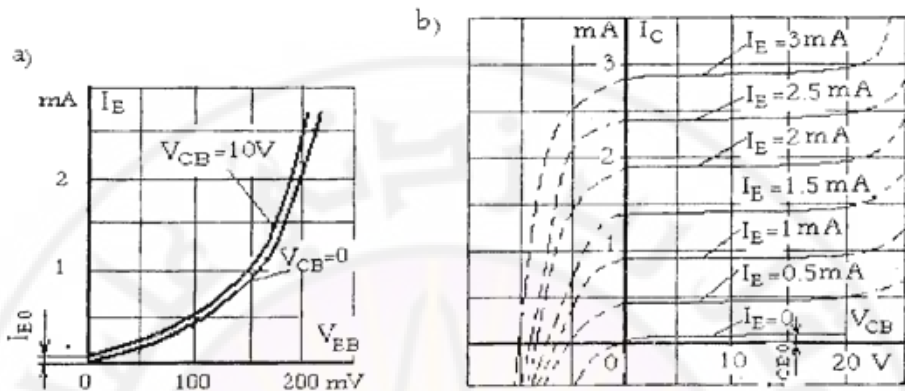
وهي العلاقة بين تيار المجمع والجهود بين المجمع والقاعدة عندما يكون تيار الباعث ثابتاً.

$$I_C = f(V_{CB})|_{I_E=CONST}$$

فعندما تكون دائرة الباعث مفتوحة $I_E=0$ تكون وصلة القاعدة-المجمع منحازة عكسياً. ويمر تيار صغير جداً عبر المجمع يساوي تيار التشبع العكسي I_{CBO} . وتشابه الخواص عند ذلك خواص الانحياز العكسي للثنائي. وعند انتيار $I_E=2mA$ يكون تيار المجمع:

$$I_C = \alpha \times I_E + I_{CBO} \cong 2mA$$

عند زيادة V_{CB} فوق حد معين يحصل الانحياز (الشكل 1-26-b). وعند عكس قطبية V_{CB} ينخفض التيار بشدة ثم يغير اتجاهه ويتزايد بسرعة، لأن وصلة المجمع تصبح منحازة أمامياً.



الشكل 1 - 26. خواص الدخل (a) والخروج (b) للترانزستور ذي القاعدة المشتركة.

1-5- الترانزستورات الحقلية (ترانزستورات تأثير المجال):

Field - Effect Transistors - FET

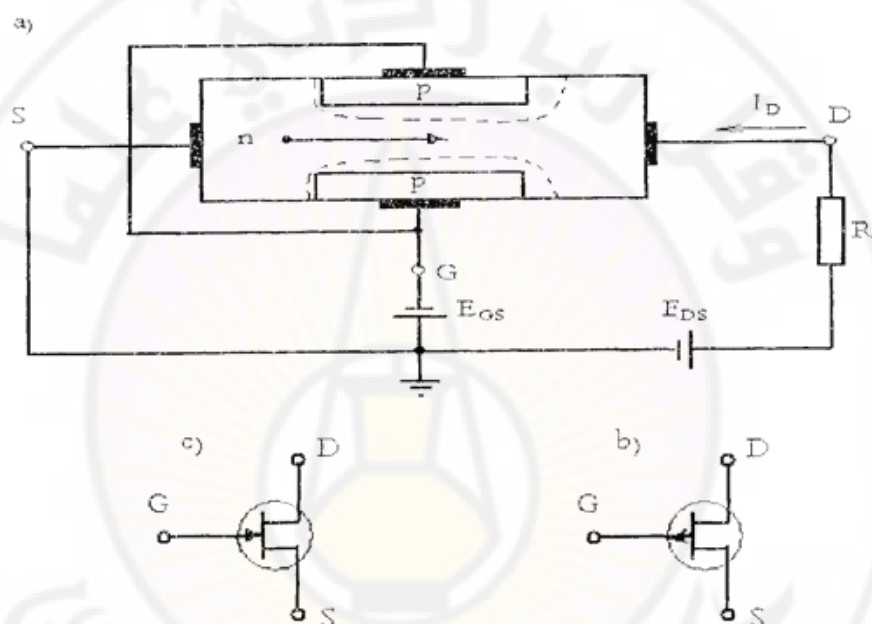
اقترح فكرة تصنيع الترانزستورات FET أحد مخترعي الترانزستور ذي الوصلة ثنائي القطبية "شوكلي" عام 1952، فالترانزستور FET يتميز عن الترانزستور العادي بمقاومة دخل عالية ولا يستهلك أي قدرة في دارة دخله .

1-5-1- الترانزستور ذو المعبر:

Junction Field - Effect Transistor - JFET

يوضح الشكل 1-27 دارة هذا الترانزستور ورمزه ، وهو يتألف من شريحة نصف ناقلة من النوع n (أو p) تشكل قناة. تُوصَل هذه القناة إلى مسريين، يسمى الأول اندي تتبع منه حاملات الشحنة بالمنبع S (Source) والثاني المصب D

(Drain). وشكلت على جانبي القناة طبقتان p (أو n) مخالفتان لنوع مادة القناة. تُوصَل هاتان الطبقتان معاً إلى قطب خارجي يُشكل البوابة (GATE) G.



الشكل 1 - 27. دائرة الترانزستور ذي المعبر (a) ورمزا النوع ذي القناة p (b) والنوع ذي القناة n (c)

إن مبدأ العمل وخواص الترانزستورات ذات القناة نوع n والقناة نوع p لا تختلف عن بعضها.

يعتمد مبدأ عمل الترانزستورات FET على تغيير مقاومة المعبر (الطبقة n على الشكل 1-27) بتغيير شدة المجال الكهربائي الناتج عن جهد البوابة E_{GS} لذلك سميت ترانزستورات تأثير المجال. فمن الشكل 1-27 نلاحظ أن القطب الموجب للمعبر الخارجي E_{DS} موصل إلى الطبقة n عن طريق الحمل R، لذلك فإن تطبيق

جهد سالب على البوابة (أي على الطبقة P) يؤدي إلى ظهور وصليتين p-n منحازتين عكسيًا. وعند زيادة جهد البوابة E_{GS} يزداد الجهد العكسي و الجهد الحاجز على الوصلتين p-n ويزداد عرض منطقتي الاستتراف و تصبحان خاليتين من حاملات الشحنة مما يؤدي إلى تناقص مقطع المعبر، الذي يمرر حاملات الشحنة و هذا يكافئ زيادة المقاومة الكهربائية لطبقة المعبر و تناقص التيار $I_D = I_S$. وعند رفع جهد البوابة إلى حد معين تصبح مساحة سطح مقطع المعبر تساوي الصفر ، أي تغلق منطقة الاستتراف المعبر بالكامل وينخفض التيار I_D الذي يمر في الحمل R إلى قيمة صغيرة جداً.

عندما تكون $E_{GS}=0$ يكون مقطع المعبر أكبر ما يمكن و مقاومته أصغر ما يمكن، عدة مئات الأومات، فيسمح المعبر بمرور أكبر تيار ممكن .

من أجل تحكم فعال بتيار الخرج بواسطة جهد البوابة يجب أن تكون مقاومة نصف ناقل المعبر عالية، أي يجب أن يكون تركيز الشوائب فيها قليلاً مما يجعل عرض منطقة الاستتراف كبيراً.

تكون منطقة الاستتراف قرب المصب أعرض منها قرب المنبع وذلك لأن جهد المعبر يكون صفرًا عند المنبع و يتراد كلما اقتربنا من المصب .

1-1-5-1- الخصائص الستاتيكية للترانزستور ذي المعبر JFET:

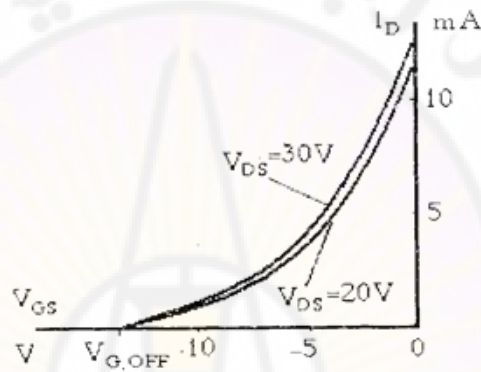
يبين الشكل 1-28 خواص الدخول (خواص القيادة) للترانزستور FET ذي المعبر، وهي العلاقة:

$$I_D = f(V_{GS})|_{V_{DS}} = const.$$

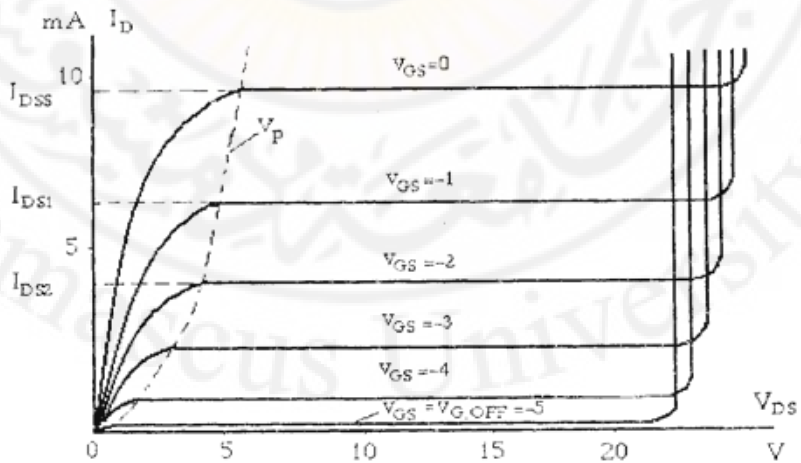
يسمى الجهد V_{GS} المقابل لتيار $I_D=0$ بجهد الاختناق $V_{G.off}$.

في الحياة العملية تستخدم خواص الخرج المبينة في الشكل 1 - 29، وهي العلاقة:

$$I_D = f(V_{DS})|_{V_{GS} = \text{const.}}$$



الشكل 1 - 28. خواص الدخل للترانزستور JFET



الشكل 1 - 29. خواص الخرج للترانزستور JFET

فعند زيادة الجهد بين المصدر والمصب V_{DS} يزداد التيار في البداية بسرعة حتى قيمة جهد نهاية التغير V_p ، ثم يصبح التيار I_D ثابتاً تقريباً. يمكن شرح ثبوت التيار بأن زيادة V_{DS} يجب أن تزيد I_D ، ولكن بنفس الوقت زيادة V_{DS} تزيد الجهد العكسي على الوصلتين p-n فتعرض منطقة الحيز (منطقة الاستنزاف) مما يؤدي إلى تسخين مقطع القناة وزيادة مقاومتها، وهذا يؤدي إلى خفض قيمة I_D ، فيبقى التيار ثابتاً تقريباً تحت تأثير هذين العاملين. فكلما زدنا الجهد السالب بقيمته المطلقة على البوابة تنتقل هذه الخواص للأسفل.

عند رفع الجهد V_{DS} إلى قيم كبيرة يحصل انحراف الوصلة p-n ويرتفع التيار بشدة.

من التحليل النظري ومن القياسات التجريبية يمكن أن نلاحظ بأن قيمة التيار I_D بعد انتهاء التغير لا تعتمد على الجهد بين المنبع والمصب V_{DS} . وخواص السدخل شكل قطع ناقص، وبالتالي يمكن تحديد قيمة تيار المصب في منطقة التيار الثابت (انظر خواص الخرج) بالعلاقة التالية:

$$I_{DS} = I_{DSS} \left(1 - \frac{V_{GS}}{V_{G\text{OFF}}}\right)^2 \quad (1 - 15)$$

حيث: I_{DS} - تيار المصب في منطقة التيار الثابت.

I_{DSS} - قيمة I_{DS} عند قصر البوابة، أي عند $V_{GS}=0$.

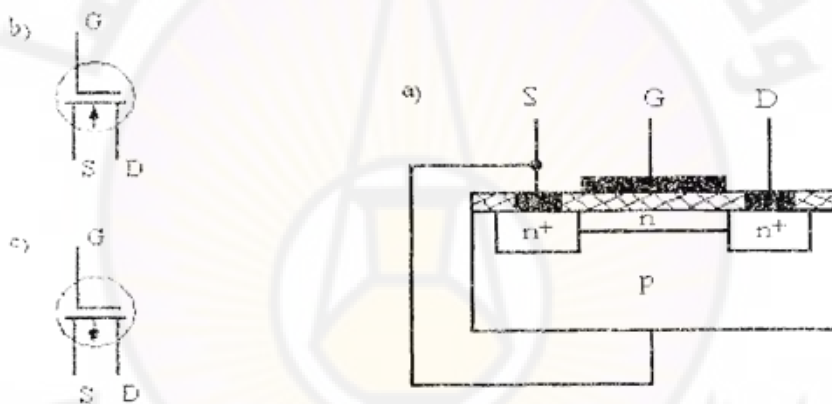
$V_{G\text{OFF}}$ - جهد إلحق.

يعمل الترانزستور عادة على القسم الثابت من هذه الخواص المبينة في الشكل

29-1.

1-5-2- الترانزستورات الحقلية ذات البوابات المعزولة IGFET:

وهي ترانزستورات حقلية مطورة، تكون فيها البوابة المعدنية معزولة عن القناة نصف الناقلة بواسطة طبقة رقيقة من العازل. لذلك تسمى MISFET (أي معدن-عازل-نصف ناقل) أو MOSFET (أي معدن-أكسيد-نصف ناقل)، وذلك لأن الطبقة العازلة تكون عادة من ثاني أكسيد السليكون SiO_2 .



الشكل 1-30. الترانزستور ذو البوابة المعزولة والقناة الخاصة (a)

ورمز النوع ذي القناة من المادة n (b) ومن المادة p (c)

يبين الشكل 1-30-a الترانزستور ذا البوابة المعزولة ورمزه (الشكل 1-30-b). وفيه القاعدة مصنوعة من شريحة سيليكونية نوع p. أنشئت فيها منطقتان عاليتا الناقلية نوع n^+ . هاتان المنطقتان تشكلان المنبع والمصب، وتتصلان بأقطاب توصيل خارجية. بين المنبع والمصب يوجد قناة، من النوع n، ذات طبقة رقيقة بالقرب من السطح. يكون طول هذه القناة عادة عدة مايكرومترات فقط، وعرضها مئات المايكرومترات أو أكثر، وذلك حسب تيار العمل للترانزستور. عرض طبقة ثاني أكسيد السليكون SiO_2

العازلة $0.1 - 0.2 \mu m$ (على الرسم مبهثرة). فوق هذه الطبقة وضعت البوابة على شكل صفيحة معدنية رقيقة. يتم وصل بلورة الترانزستور عادة مع قطب المنبع S في نقطة واحدة. ويعتبر كمونها مساوياً للصفر. في بعض الحالات يؤخذ من البلورة قطب مستقل.

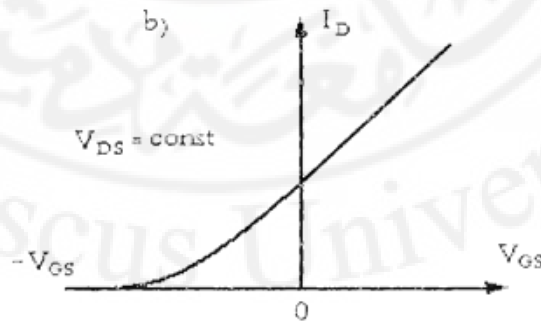
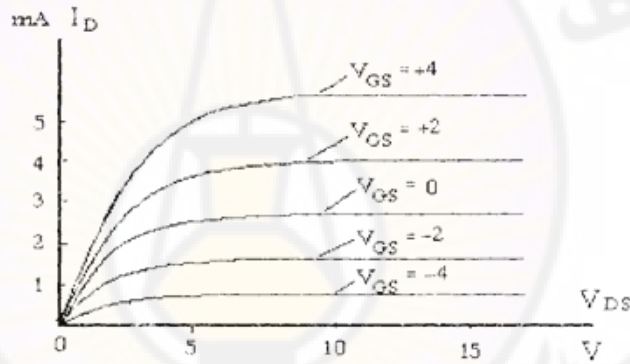
يسمى هذا العنصر "الترانزستور ذو القناة الخاصة" ويعمل على الشكل الآتي: عندما يكون جهد البوابة يساوي الصفر، وسلط فرق جهد بين المنبع والمصب، فإن التيار سوف يمر عبر القناة وهو عبارة عن تدفق الإلكترونات. أما عبر البلورة فلا يمر التيار لأن أحد مناطق العبور p-n تكون منحازة عكسياً. عند تسليط جهد سالب على البوابة، بالنسبة للمنبع S وللبلورة أيضاً، يظهر في القناة مجال كهربائي، فتتفر الإلكترونات من القناة إلى مناطق المنبع والمصب والبلورة، فتصبح القناة فقيرة بالإلكترونات وتكبر مقاومتها، فيصغر تيار المصب I_D . كلما كبر الجهد السالب المسلط على البوابة، يصغر هذا التيار. وتسمى هذه الحالة لعمل الترانزستور بحالة الإفقار. لو سلطنا على البوابة جهداً موجباً، فإن الإلكترونات تتكاثر في القناة قادمة من المنبع والمصب والبلورة، فتزداد ناقلية القناة ويكبر التيار. وتسمى هذه الحالة بحالة الإغناء.

إذاً فالترانزستور MOSFET ذو القناة الخاصة، يمكن أن يعمل في حالتي الإفقار والإغناء. وهذا واضح من خواص خرج المبينة في الشكل 1-31-a وخواص القيادة (التحويل) المبينة في الشكل 1-31-b.

كما نرى فإن خواص الخرج للترانزستور MOSFET أو MISFET تشبه خواص الخرج للترانزستور ذي المعبر. فعند زيادة الجهد V_{DS} من الصفر يزداد التيار في البداية طردياً مع زيادة الجهد وذلك حسب قانون أوم، وبعد أن يصل الجهد V_{DS} إلى قيمة معينة، تبدأ القناة تضيق، بشكل خاص قرب المصب D، حيث يزداد الجهد العكسي على الوصلة p-n الواقعة بين القناة والبلورة، فينخفض عدد حاملات

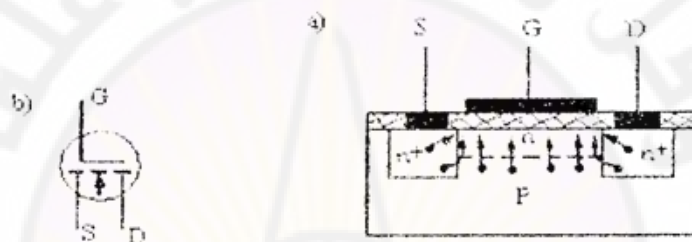
الشحنة في هذه المنطقة، وتزداد مقاومتها. بهذا الشكل، فإن تيار المصب يتعرض إلى تأثيرين متعاكسين:

زيادته حسب قانون أوم، نتيجة لزيادة V_{DS} ، وانخفاضه نتيجة لزيادة مقاومة القناة. فيبقى تيار المصب ثابتاً تقريباً، إلى أن تصل قيمة الجهد إلى جهد الانحيار الكهربائي للبلورة.



الشكل 1-31. خواص الخرج للترانزستور MOSFET ذي القناة الخاصة نوع n (a) وخواص القيادة له (b)

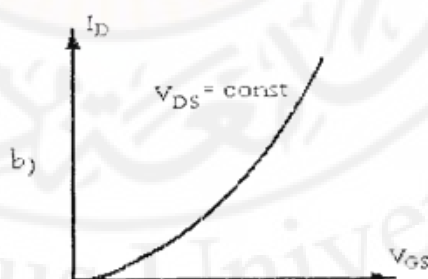
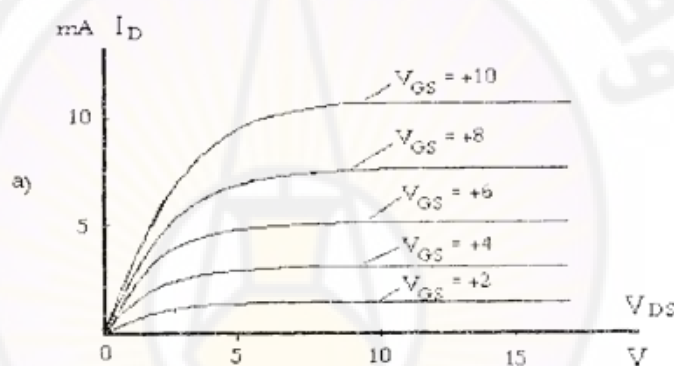
عندما تكون البلورة من النوع n ، يجب أن تكون القناة من النوع p ، وتنعكس قطبية الجهود. رمز هذا النوع من الترانزستورات مبين في الشكل 1-30-c. النوع الآخر من الترانزستورات ذوات البوابات المعزولة يسمى الترانزستور ذو القناة التحريضية أو العكوسة وهو مبين في الشكل 1-32.



الشكل 1-32. الترانزستور ذو القناة التحريضية من النوع n ورمزه

يتميز هذا الترانزستور عن الترانزستور السابق، بأن القناة تظهر فقط في حبال تسليط جهد ذي قطبية معينة على البوابة. وعند انعدام هذا الجهد تختفي القناة، حيث يوجد بين المنبع والمصب (نوع n^+) بلورة واحدة من النوع p ، فتكون إحدى الوصلات منحازة عكسياً. لذلك في هذه الحالة لا يمر التيار عبر الترانزستور بسبب المقاومة العالية بين المنبع والمصب. ولكن لو سلطنا جهداً موجباً على البوابة، سوف تتحرك الإلكترونات من مناطق المنبع والمصب ومن المنطقة p باتجاه البوابة. وعندما تزيد قيمة جهد البوابة عن قيمة جهد العتبة (أو جهد القدح) الذي يساوي عادة عدة فولتات، يصبح تركيز الإلكترونات، في الطبقة السطحية القريبة من البوابة، أكبر من تركيز الثقوب فيها، فتتقلب مادة هذه الطبقة السطحية من النوع p إلى النوع n ، وتنشأ قناة رقيقة من النوع n ويمر التيار عبر الترانزستور. كلما كبر جهد البوابة الموجب، تزداد الناقلية الكهربائية وتيار المصب. بهذا الشكل فإن هذا الترانزستور يعمل فقط في

نظام الإغناء، كما هو واضح من خواص خرجة المبينة في الشكل 1-33-a وخواص القيادة المبينة في الشكل 1-33-b. لو صنعت البلورة من المادة n تصبح القناة من النوع p.



الشكل 1-33. خواص الخرج للترانزستور ذي القناة التحريضية (a) وخواص القيادة له (b)

بحسب عامل تضخيم الترانزستورات الحقلية بشكل عام من العلاقة:

$$k \cong SR_L$$

حيث: $S = \frac{\Delta I_D}{\Delta V_{GS}}$ ميل خواص القيادة للترانزستور و R_L مقاومة الحمل.

توصل الترانزستورات ذوات البوابات المعزولة في الدارات الإلكترونية بإحدى الطرق الثلاث التالية: المنصب المشترك والبوابة المشتركة والمنبع المشترك. تتميز هذه الترانزستورات بمقاومة دخل عالية للتيار المستمر تصل إلى $10^{12} - 10^{15} \Omega$.

تصنع أحياناً الترانزستورات "معدن-عازل-نصف ناقل" خصيصاً للاستخدام في وحدات الذاكرة، وفي هذه الحالة يتألف العازل فيها من طبقتين. توضع فوق طبقة ثاني أكسيد السليكون SiO_2 طبقة ثانية من أزوتيد السليكون SiN_4 أو من أكسيد الألمنيوم، اللتين تتمتعان بمقاومة عالية جداً، أكبر بكثير من مقاومة ثاني أكسيد السليكون. فعند إعطاء نبضة موجبة أو سالبة تتشكل بالترتيب شحنة سالبة أو موجبة على الحد الفاصل بين العازلين. هذه الشحنة تؤثر على مقدار جهد العتبة، أي الجهد الذي يحدث عنده عكس نوعية طبقة القناة. وبالتالي فإن الترانزستور يمكن أن يكون في إحدى حالتين (وصل أو فصل) وذلك حسب القيم المختلفة لجهد العتبة. كل واحدة من الحالتين المذكورتين يمكن أن تخزن لفترة طويلة حتى بعد فصل المنبع.

1-6-6- العناصر متعددة الطبقات

1-6-1- الثايرستور Thyristor:

إن العنصر الرئيسي في إلكترونيات القدرة هو الثايرستور، الذي أنتجته لأول مرة شركة (دجنرال إلكتريك الأمريكية "General Electric") عام 1957. وبدأ الثايرستور منذ ذلك الحين يحل محل الكثير من الأجهزة الكهربائية مثل الصمامات المفرغة من الهواء والمضخمات المغناطيسية والكهربائية وغيرها وانتشر بذلك استعماله بشكل واسع في مجال القيادة الآلية والتحكم بالآلات وفي مختلف التجهيزات والقواطع الكهربائية الآلية.

يطلق على الثايرستورات اسم المقومات السيليكونية المقادة وأحياناً المقومات نصف المقادة وذلك إشارة إلى إمكانية التحكم عن طريق البوابة بلحظة الفتح فقط وليس بالإغلاق.

مميزات الثايرستور:

- ١- يتميز الثايرستور بمسئلات كثيرة، مقارنة بالأجهزة التي حل محلها، منها:
 - ١- خفيف الوزن وصغير الحجم ولا يحتوي على أجزاء متحركة.
 - ٢- هبوط الجهد على طرفيه صغير لا يتجاوز (1 - 2) فولت بينما في الصمامات المفرغة فيتراوح بين (18-20) فولت.
 - ٣- ذو متانة ميكانيكية عالية ويخدم ضوياً وموثوقية عالية.
 - ٤- يمكنه العمل بأي وضعية حتى في الفضاء ولا يصدر ضجيجاً.
 - ٥- له مجال تحمل حراري كبير من 50°C إلى 160°C .
 - ٦- يتمتع بسرعة استجابة عالية أي جاهز بته فورية للعمل.
 - ٧- له تطبيقات علمية وصناعية كثيرة ابتداء من النماذج ذوات الاستطاعة المنخفضة (عدة مئات من الواطات) إلى النماذج ذوات الاستطاعة العالية (عدة آلاف من

الكيلوواط).
٨- لا يحتاج إلى زمن طويل لاستعادة خواص الحجز (الإغلاق)، حوالي $\mu.sec$ (10-35).

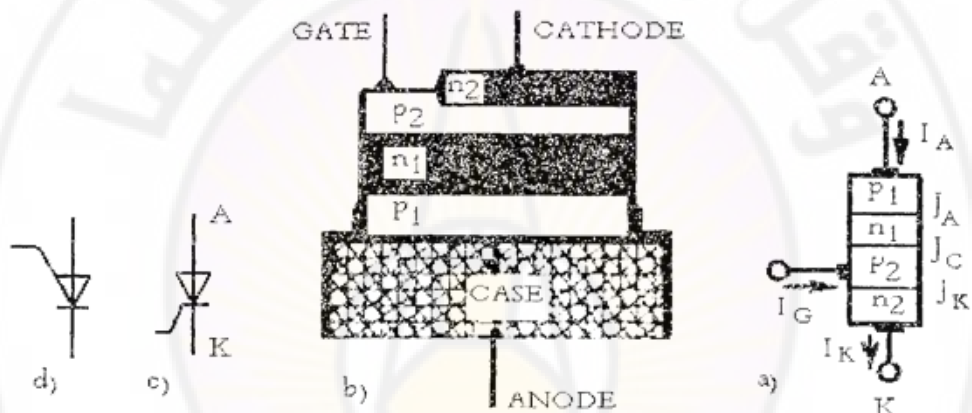
1-1-6-1- بنية الثايرستور:

الثايرستور - هو جهاز إلكتروني ذو بنية بلورية نصف ناقلة، مُقاد بشكل غير كامل، يعمل على حجز الجهد المسلط عليه إلى حين إعطائه نبضة على بوابته، مكون من أربع طبقات p1-n1-p2-n2 ومزود بقطب للتحكم (بوابة) وله مصعد ومهبط. الطبقة p1 الأولى تشكل طبقة المصعد والطبقة n2 الأخيرة تشكل طبقة المهبط والطبقة الداخنية p2 هي طبقة التحكم أو القيادة والطبقة n1 هي طبقة الحجز (الشكل 1-34). وهو يتألف من ثلاث وصلات p-n: وصلة المصعد J_a ووصلة القيادة J_c ووصلة المهبط J_k .

ملاحظة: في بعض الحالات النادرة تكون n1 طبقة التحكم و p2 طبقة الحجز. يبين الشكل 1-34-d-c رمزي الثايرستور في الدارات الكهربائية. أما البنية الداخنة للثايرستور فمبينة في الشكل 1-34-b.

تتميز طبقة الحجز n1 بكونها أتمك الطبقات وتكون كثافة الإلكترونات فيها (أي حاملات الشحنة الأساسية) قليلة جداً، وهي من النوع n وتتكون من السيليكون النقي. أما طبقتا المصعد p1 والقيادة p2، فهما من النوع p وتكونان متوسطتي السماكة ومتوسطتي الكثافة. وتتميز طبقة المهبط n2 بصغر سماكتها وبالكثافة العالية للإلكترونات لذلك عند مرور تيار من G إلى K فسوف تبعث هذه الطبقة إلكترونات كثيرة إلى طبقة القيادة مما يسهل جرف هذه الإلكترونات عبر وصله المهبط.

في حال غياب الجهد الخارجي تتكون ثلاث مناطق عبور في أماكن التوصيل الثلاثة للثايرستور، وفي حالة التوصيل الأمامي تكون وصلة القيادة J_C منحازة عكسياً والوصلتان J_A و J_K منحازتين أمامياً. وفي حالة التوصيل العكسي تكون J_A و J_K منحازتين عكسياً و J_C أمامياً.

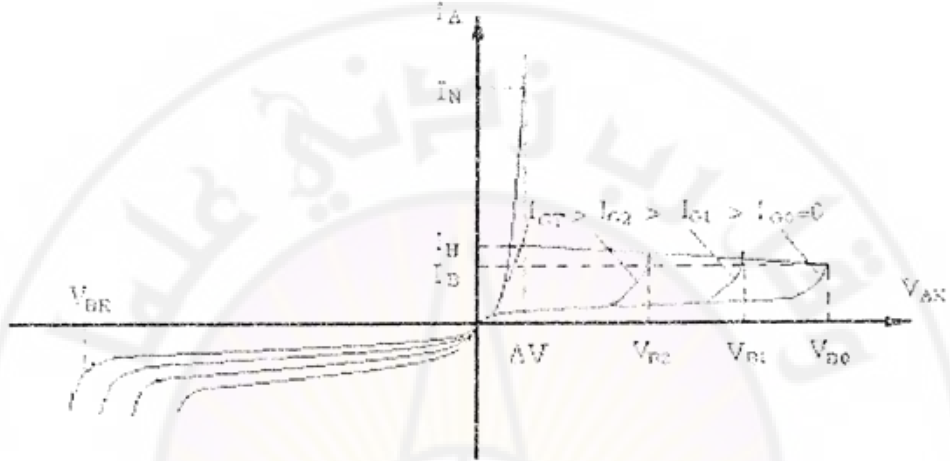


الشكل 1 - 34. طبقات الثايرستور (a) وبنية (b) ورموزه في الدارات الكهربائية (c) و (d)

1-6-1-2- الخواص الستاتيكية للثايرستور (خواص الفولت - أمبير):

يبين الشكل 1 - 35 خواص الفولت - أمبير للثايرستور . ويوضح المنحني الخارجي خواص الثايرستور عندما يكون تيار البوابة صفراً ($I_G = 0$) عندئذ يعمل الثايرستور كداينستور.

الداينستور (الثايرستور غير المتحكم به) - هو ثايرستور ثنائي الأقطاب رباعي الطبقات وهو عبارة عن ثايرستور بدون قطب تحكم (بوابة) وهو يشبه الثايرستور العادي في حال عدم تطبيق نبضة تحكم ، ويتم فتحه عن طريق تطبيق جهد أمامي كبير (أكبر من جهد الخرق الأمامي V_{BO}) .



الشكل 1 - 35. خواص الفولت-أمبير للثايرستور

عندما يكون الجهد المسلط على الثايرستور موجباً (المصعد موجب بالنسبة للمهبط) يمر تيار أمامي صغير جداً عبر الثايرستور. وعند زيادة هذا الجهد تدريجياً فإن التيار لا يظهر زيادة ملحوظة إلى أن يصل الجهد إلى جهد الخرق (التوصيل) الأمامي V_{BO} ، عند هذه النقطة يقفز الثايرستور إلى حالة التوصيل ويزداد التيار بسرعة وتنخفض مقاومته الأمامية إلى ما يقارب الصفر، كما أن جهد المصعد ينخفض من القيمة المساوية لجهد الخرق الأمامي V_{BO} إلى قيمة صغيرة تسمى بمبوط الجهد على الثايرستور ΔV وتساوي حوالي $1 - 2V$.

تسمى المنطقة التي بضمنها يستطيع الثايرستور تحمل الجهد الأمامي المسلط عليه دون أن يتحول إلى حالة التوصيل بمنطقة الإعاقَة الأمامية. عندما يصبح الثايرستور موصلاً فإن التيار المار خلاله يتحدد بمقاومة الدارة الخارجية، إذ بزيادة هذه المقاومة يقل التيار المار خلاله. وكي يتم إشعال (قدح) الثايرستور ونقله إلى حالة التوصيل

يجب ألا يقل تيار الدارة الخارجية عبر مصعد الثايرستور عن قيمة تيار التوصيل I_{IS} ، ولإبقاء الثايرستور في حالة توصيل بعد القذح يجب أن يقل التيار المار فيه (تيار مصعده) عن قيمة تيار الاستمرار في الاشتعال (I_H Holding Current) ويُعرف بأنه أقل قيمة لتيار المصعد، اللازمة لإبقاء الثايرستور في حالة توصيل (وهو أكبر بقليل من تيار التوصيل).

عند تسليط جهد موجب على البوابة (بجعل البوابة موجبة بالنسبة للمهبط) وزيادة قيمة تيار البوابة إلى I_{G1} أو I_{G2} نجد بأن قيمة الجهد الأمامي اللازمة لتوصيل الثايرستور تتناقص مع زيادة I_G ، وعندما يصل تيار البوابة إلى قيمته الاسمية I_{GT} ، تصبح الخواص الأمامية للثايرستور مشابة تماماً لخواص الثنائي العادي .

عندما يصبح تيار مصعد الثايرستور أكبر من تيار الاستمرار بالاشتعال I_{IH} يمكن الاستغناء عن تيار البوابة، بل من الضروري فصل تيار البوابة عندما يكون الثايرستور منحازاً عكسياً وذلك لأنه عند مرور تيار التحكم عبر البوابة يزداد التيار العكسي مما يؤدي إلى زيادة في سخونة الثايرستور المغلق و انخفاض جهد الانحياز العكسي V_{BR} كما هو مبين في الشكل 1-35.

تشبه الخواص العكسية للثايرستور خواص الثنائي المنحاز عكسياً، حيث يتنقى التيار ضعيفاً ومهماً قبل أن يصل الجهد العكسي إلى جهد الانحياز V_{BR} ، وعند جهد الانحياز يصبح التيار كبيراً جداً ويؤدي إلى توليد حرارة كبيرة وتخطيم الثايرستور . لذلك في التطبيقات العملية يجب مراعاة بأن يكون الجهد العكسي الأعظمي المطبق على الثايرستور أقل بحوالي 1.5 مرة من جهد الانحياز.

1-6-1-3- تمثيل الثايرستور بترانزستورين:

توجد طريقة مناسبة لشرح اشتغال الثايرستور وذلك بتمثيله بترانزستورين: الأول نوع p-n-p والثاني نوع n-p-n كما هو مبين بالشكل 1-36.

? لدينا:

تيار الباعث للترانزستور الأول والثاني على الترتيب.

تيار الأول و الثاني على الترتيب .

31

مع الترانزستور n-p-n يغذي بالتيار قاعدة

n-p-n هو مجموع تيار البوابة وتيار

الترانزستور

تيار الأول p-n-p المعادلة التالية:

مجمع الترانزستور

$$I_{B1} = (1 - \alpha_1) I_{CBO1} - I_{CBO2} \quad (16)$$

و للترانزستور n-p-n :

$$I_{B2} = (1 - \alpha_2) I_{CBO2} - I_{CBO1} \quad (17)$$

إني

حيث: I_{CBO1} و I_{CBO2} - تيار التشبع العكسي

على الترتيب. و كذلك فإن :

$$(18 - 1)$$

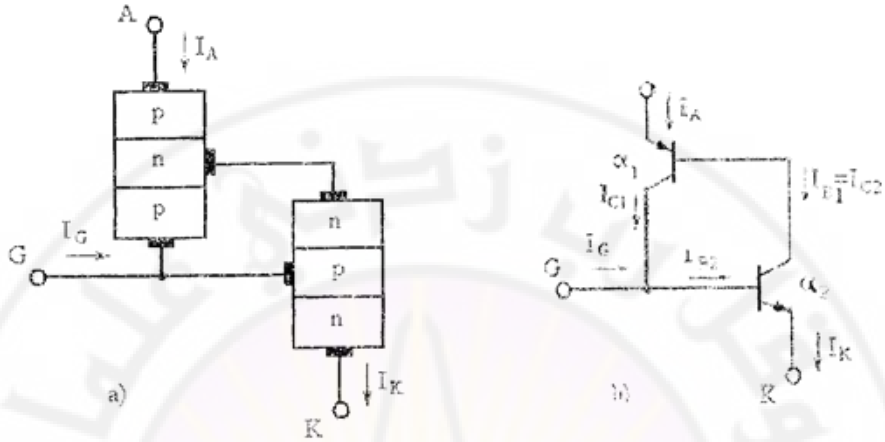
بمساواة (1-16) مع (1-17) نحصل على :

$$I_{B1} + I_{CBO2} = (1 - \alpha_1) I_{A1} - I_{CBO1}$$

$$\alpha_2 (I_{A1} + I_{G1}) + I_{CBO2} - (1 - \alpha_1) I_{A1} + I_{CBO1} = 0$$

$$\alpha_2 I_{G1} + I_{CBO1} + I_{CBO2} = I_{A1} (1 - \alpha_1 - \alpha_2)$$

$$I_{A1} = \frac{\alpha_2 I_{G1} + I_{CBO1} + I_{CBO2}}{1 - \alpha_1 - \alpha_2} \quad (19 - 1)$$



الشكل 1-36. تمثيل الثايرستور بترانزستورين

يتبين من العلاقة (1-19) بأنه عند زيادة تيار البوابة I_G تزداد قيمة تيار مصعد الثايرستور. و في نفس الوقت فإن زيادة تيار المصعد تزيد من قيمة تيارى المجموع لثرانزستورين المكافئين مما يؤدي إلى زيادة قيمة α_1 و α_2 و ذلك لأن α تزداد مع ازدياد I_C (فلو عدنا للأسس الفيزيائية لعمل الثرانزستور نجد بأنه في البداية عند تسليط جهد على القاعدة يكون تيار القاعدة وتيار الباعث لا يساويان الصفر أما تيار المجموع فيرتفع من الصفر تدريجياً مع زيادة عدد حاملات الشحنة المخفونة في القاعدة، وبالتالي α تزداد من الصفر حتى قيمة معينة).

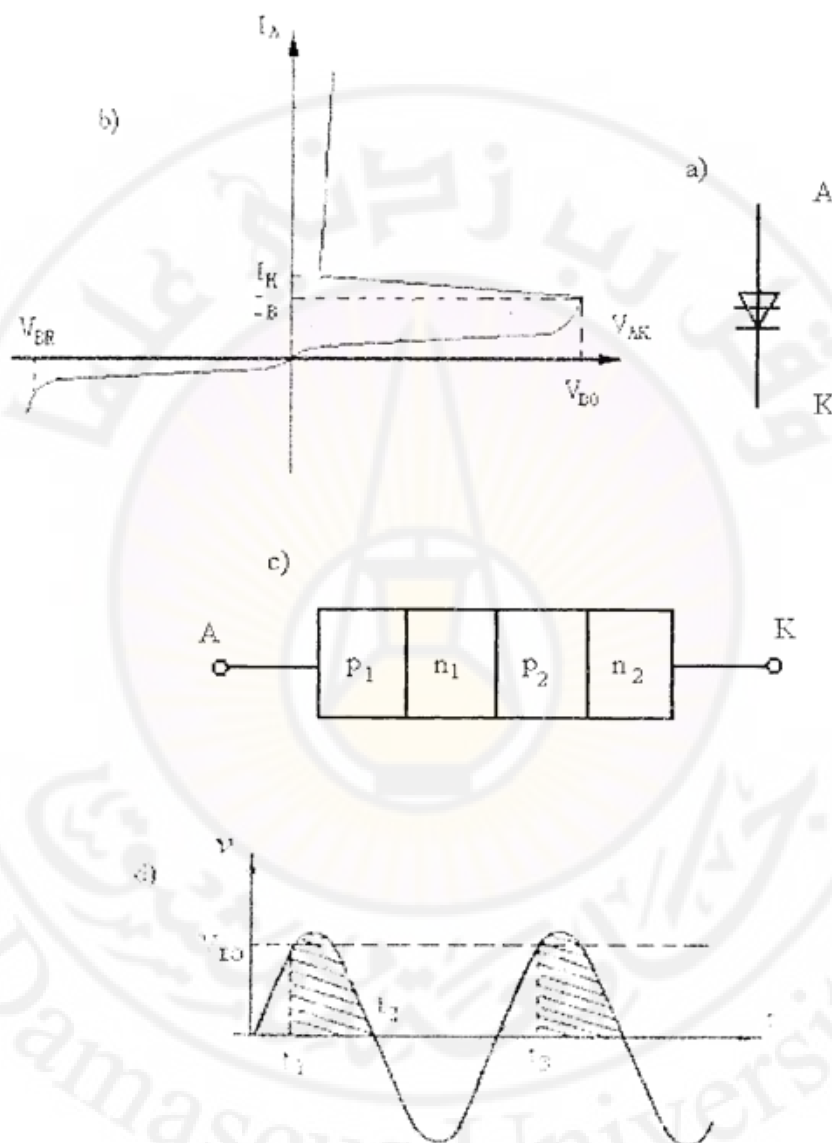
هذا يعني بأنه بعد إعطاء تيار على بوابة الثايرستور وتحقيق شرط سريان التيار I_A (المصعد موجب بالنسبة للمهبط) يظهر بالثايرستور تغذية خلفية موجبة. أي عندما يكبر I_A تكبر α_1 و α_2 . وزيادة α_1 و α_2 تؤدي إلى زيادة I_A مما يؤدي لزيادة α_1 و α_2 و هكذا حتى تصبح $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$. عند ذلك ينطلق عدد كبير من حاملات الشحنة بين المصعد و المهبط و يتحول الثايرستور إلى حالة التوصيل. ولا يعود لتيار البوابة أي تأثير على الخواص الأمامية.

في الدارات الكهربائية يكون الثايرستور موصلاً مع حمل (مقاومة مثلاً) ، ويكون تيار الثايرستور مساوياً لتيار الحمل ولا يصل إلى اللامائية عندما تصبح $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$.

عندما تكون $\alpha_1 + \alpha_2 < 1$ تحصل عملية إعادة دمج الإلكترونات والفجوات التي تحصل داخل جسم الثايرستور، الذي يبقى فاصلاً ويعمل في منطقة الإعاقية الأمامية. وعندما تصبح $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ يصبح تأثير إعادة التوليد كبيراً بدرجة كافية ينطلق عدد كبير من حاملات الشحنة ويتحول الثايرستور إلى حالة التوصيل.

1-6-2- الدايستور (رباعي الطبقات ثنائي الأقطاب) Dynistor:

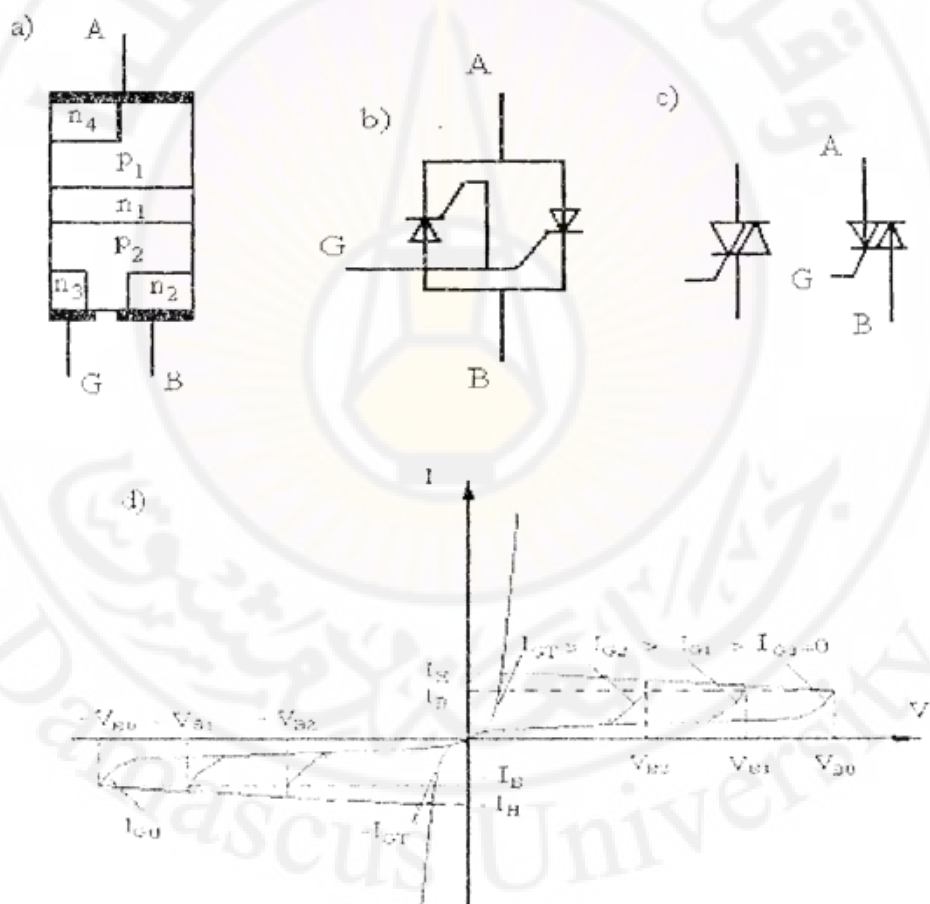
وهو عبارة عن ثايرستور بدون قطب تحكم ويتم فتحه عن طريق تطبيق جهد أمامي أكبر من جهد التوصيل الأمامي V_{BO} وقد تطرقنا له سابقاً. يبين الشكل 1-39 خواص الدايستور وطبقاته ورمزه وعمله مع منبع تيار تناوب. فأتثناء نصف الموجة الموجب يبقى الدايستور في حالة فصل إلى أن يصل جهد منبع إلى القيمة V_{BO} فيعمل الدايستور حتى يصبح الجهد سالباً على مصعده أي في لحظة الزمنية t_2 يفصل الدايستور ثم يعود للعمل في اللحظة t_3 .



شكل 39-1. رمز الدايستور (a) وخواصه (b) وطبقاته (c) والمخطط الزمني لعمله مع منبع تيار متناوب

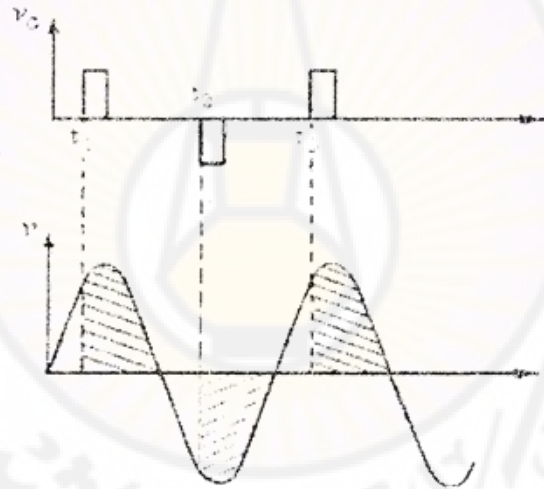
1-3-6- الترياك Triac:

هو عبارة عن جهاز إلكتروني يشبه في تركيبه وعمله اثنين من الثايرستورات موصولين على التفريع و متعاكسين وله قطبان رئيسيان A و B وبوابة تحكم G ويمكنه تمرير التيار في كلا الاتجاهين.



الشكل 1 - 40. طبقات الترياك (a) ومثيله بثنائستورين (b) وخواصه (d) ورمزه (c)

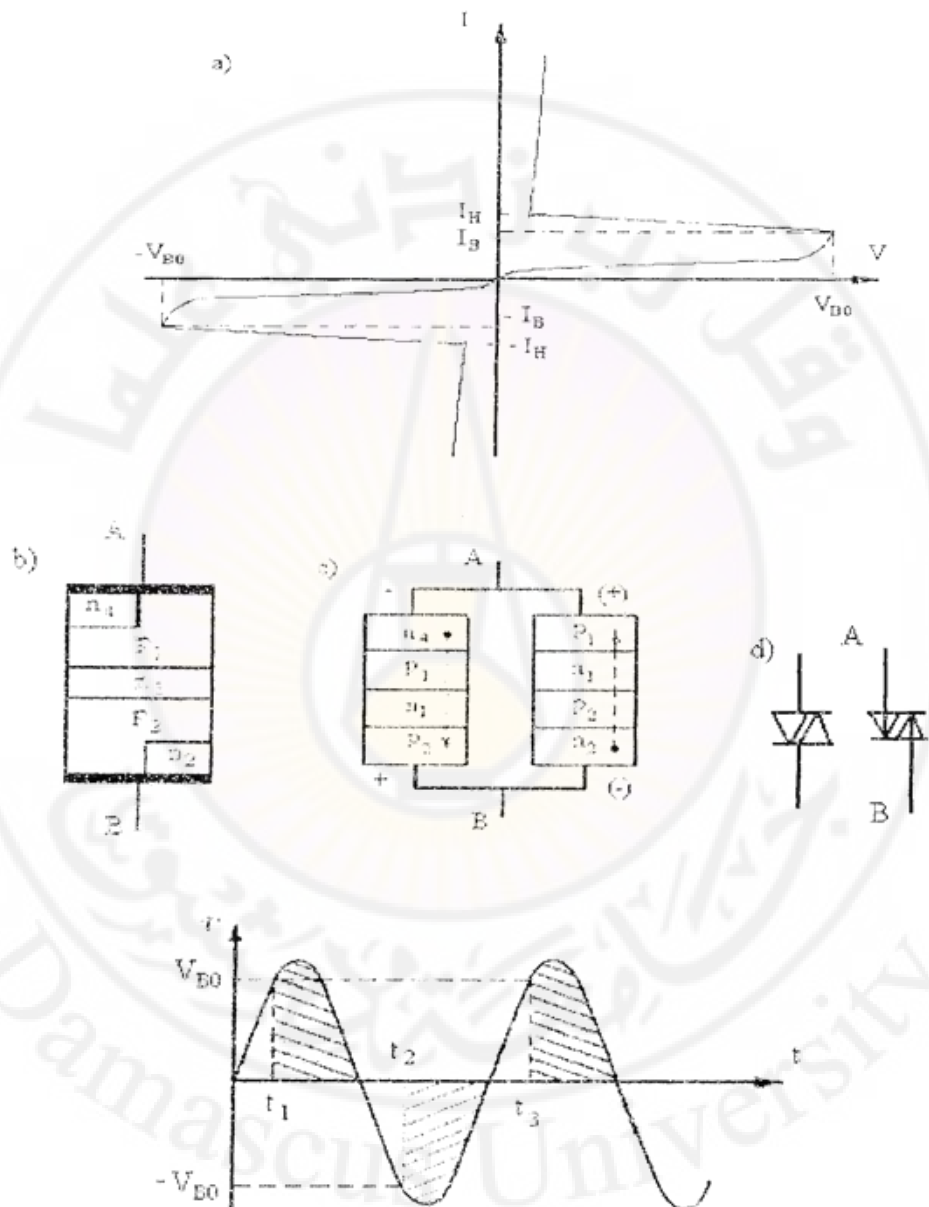
يبين الشكل 1 - 40 طبقات الترياك وتمثيله بثايرستورين وخواصه ورمزه .
 يقلع الثايرستور الأول (p1-n1-p2-n2) نبضة موجبة على البوابة، عندما
 يكون الجهد الموجب مسطاً على القطب الأول Λ ، ويقلع الثايرستور الثاني
 (p2-n1-p1-n2) نبضة سالبة على البوابة G عندما يكون الجهد الموجب مسطاً على
 القطب الثاني B. لذلك فالترياك مناسب جداً للتحكم بالجهد المتناوب .
 ويبين الشكل 1 - 41 المخطط الزمني لعمل الترياك مع منبع متناوب.



الشكل 1 - 41. المخطط الزمني لعمل الترياك

1-4-6-4 الدياك Diac

وهو عنصر ذو تركيب يشبه داينستورين موصولين على التوازي و متعاكسين
 وتشبه خواصه خواص الترياك عندما يكون تيار البوابة يساوي الصفر كما هو مبين
 بالشكل 1-42.



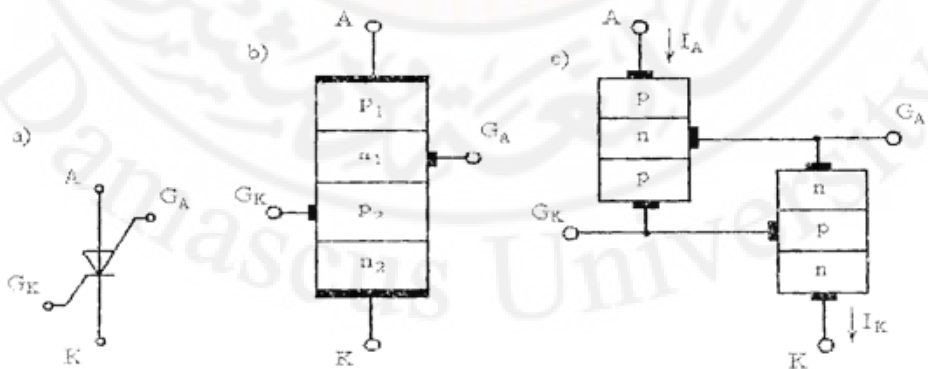
الشكل 1-42. خواص الفولت-أمبير للدياك (a) وتركيب طبقاته (b) وتقبله بدائستورين (c) ورمزه (d) وعمله مع منع تيار متناوب (e)

عندما يكون الطرف العلوي أكثر إيجابية من الطرف السفلي (القطبية المبنية ضمن أقواس في الشكل 1 - 42) فإن رباعي الطبقات الأيمن سوف يعمل عندما يصل الجهد المطبق إلى جهد الاشتعال V_{BO} ، بينما يبقى الثاني في حالة قطع. عندمانعكس الجهد المطبق (القطبية المبنية بدون أقواس) ونزده تدريجياً إلى القيمة $-V_{BO}$ ، سيوصل رباعي الطبقات الأيسر ويقطع الأيمن فور انعكاس القطبية.

عند تطبيق جهد متناوب على الدياك (الشكل 1-42-c) فإنه سوف يمرر أجزاء الموجات الموجبة والسالبة بدءاً من اللحظة التي يصل فيها الجهد المتناوب للقيمة V_{BO} ، وحتى لحظة مروره بالصفر. إلا أنه لا يمكن التحكم بزاوية التنظيم وبتقيمة الجهد المتناوب بواسطة الدياك، ولكن الدياك يستعمل بنجاح في دارات قذح الترياك. لذلك صمم الكادراك Quadrac، الذي هو عبارة عن ترياك ودياك موجودين في غلاف واحد ويعملان بشكل متكامل للتحكم بقيمة الجهد المتناوب.

1-6-5- القاطع السيليكوني المقاد:

Silicon Controlled Switch -SCS



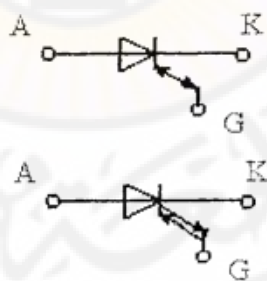
الشكل 1-43. رمز التايرستور SCS (a) وطبقاته (b) وتقبله بترانزستورين (c).

زود هذا الثايرستور ببوابتين، إحداهما قرب المهبط والثانية قرب المصعد، وعندما يكون جهد المصعد إيجابياً بالنسبة للمهبط يمكن تشغيله بنبضة موجبة على بوابة المهبط أو سالبة على بوابة المصعد. ويتم فصله بعكس قطبية جهد بوابتيه. يبين الشكل 1-43 رمز هذا العنصر وطبقاته ودارته المكافئة.

1-6-6-6- الثايرستور ثنائي العمليات (ثايرستور بوابة القطع):

Gate Turn-off-Thyristor – GTO

تمتاز هذه الثايرستورات بنفس ميزات القاطع SCS، حيث يمكن تشغيلها بشكل طبيعي بتطبيق نبضة موجبة على البوابة ويمكن فصلها بتطبيق نبضة سالبة على البوابة، لكن القدرة اللازمة للإغلاق عبر البوابة أكبر بكثير من القدرة اللازمة لفتحها ورمزها في الدارات الكهربائية كما في الشكل 1-44 أما خواص الفولت-أمبير للعنصرين الأخيرين فهي نفس خواص الثايرستور وحيد العملية المعروف (الشكل 1-35).



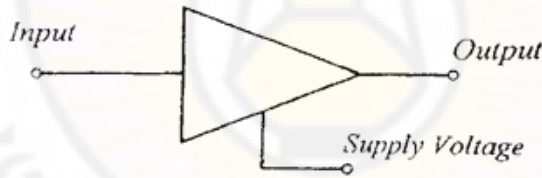
الشكل 1-44. رمزا الثايرستور ثنائي العمليات GTO.

الفصل الثاني

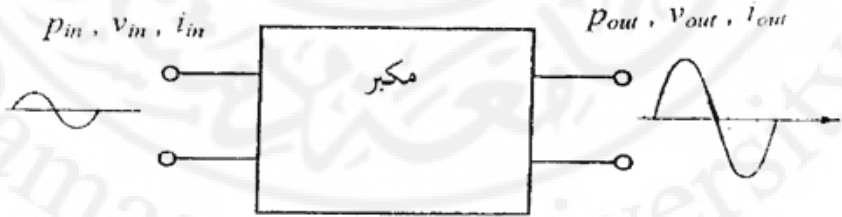
المكبرات Amplifiers

1-2- مفهوم المكبر [10-7,12,13,16]:

المكبر هو أحد أكثر المراحل أهمية في أنظمة القياس الإلكترونية. حيث يستعمل المكبر في كل نظام تقريباً ليكبر الإشارات (جهد أو تيار أو قدرة) ذات المستوى الضعيف، إلى مستوى كبير بما يكفي من أجل الاستفادة منها. يُمثل المكبر عادة، في أنظمة القياس، بأحد الرمزين المبينين في الشكل 1-2.



(أ)



(ب)

شكل 1-2 - رمز المكبر

يستخدم مع دائرة المكبر منبع تغذية كهربائية لكي يقدم إلى عناصر المكبر القدرة الكهربائية اللازمة. أما الإشارة المطلوب تكبيرها فقد تكون إشارة صادرة عن مخرج عنصر محس كميكروفون أو خلية ضوئية أو عنصر يتحسس لضغط غاز أو لدرجة حرارة أو عن مخرج دارات أخرى.... إلخ. أما إشارة المخرج الناتجة عن عملية التكبير فإنه يمكن الاستفادة منها في عملية قياس أو تحكم.... إلخ.

إن من الصفات التي تميز عمل دائرة التكبير هي ما يلي:

آ- قدرة خرج المكبر:

وهي مقدار القدرة (P_o) المأخوذة عند مخرج المكبر للإشارة المراد تكبيرها، وقد تكون جزءاً من الواط ويمكن أن تصل إلى عدة كيلواط في المكبرات ذات القدرة العالية.

ب- ربح (أو تكبير) المكبر:

إن ربح المكبر هو حاصل قسمة إشارة المخرج (جهد أو تيار أو قدرة) على إشارة لدخل (جهد أو تيار أو قدرة)، ويمكن التعبير عن الربح وفق إحدى العلاقات التالية:

$$G = v_{out} / v_{in}$$

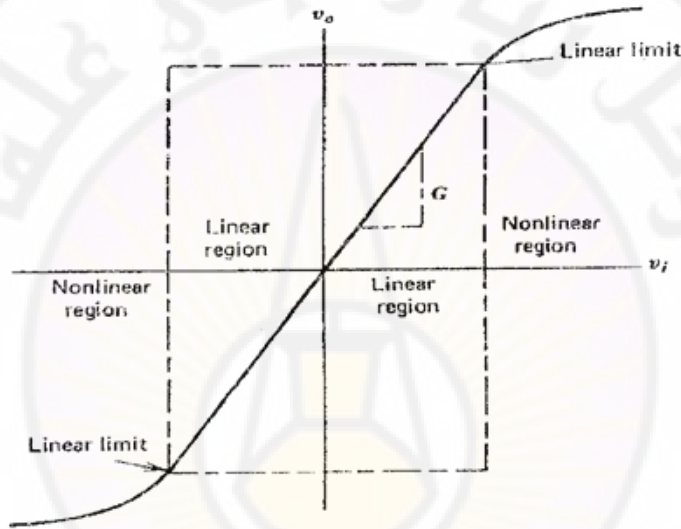
$$G = i_{out} / i_{in}$$

$$G = p_{out} / p_{in}$$

يبين الشكل 2-2 مخططاً نموذجياً للعلاقة بين دخل مكبر ومخرجه. وإذا خضع المكبر للعمل خارج مجاله الخطي فإن الربح (G) لا يبقى ثابتاً. إن المنطقة الخطية للمكبر محدودة، لأن جهد المخرج محدود بجهد التغذية وبخصائص عناصر المكبر.

فإذا ازداد جهد الدخل ضمن حدود المنطقة الخطية للمكبر فإن جهد الخرج يزداد، وفق العلاقة التالية:

$$v_{out} = G \cdot v_{in} \quad (2-1)$$



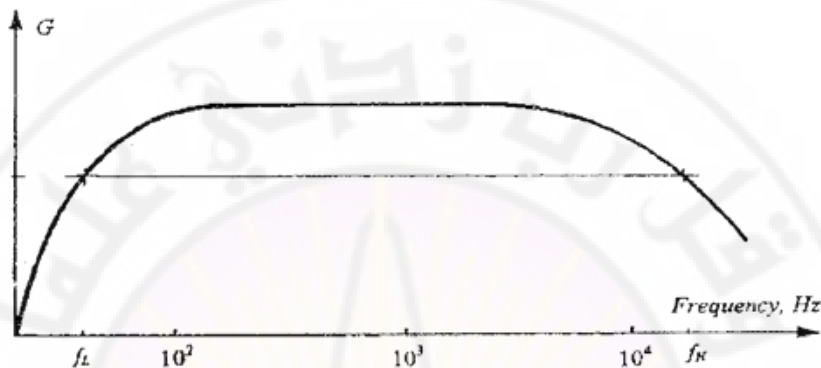
شكل 2-2- منحنى العلاقة بين جهد الدخل وجهد الخرج لمكبر

جـ. مجال التردد الذي يعمل عنده المكبر:

يصنّف المكبر عادةً ليكبر إشارات يقع ترددها ضمن مجال محدد كمجال التردد الصوتي مثلاً أي (50 – 16000 Hz). ومن الممكن أن يكون المكبر صامخاً لعمل ضمن مجالات أخرى من التردد.

يبين الشكل 2-3 منحنى خواص مكبر صوتي يكبر إشارات ذات ترددات تقع ضمن المجال الصوتي المسموع حيث نرى أن ربح المكبر تابع لتردد إشارة الدخل ويكون خرج المكبر ثابت القيمة بين ترددين وهما، حد التردد الأدنى (f_l) وحد التردد

الأعلى (f_H). ثم يتناقص الربح عندما يخرج تردد الإشارة المطلوب تكبيرها عن النطاق المسموع الذي يقع ضمن هذين الحدين.



شكل 2-3- استجابة المكبر (تغير ربح المكبر مع التردد)

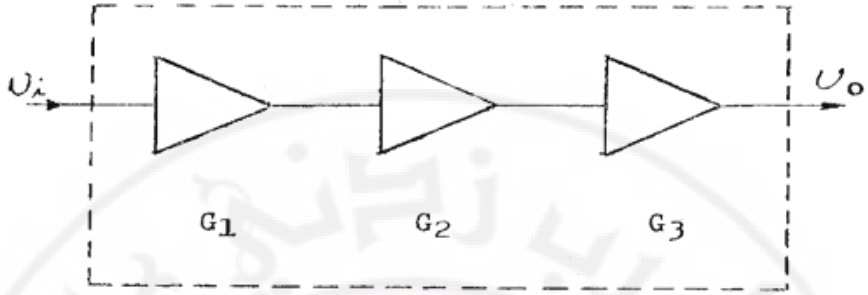
2-2- ربط المكبرات:

إذا لم يكن الربح من مكبر واحد يكفي، فإنه يمكن توصيل اثنين من المكبرات أو أكثر توصيلاً تسلسلياً كما يبينه الشكل 2-4، وذلك بغية الحصول على مقدار ربح كبير لا يمكن لدائرة تكبير واحدة (أو مرحلة تكبير واحدة) أن تحققه. ويعتمد مقدار الربح الكلي ($G = v_{out} / v_{in}$) على مقدار ربح كل مرحلة من المراحل التي تشكل المكبر الكلي، فإذا كان ربح كل مرحلة هو: (G_1, G_2, G_3)، يكون الربح الكلي (G)، من الناحية النظرية كما يلي:

$$G = G_1 \cdot G_2 \cdot G_3 \quad (2-2)$$

ويكون:

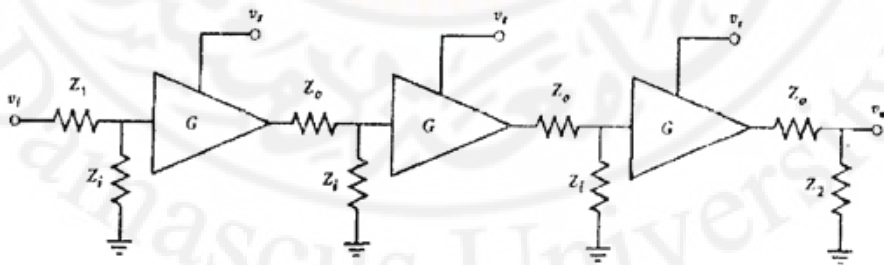
$$v_{out} = G \cdot v_{in} \quad (2-3)$$



شكل 2-4- مكبر ذو عدة مراحل تكبير

أما من الناحية العملية، وبعد الأخذ بعين الاعتبار تأثير ممانعات الدخول والخروج لكل مرحلة تكبير (Z_i, Z_o, Z_1, Z_2) ، كما هو مبين في الشكل 2-5، فإنه يمكن أن يعطى جهد الخرج (v_{out}) لنظام المكبر هذا بالعلاقة التالية:

$$v_{out} = G_1 \cdot G_2 \cdot G_3 \left(\frac{Z_i}{Z_i + Z_1} \right) \left(\frac{Z_i}{Z_i + Z_o} \right)^2 \left(\frac{Z_o}{Z_o + Z_2} \right) v_{in} \quad (2-4)$$



شكل 2-5- نظام مكبر عاني الرفع يتألف من ثلاثة مكبرات بترتيب تسلسلي

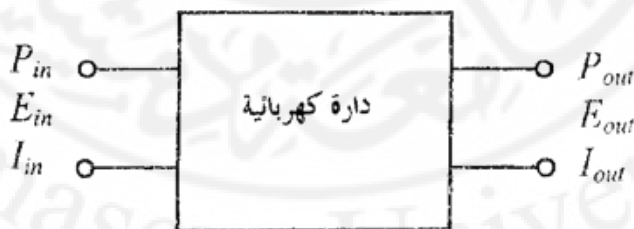
حيث يشكل كل حد متضمن بين قوسين قيمة تخميد الجهد الناتج عن التيار المطلوب قيادة المرحلة التالية. وعادة تكون: ($Z_i \gg Z_0$) وبفرض أن ممانعة المدخل (Z_2) لمرحلة القياس اللاحقة كبيرة جداً، وهذا يعني أن ($Z_2 \gg Z_0$)، ويمكن أن يأخذ جهد الخرج، من الناحية النظرية، العلاقة التالية بالنسبة إلى جهد الدخل:

$$v_{out} = G v_{in}$$

ويمكن اعتبار أن الربح الكلي (G) لنظام المكبر التسلسلي هذا يساوي إلى جداء الأرباح للمراحل الفردية.

3-2- مفهوم الديسيبل (dB):

إن تقييم الربح أو النقص في قدرة دائرة كهربائية نحصل عليه بإجراء قياسات عند كل من مدخل الدارة ومخرجها كما يبينه الشكل 2-6. فقد تكون ($P_{out} > P_{in}$) كما هو الحال في دارات التكبير. أو قد تكون ($P_{out} < P_{in}$) كما هو الحال في دارات التخرؤة أو دارات التخميد (Attenuators).



شكل 2-6 - قد تتمتع الدارة الكهربائية بربح أو بتخميد بحسب نسبة إشارة الخرج إلى إشارة الدخل

يعبر عن الربح أو الفقد في القدرة لدارة كهربائية بالنسبة $(\frac{P_{out}}{P_{in}})$. إلا أنه يفضل، من

الناحية العملية، التعبير عن الربح أو الفقد في القدرة بوحدات لوغاريتمية تسمى

ديسيبل (dB)، حيث:

$$(dB) = 10 \log (P_{out} / P_{in}) \quad (2-5)$$

وحيث إن القدرة تتناسب مع مربع الجهد أو مربع التيار، فإنه يمكن التعبير عن الربح أو
الخسارة بالنسبة للجهد أو للتيار كما يلي:

$$(dB) = 20 \log (E_{out} / E_{in}) \quad (2-6)$$

أو

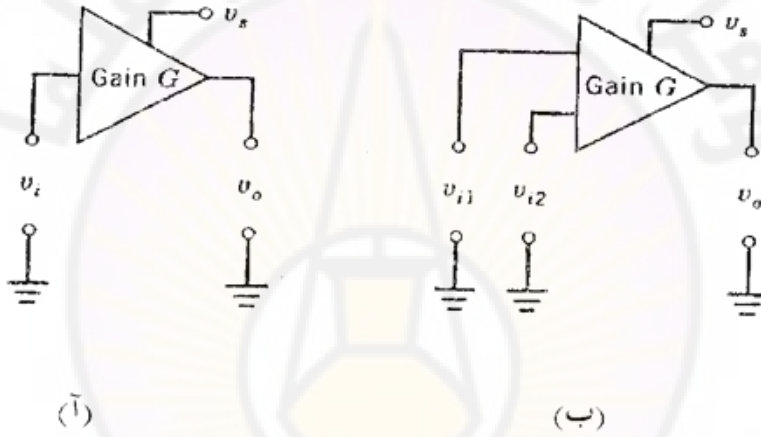
$$(dB) = 20 \log (I_{out} / I_{in}) \quad (2-7)$$

يبين الجدول التالي التطابق بين الديسيبل وكل من الربح والخسارة في القدرة
والجهد والتيار.

Voltage or Current			Power	
dB	Gain	Loss	Gain	Loss
0.1	1.01	0.989	1.02	0.977
0.3	1.03	0.966	1.07	0.933
1	1.12	0.891	1.26	0.974
3	1.41	0.708	1.99	0.501
10	3.16	0.316	10	0.100
30	31.6	0.032	1000	10^{-3}
100	10^5	10^{-5}	10^{10}	10^{-10}

2-4- تصنيف المكبرات:

تصنف المكبرات كمكبرات وحيدة المدخل أو ثنائية المدخل كما يبينه الشكل 2-7. في المكبرات وحيدة المدخل يكون كل من المدخل والمخرج منسوبين إلى جهد مرجعي واحد هو جهد الأرض. ويستعمل هذا النوع من المكبرات عندما تكون الإشارة المراد تكبيرها منسوبة إلى الأرض.



شكل 2-7- مكبر وحيد المدخل ومكبر تفاضلي (ثنائي المدخل)

فمن أجل تكبير إشارة خرج جسر واتسن، مثلاً، وحيث إن جهد الخرج من جسر واتسن ليس منسوباً إلى الأرض، لذلك فإنه لا يمكن استخدام مكبرات وحيدة المدخل لتكبير إشارة خرج جسر واتسن، ولابد من استخدام مكبرات ثنائية المدخل أو المكبرات التفاضلية (Dual-input or Differential Amplifiers)، حيث يكون هناك جهدان مستقلان، كل منهما منسوب إلى الأرض، يوصلان إلى مدخلي المكبر. يكون جهد الخرج، من الناحية المثالية، مساوياً إلى:

$$v_o = G (v_{i2} - v_{i1}) \quad (2-8)$$

5-2- جهد الصيغة المشتركة (Common Mode Voltage):

ذكرنا أنه في المكبرات ثنائية المدخل أو المكبرات التفاضلية يستجيب المكبر إلى إشارة الفرق $(v_{i2} - v_{i1})$ فقط ويتجاهل أية إشارة مشتركة بين المدخلين. بمعنى أنه إذا كان: $(v_{i2} = v_{i1} = 1 \text{ Volt})$ ، فإن الخرج يساوي صفراً من الناحية المثالية، أي أن المكبر يرفض تكبير أية إشارة تخرج عن مفهوم الفرق بين إشارتي المدخلين. نسمي هذه الخاصية "رفض الصيغة المشتركة" (Common Mode Rejection, CMR). وبالتالي فإنه من أجل مكبر مثالي تكون قيمة رفض الصيغة المشتركة مساوية للاهتداء وبصورة عامة، يمكن التعبير عن جهدي المدخلين كما يلي:

$$v_{i1} = v + \Delta v \quad (2-9)$$

$$v_{i2} = v \quad (2-10)$$

حيث:

(v) : هو جهد الصيغة المشتركة (Common Mode Voltage , v).
 (Δv) : هو فرق الجهد الصغير (بين قيمتي جهدي المدخلين) الذي يجب تكبيره.
 ويفهم من التعبير "جهد الصيغة المشتركة" أن هناك إشارات زائفة مشتركة تظهر عند كلا المدخلين (v_{i1}) و (v_{i2}) كالإشارات الناتجة عن الضجيج وتذبذب جهد التغذية والانزياح الذي تحدثه درجة الحرارة، وهذه الجهود المشتركة يجب التخلص منها. إن قدرة المكبر التفاضلي لإلغاء مركبات إشارة الدخل الزائفة هذه، غير المرغوب بها، يعتبر ميزة كبيرة.

ولسوء الحظ، وبسبب الفروقات البسيطة في عناصر المكبر، فإن جهد الخرج لا يساوي صفراً، حتى عندما يكون (Δv) صفراً، بحسب ما تشير إليه المعادلة (2-8).

ونكتب المعادلة (8-2) بصيغة أكثر دقة كما يلي:

$$v_o = G_d \Delta v + G_c v \quad (2-11)$$

حيث:

G_d = الربح من أجل جهد تفاضلي Δv .

G_c = الربح من أجل جهد الصيغة المشتركة (v).

إن أحد معايير الجودة للمكبر التفاضلي هو ما يسمى بنسبة رفض الصيغة المشتركة (Common Mode Rejection Ratio, CMRR)، حيث تُعرَّف (CMRR) كما يلي:

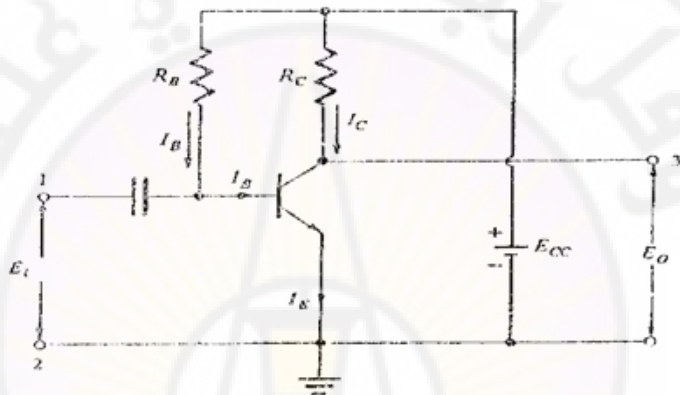
$$CMRR = \frac{G_d}{G_c} \quad (2-12)$$

إن قيم (CMRR) تتراوح بين 1000 و 20,000 هي قيم نموذجية لمكبر تفاضلي. ومن أجل ($CMRR \geq 1000$) يمكن اعتبار أن المعادلة (11-2) تتساوى تقريباً بالمعادلة (8-2) وإن قيمة كبيرة من (CMRR) تعتبر أمراً مهماً من أجل التخلص من مركبات إشارة الدخل الزائفة هذه، غير المرغوب بها.

6-2- دائرة تكبير ترانزستورية:

يبين الشكل 8-2 دائرة مكبر من النوع ذي الباعث المشترك، وهذا النوع هو الأكثر شيوعاً في المكبرات الترانزستورية.

تطبق الإشارة المطلوب تكبيرها (E_{in}) بين النقطتين (1,2) أي عند مدخل الدارة. وتظهر إشارة الخارج (E_{out}) مكبرة بين الطرف (3) والأرض. يقدم الجهد (E_{cc}) وهو جهد الاستقطاب، لكل من دارتي التجميع والقاعدة، تياراً (I_C) يمر من التجميع إلى الباعث، وتياراً (I_B) يمر من القاعدة إلى الباعث.

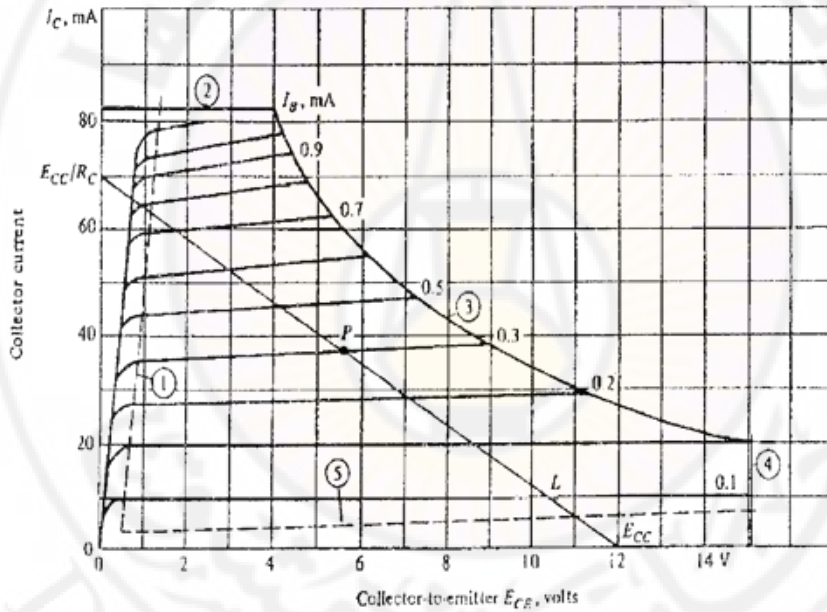


شكل 2-8- دائرة أساسة لمكبر ترانزستور

2-7- إجراءات في تصميم دائرة المكبر الترانزستوري:

نبين فيما يلي كيف نستفيد من ترانزستور في تصميم دائرة تكبير وذلك بالرجوع إلى منحنيات خواص هذا الترانزستور حيث يجب أن نتذكر أن لكل ترانزستور رمزاً معيناً ومجال عمل معين يحدد بالمعطيات التي تشتملها الشركة المصنعة. يبين الشكل 2-9 خواص العمل للترانزستور. ولكي يعمل الترانزستور بشكل سليم وأمين يجب أن تحدد منطقة عمله ضمن المنطقة الفعالة من منحنيات الخواص، أي ضمن المنطقة المحصورة بين الخط (1) الذي يحدد منطقة الإشباع، والخط (5) الذي يحدد منطقة القطع. يحدد الخط (1) الحد الأدنى للمنطقة حيث تكون عندها منحنيات خرج الترانزستور خطية تقريباً. أما الخط (2) فإنه يحدد التيار الأعظمي المسموح به

للمجمّع. ويحدد المنحنى (3) القيمة العظمى للقدرة ($V_C \times I_C$) المسموح بها التي تسبب في رفع درجة حرارة الترانزستور. ويحدد الخط (4) جهد التجمع/الباعث الأعظمي المسموح حيث يجب ألا يتجاوز جهد منبع التغذية حدود الخط (4). ويحدد الخط (5) القيمة الدنيا المفيدة لتيار التجمع، أي أنه يحدد قيمة تيار التجمع عندما يكون تيار القاعدة (I_B) مساوٍ للصفر.



شكل 2-9- منحنيات خواص الترانزستور ويظهر عليها خط الحمل

إن منحنيات الخواص الخاصة بالشكل 2-9 هي خاصة بترانزستور محدد. فمن أجل إيجاد شروط عمل مناسبة لهذا الترانزستور من الضروري اختيار قيمة جهد منبع التغذية (E_{CC}) بحيث يكون أصغر من القيمة المحددة بالخط رقم (4).

يتم اختيار قيمة مقاومة الحمل (R_C)، التي تربط بين مجمع الترانزستور ومنبع التغذية، بحيث يجب ألا تسمح المقاومة بمرور تيار يتجاوز حدود الخط (2)، وبحيث إن حاصل (E_{CC} / R_C) يجب ألا يتجاوز حدود الخط (2).

بعد اختيار هذين العاملين، يمكن أن نرسم خط الحمل (R_C) وذلك بوصل النقطة (E_{CC}) الموجودة على المحور الأفقي مع النقطة (E_{CC} / R_C) الموجودة على المحور العمودي كما يبدو في الشكل 2-9.

يمكن الآن اختيار نقطة عمل مناسبة تقع في منتصف خط الحمل تقريباً بين خطي الخطين (1) و (5) فتحدد نقطة العمل عند النقطة (P). وبعد اختيار نقطة العمل (P) يتم تحديد قيمة تيار القاعدة (I_B) على منحنيات الخواص. ويمكن قراءة تيار المجمع (I_C) وجهد المجمع/الباعث (V_{CE}) الموافقان موقع نقطة العمل.

بعد تحديد قيمة تيار القاعدة (I_B) يمكن، بالتالي، حساب قيمة المقاومة (R_B) التي توصل بين القاعدة ومنبع التغذية وذلك من أجل تأمين الاستقطاب المناسب للقاعدة.

مثال في حساب عناصر دائرة المكبر:

إذا اعتبرنا أن منحنيات الخواص في الشكل 2-9 تخص الترانزستور المستخدم في دائرة المكبر المبينة في الشكل 2-8، فبالاعتماد على خط مقاومة الحمل المرسوم، يمكن تحديد جهد التغذية ($E_{CC} = 12\text{ V}$) وهو نقطة تقاطع خط مقاومة الحمل مع المحور الأفقي. ويحدد تقاطع خط مقاومة الحمل مع المحور العمودي، النقطة:

$$E_{CC} / R_C = 70\text{ mA}$$

وتحسب قيمة مقاومة الحمل (R_C) كما يلي:

$$R_C = 12000 / 70 = 170\ \Omega$$

نختار النقطة (P) كنقطة عمل من أجل تحديد تيار القاعدة ($I_B = 0.3 \text{ mA}$)،
وعندها يمكن حساب (R_B) من المعادلة التالية:

$$R_B \approx E_{CC} / I_B = 12000 / 0.3 = 40 \text{ k } \Omega$$

وتكون قيم كل من جهد الجمع وتيار الجمع المطابقة للقيم السابقة المختارة هي:

$$I_C = 38 \text{ mA} \quad , \quad V_{CE} = 5.6 \text{ V}$$

وتكون قيمة عامل (β) لتكبير الترانزستور (باعث مشترك) هي:

$$\beta = I_C / I_B = 38 / 0.3 = 130$$

8-2- مكبر العمليات Operational Amplifier:

ويرمز له اختصاراً بالرمز (Op-Amp) وهو دائرة متكاملة تتألف من عناصر مصغرة من الترانزستورات والثنائيات والمقاومات والمكثفات موزوعة على شريحة سيليكونية صغيرة، لتشكل دائرة مكبر كاملة. ويمكن لمكبرات العمليات أن تقوم بعدة وظائف حيث يمكنها، بإضافة عناصر خارجية كالمقاومات والمكثفات، أن تقوم بعمليات حسابية كالجمع والطرح والاشتقاق والتكامل.

تتصف مكبرات العمليات بأنها ذات ربح (G) عالٍ جداً حيث تعتبر قيمة ربح ($G = 10^5$) قيمة نموذجية. وفي تحليل وتصميم الدارات التي تحتوي على مكبرات عمليات يعتبر، عادة، الربح ($G = \infty$). وتكون ممانعة الدخل لمكبرات العمليات كبيرة جداً ويمكن اعتبار أن ($R = 4 \text{ M}\Omega, C = 8 \text{ pF}$) قيم نموذجية وبالتالي

يمكن تجاهل التحميل الذي يشكله مكبر العمليات على الدارات السابقة. أما مقاومة الخرج، وهي محدود (100Ω)، فإنها صغيرة بما يكفي ويمكن إهمالها في معظم التطبيقات.

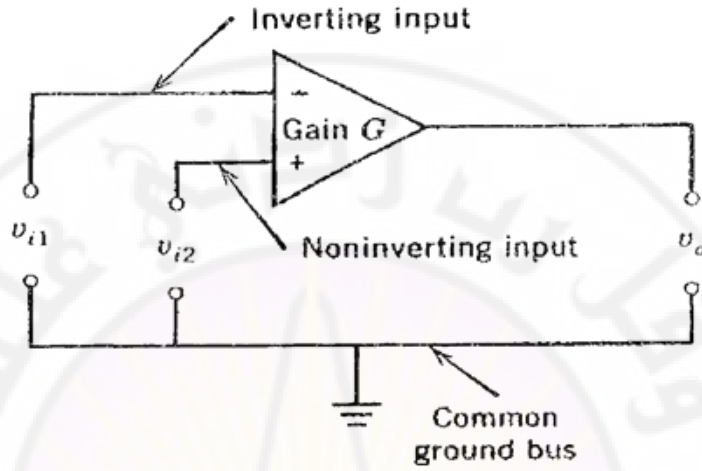
يبين الشكل 10-2 الرمز المستخدم الذي يمثل مكبر العمليات. يحتوي مكبر العمليات، على الأقل، على نقاط التوصيل التالية: المدخل السالب (-) وهو المدخل العاكس (Inverting Terminal)، والمدخل الموجب (+) وهو المدخل غير العاكس (Noninverting Terminal) وكذلك على المخرج وعلى نقاط التغذية الكهربائية له، بالإضافة إلى نقاط توصيل أخرى.

وإذا طبقت إشارتان (v_{i1}) و (v_{i2}) على المدخلين كما يبينه الشكل 10-2 فإن جهد الخرج (v_o) يتناسب مع الفرق بين هاتين الإشارتين ويعطى بالعلاقة التالية:

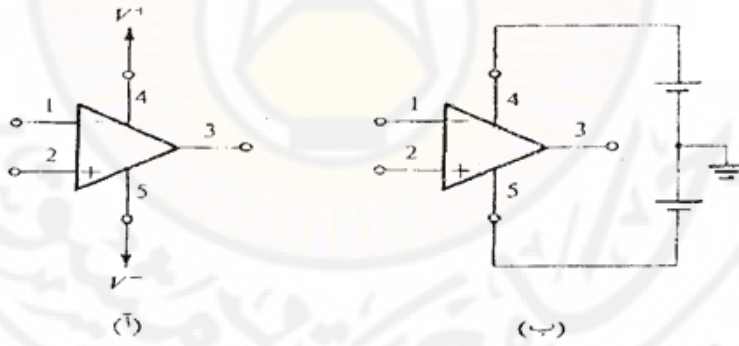
$$v_o = G (v_{i2} - v_{i1}) \quad (2-13)$$

من الواضح، من المعادلة (2-13)، أن مكبر العمليات هو مكبر تفاضلي حيث يتحسس للفرق بين إشارتي الجهد المطبقتين على طرفي المدخلين ($v_{i2} - v_{i1}$) ويضرب هذا الفرق بالقيمة (G) ليعطي عند الخرج قيمة الجهد (v_o). ويفترض في المكبر المثالي أن تكون ممانعة دخله لانهائية ويفترض أن تساوي ممانعة خرجه الصفر.

تتطلب معظم مكبرات العمليات المتكاملة (IC Op-Amp.) منبعي تغذية كهربائية مستمرة، منبع جهد موجب (V^+) و منبع جهد سالب (V^-) كما يبينه الشكل 11-2. وبالإضافة إلى الأطراف السابقة، فإن مكبر العمليات يمكن أن يحتوي على أطراف أخرى من أجل غايات خاصة، مثل تعويض التردد أو جهد الإزاحة فري.



شكل 2-10 - رمز مكبر العمليات



شكل 2-11 - مكبر العمليات وتظهر عليه نقاط التغذية

بفرض أن المدخل السالب (-) موصول بالأرض، فعند تطبيق إشارة على المدخل الموجب (+) فإننا نحصل على إشارة عند مخرج المكبر متفقة بالطور مع الإشارة عند هذا المدخل ونحصل على ما يسمى بالمكبر غير العاكس، بينما إذا كان

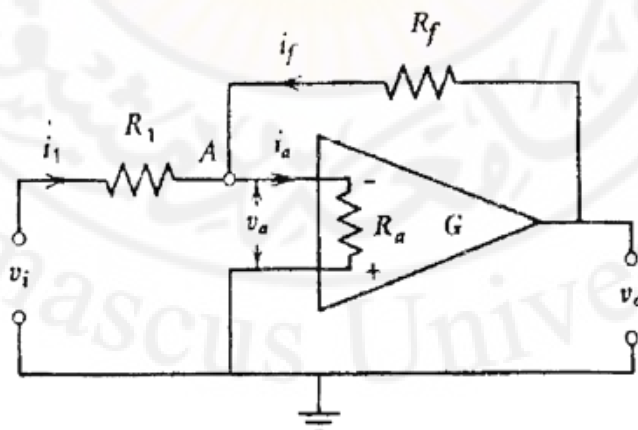
المدخل الموجب (+) موصولاً بالأرض وطُبقت الإشارة على المدخل السالب (-) فإن الإشارة عند مخرج المكبر تصبح معاكسة في الطور مع الإشارة عند هذا المدخل ونحصل على ما يسمى بالمكبر العاكس.

9-2- بعض التطبيقات بمكبر العمليات:

يمكن أن يستعمل مكبر العمليات كجزء من دائرة أكبر من أجل عدة تطبيقات نذكر منها، على سبيل المثال، المكبر العاكس والمكبر غير العاكس والمكبر الجامع والمكبر الطارح والمكبر الجسري.... إلخ.

2-9-1- المكبر العاكس (Inverting Amplifier):

يبين الشكل 12-2 مكبراً عاكساً بمدخل واحد ومخرج واحد، مكوناً من مكبر عمليات ومقاومات. يطبق جهد الدخل (v_i) على طرف المدخل العاكس عن طريق المقاومة (R_i). ويوصل طرف المدخل الموجب للمكبر إلى نقطة الأرض المشتركة. ويوصل جهد الخرج (v_o) عكسياً إلى الطرف السالب للمكبر عن طريق مقاومة تغذية راجعة (R_f).



شكل 12-2 - مكبر عاكس ذو مدخل واحد ومخرج واحد

يمكن تحديد ربح المكبر العاكس بالرجوع إلى مجموع التيارات عن النقطة (A)
في الشكل 2-12:

$$i_1 + i_f = i_a \quad (2-14)$$

وبافتراض أن (v_a) هو هبوط الجهد على طرفي مدخل المكبر، نكتب:

$$i_1 = (v_i - v_a) / R_1 \quad (2-15)$$

$$i_f = (v_o - v_a) / r_f \quad (2-16)$$

$$i_a = v_a / R_a \quad (2-17)$$

ويتعلق هبوط الجهد (v_a) عند مدخل المكبر مع جهد الخرج (v_o) بالعلاقة التالية:

$$v_a = -v_o / G \quad (2-18)$$

وينتج من المعادلات السابقة ما يلي:

$$\frac{v_o}{v_i} = -\frac{R_f}{R_1} \left[\frac{1}{1 + \frac{1}{G} \left(1 + \frac{R_f}{R_1} + \frac{R_f}{R_a} \right)} \right] \quad (2-19)$$

ولنعتبر، كمثال، دائرة مكبر عملييات فيها القيم التالية:

$$\begin{aligned}
G &= 200,000 \\
R_a &= 4 \text{ M } \Omega \\
R_1 &= 0.1 \text{ M } \Omega \\
R_f &= 1 \text{ M } \Omega
\end{aligned}$$

وبتعويض هذه القيم في المعادلة (2-18) ينتج:

$$\frac{v_o}{v_i} = -10 \left[\frac{1}{1 + 5.6(10^{-5})} \right] = -9.9994 \approx 10$$

وهكذا، من الواضح أنه يمكن إهمال الحد الذي يتضمن الربح (G) دور إدخال خطأ مهم (0.0056% في هذا المثال)، ويمكن اعتبار أن الربح (G_{cir}) لدائرة المكبر العاكس يساوي إلى:

$$G_{cir} = \frac{v_o}{v_i} \approx -\frac{R_f}{R_1} \quad (2-20)$$

ملاحظة:

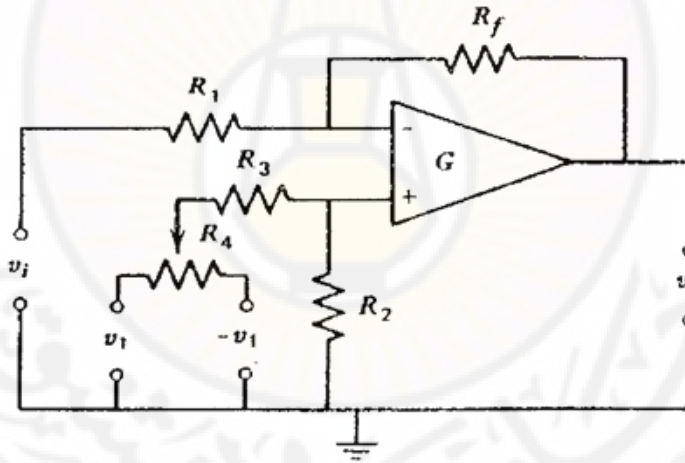
عندما يكون المدخلان (+) و (-) لمكبر العمليات موصلين إلى نقطة الأرض المشتركة، أي عندما يكون جهد كل منهما صفراً، يجب أن يكون جهد الخرج (v_o) لمكبر من الناحية المثالية، صفراً. إلا أنه من الناحية العملية، لا يتحقق، آلياً، أن يكون جهد الخرج صفراً وذلك لأن مكبر العمليات يُظهر ما يسمى بجهد الإزاحة عن الصفر (zero-offset voltage).

ولكي نتجنب أخطاء قياس كبيرة، يجب إضافة دائرة استقطاب إلى المكبر لضبط جهد الخرج عند القيمة صفر. وحيث إن مقدار جهد الإزاحة يتغير مع الزمن ودرجة الحرارة وتغيرات جهد التغذية، فإنه يستحسن معايرة دائرة الاستقطاب دورياً وذلك للتأكيد على شروط جهد خرج صفري.

يبين الشكل 13-2 دائرة استقطاب لمكبر عاكس ذي مدخل واحد ومخرج واحد. إن القيم الشائعة للمقاومات (R_2, R_3, R_4) هي:

$$(R_3 = R_1, R_2 = 10 \Omega, R_4 = 25 \text{ k} \Omega)$$

ويستخدم جهد ($v_1 = \pm 15 \text{ V}$) غالباً، وذلك لأن جهد الإزاحة عن الصفر لمكبر العمليات يمكن أن يكون إما موجباً أو سالباً. إن مقدار جهد الاستقطاب الذي يجب تطبيقه على مكبر العمليات، نادراً، ما يتجاوز عدة ميلي فولت.



شكل 13-2 - دائرة استقطاب لضبط جهد الإزاحة عن الصفر

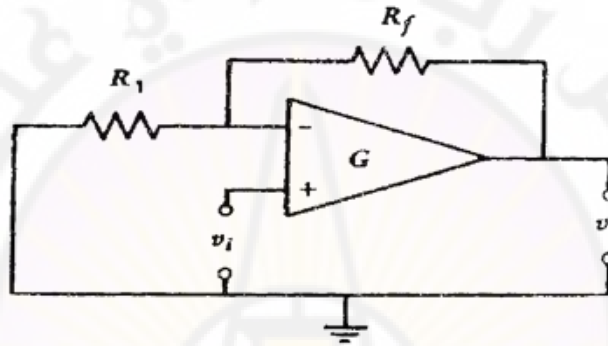
2-9-2- المكبر غير العاكس (Non-inverting Amplifier):

يمكن أن تستخدم مكبرات العمليات، أيضاً، في دوائر مكبرات غير عاكسة كما يبينه الشكل 14-2.

ويعطى الربح (G_{cir}) لدائرة المكبر غير العاكس بالعلاقة التالية:

$$G_{cir} = \frac{v_o}{v_i} = - \frac{G}{1 + \frac{GR_i}{R_i + R_f}} \quad (2-21)$$

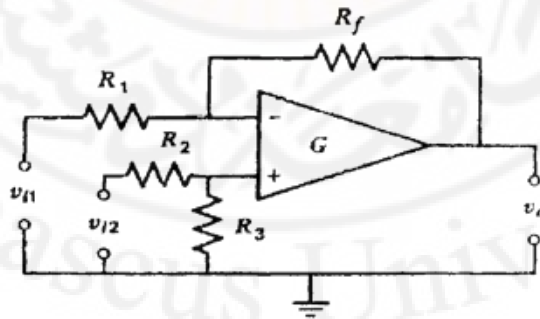
$$G_{cir} \approx 1 + \frac{R_f}{R_i} \quad (2-22)$$



شكل 2-14 - مكبر غير عاكس

2-9-3 - المكبر التفاضلي (Differential Amplifier):

ويبين الشكل 2-15 دائرة مكبر تفاضلي يستخدم مكبر عمليات. ويمكن أن يستنتج الربيع (G_c) لدائرة هذا المكبر التفاضلي من العلاقات التالية:



شكل 2-15 - مكبر تفاضلي

$$v_o \approx \frac{R_3}{R_2} \left(\frac{1 + \frac{R_f}{R_1}}{1 + \frac{R_3}{R_2}} \right) v_{i2} - \left(\frac{R_f}{R_1} \right) v_{i1} \quad (2-23)$$

وإذا كان:

$$R_f / R_1 = R_3 / R_2$$

فإنه ينتج لدينا:

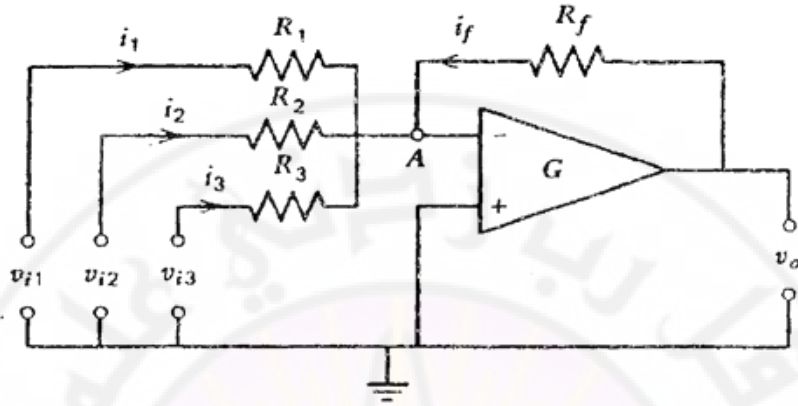
$$G_{ci} \approx \frac{v_o}{v_{i2} - v_{i1}} \approx \frac{R_f}{R_1} \quad (2-24)$$

2-9-4- المكبر الجامع (Summing Amplifier):

نحتاج، في بعض التطبيقات، إلى جمع الإشارات الصادرة من مصدرين أو أكثر من أجل الحصول على إشارة خرج تتناسب مع مجموع إشارات الدخل. ويتم الجمع هذا بواسطة دائرة مكبر عمليات تعرف باسم المكبر الجامع حسب ما يبينه الشكل 2-16.

يمكن فهم عمل المكبر الجامع بالرجوع إلى تدفق التيار عند النقطة (A) في الشكل 2-16 الذي يمكن أن نعبّر عنه كما يلي:

$$i_1 + i_2 + i_3 + i_f = 0 \quad (2-25)$$



شكل 2-16- دائرة مكبر جامع ذو مكبر عمليات

و بتطبيق قانون أوم على هذه المعادلة ينتج:

$$\frac{v_{i1}}{R_1} + \frac{v_{i2}}{R_2} + \frac{v_{i3}}{R_3} + \frac{v_o}{R_f} = 0 \quad (2-26)$$

ومنه نستخرج قيمة (v_o):

$$v_o = - R_f \left(\frac{v_{i1}}{R_1} + \frac{v_{i2}}{R_2} + \frac{v_{i3}}{R_3} \right) \quad (2-27)$$

تشير المعادلة (2-26) بأن إشارات الدخل (v_{i1} , v_{i2} , v_{i3}) تُجزأ بالنسب:

(R_f/R_3 , R_f/R_2 , R_f/R_1) على التوالي، ومن ثم تُجمع. فإذا كانت:

($R_3 = R_2 = R_1 = R_f$) يصبح جهد الخرج مساوياً إلى مجموع جهود الدخل حسب المعادلة التالية:

$$v_o = - (v_{i1} + v_{i2} + v_{i3}) \quad (2-28)$$

نلاحظ أن هذا المكبر هو مكبر جامع عاكس كما تشير إليه الإشارة (-)، ومن أجل إجراء تصحيح لانعكاس الإشارة نستخدم مكبراً عاكساً ذا ربح يساوي الواحد بعد المكبر الجامع.

وإذا أردنا إجراء عملية طرح بين إشارتين بدلاً من جمعهما نستخدم مكبراً عاكساً ذا ربح يساوي الواحد، مع خط إشارة الدخل، قبل المكبر الجامع.

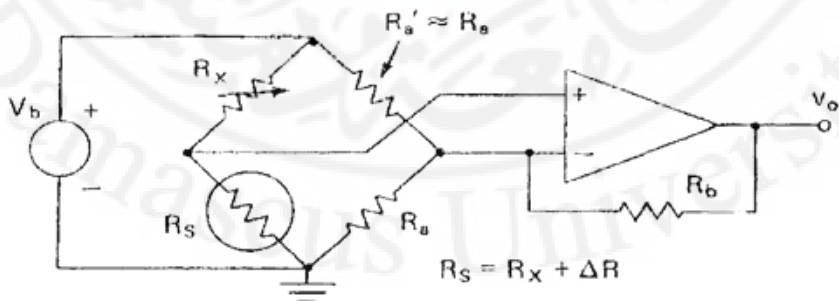
5-9-2- المكبر الجسري Bridge Amplifier:

يبين الشكل 17-2 دائرة بمكبر عمليات يمكن أن تعطي جهد خرج يتناسب مع تغير المقاومة (ΔR) لمقاومة عنصر التحسس. ويمكن أن نعتبر أن هذه الدارة هي عبارة عن تركيبة من مكبر عاكس وجسر وانستين. ويعطى جهد الخرج بالعلاقة التقريبية التالية:

$$v_o \approx \left(1 + \frac{2R_b}{R_d}\right) \frac{V_b}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R_x} \quad (2-29)$$

حيث:

(V_b) هو جهد تغذية الجسر، ويمكن أن يكون جهداً متناوباً أو مستمراً.



شكل 17-2- مكبر جسري

الفصل الثالث

العناصر الكهرو بصرية وتطبيقاتها

Electro-Optical Devices and Applications

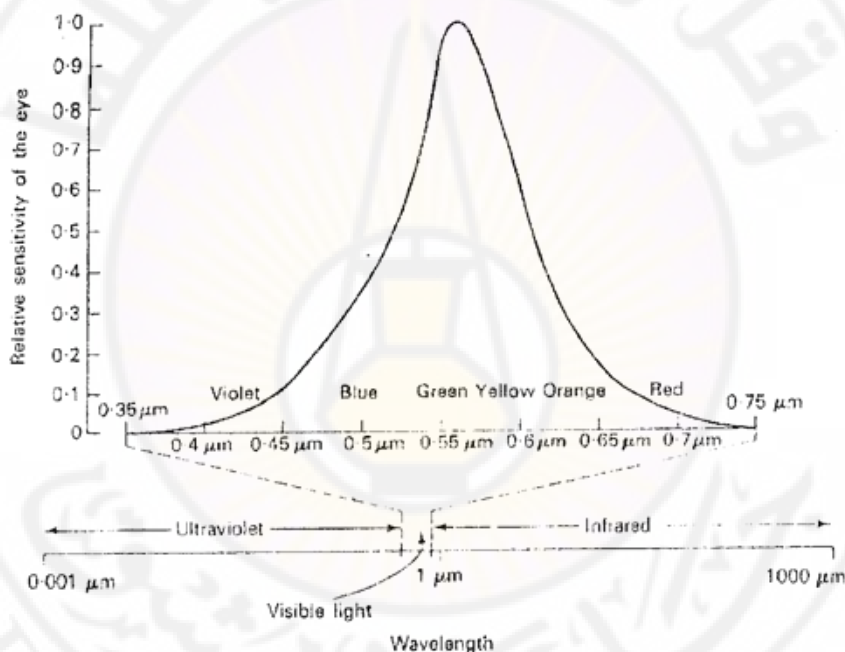
مقدمة [3,7,10,14,15,16]:

الإلكترونيات البصرية (Optoelectronics) هو اسم يغطي مجالاً واسعاً من عناصر حساسة للضوء (Photosensitive Devices)، أي عناصر تكون حساسة للضوء المرئي ولإشعاعات أخرى. وهناك عناصر تشع ضوءاً وإشعاعات أخرى تقع قرب المجال المرئي وتسمى بالعناصر الباعثة للضوء (Photo Emissive Devices) في كثير من التطبيقات الصناعية، تتم الاستفادة من ظاهرة الإرسال الكهروضوئي حيث يتم تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية أو تحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة ضوئية. هناك عناصر تطلق كهارب نتيجة لسقوط الضوء عليها، وهناك عناصر تتغير مقاومتها بسبب تعرضها للضوء، وهناك ثنائيات ضوئية تصدر أشعة ضوئية مرئية أو أشعة تحت الحمراء عندما تتعرض ذرات وصلة الثنائي لتيار كهربائي. وهناك بعض أنواع من كواشف الأشعة لها استجابة عظمى في المنطقة تحت الحمراء، وتعتبر هذه ميزة في بعض أنظمة الإنذار وأنظمة تتبع مسارات الطائرات والصواريخ.

تتصف الإشعاعات الضوئية والتلفزيونية وأشعة (X) والأشعة الراديوية والكونية بصفة مشتركة وهي أنها جميعها إشعاعات كهرومغناطيسية. يقع طول موجة الضوء المرئي تقريباً بين ($0.35 \mu m$) للون البنفسجي وحتى حدود ($0.75 \mu m$) للون الأحمر كما يبينه الشكل 1-3. أما أطوال الموجة الأقصر من ($0.35 \mu m$) فلها

تعرف بالإشعاعات فوق البنفسجية، وتلك التي هي أطول من ($0.75 \mu\text{m}$) فإنها تعرف بالإشعاعات تحت الحمراء.

يبين الشكل 1-3 أيضاً الحساسية النسبية لعين الإنسان حيث يبدو أن العين لا تتمتع بنفس الحساسية أمام جميع الترددات وهي كما يظهر من المنحنى ألها ذات حساسية عظمى للون ذي طول موجة يقع بمحدود ($0.55 \mu\text{m}$).



شكل 1-3- مقطع لطيف الإشعاع وكذلك الحساسية النسبية لعين الإنسان

لا بد هنا من تحديث عن وحدة شدة الإضاءة (Unit of Illumination)

وهي (لكس ، Lux) أو (قدم-شمعة ، fc ، Foot Candle)، حيث:

$$\text{Lux} = \text{Lumen/square meter}$$

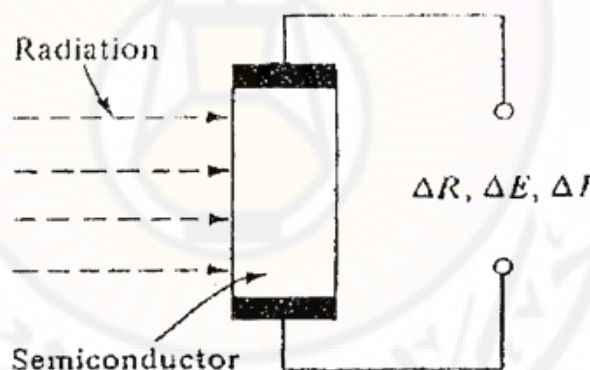
$$\text{FC} = \text{Lumen/ft}^2$$

حيث إن اللومن هو وحدة التدفق الضوئي (Unit of Luminous Flux)، أما التدفق الضوئي فهو طاقة الضوء المرئي الكلية المنبعث من المنبع الضوئي في وحدة الزمن.

1-3- عناصر أنصاف النواقل ذات الخصائص الكهروضوئية:

Solid-State Photoelectric Devices:

يبين الشكل 2-3 الفكرة العامة لحالة مادة نصف ناقل كهروضوئي يسقط عليه أحد أنواع الإشعاعات (ضوئية أو X مثلاً) حيث تمتص المادة طاقة هذه الإشعاعات وينتج عن عملية امتصاص الطاقة تولد شحنات قابلة للحركة أو تغير في الحركة (Mobility) مادة نصف الناقل.



شكل 2-3- فعل خلية كهروضوئية من مادة نصف ناقل

- تعتبر المنطقة من الطيف القريبة من أجال فوق البنفسجي والمرئية وتحت الحمراء ذات أهمية خاصة حيث تتم في هذه المنطقة الاستفادة من نوعين من الخلايا:
- 1- خلايا المقاومة الضوئية (Photo Resistive Cells).
 - 2- الخلايا الضوئية ذات الوصلة (Junction Photocells).

3-1-1 - خلايا المقاومة الضوئية:

وتدعى أيضاً خلايا التوصيل الضوئية (Photo Conductive Cells). تعتمد المقاومة الضوئية في عملها على مبدأ تغير المقاومة الكهربائية للمادة التي تتكون منها كتابع للشدة الضوئية، لذلك تدعى أحياناً بالمقاومات التابعة للضوء (Light Dependent Resistors, LDR).

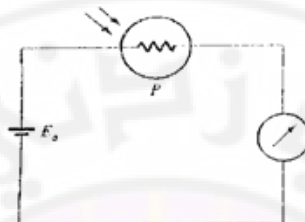
إن من مواد أنصاف النواقل المستعملة مثل: كاديوم، سيلينيوم، وكبريت الرصاص، تتصف بأنها في الظلام تكون نسبة الكهارب الحرة فيها قليلة جداً. بينما يؤدي سقوط الضوء على سطحها إلى ازدياد نسبة الكهارب المتحررة ويعني هذا أن مقاومتها الكهربائية تتغير من قيمة كبيرة إلى قيمة صغيرة نتيجة لتعرضها للضوء.

تتألف بعض أنواع المقاومات الضوئية من طبقة من (Cadmium Sulfide) أو من (Cadmium Sulfoselenide) متعددة البلورات، أو من (Cadmium Selenide) موضوعة على طبقة من السيراميك وتستخدم أقطاباً معدنية من القصدير أو الإنديوم على المادة السابقة لتشكيل مأخذي الخلية. ويبين الشكل 3-3 دائرة أساسية بسيطة لاستخدام خلية مقاومة ضوئية.

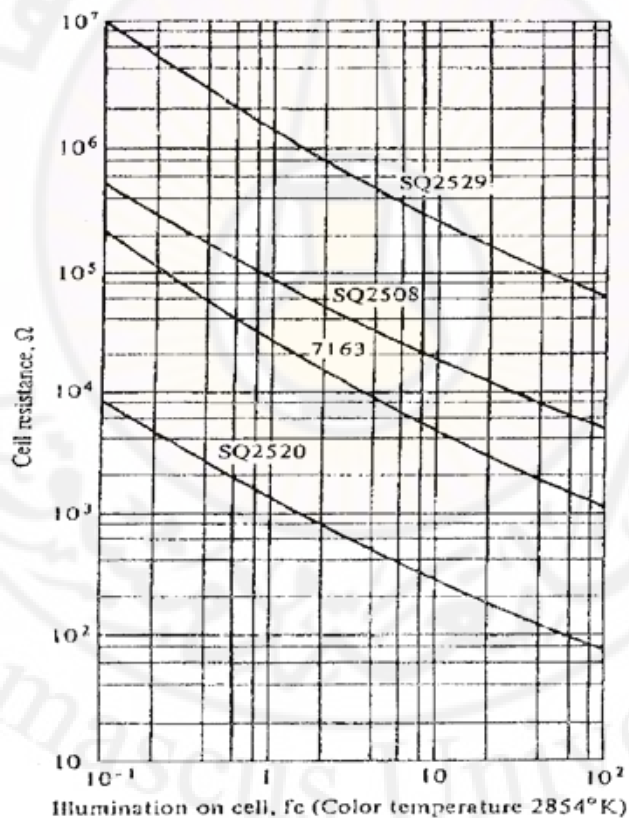
تسمى مقاومة الخلية في الظلام بمقاومة الظلام (Dark Resistance) ويمكن أن تبلغ حتى ($10^{13} \Omega$)، إلا أنه عند إضاءة الخلية فإن مقاومتها يمكن أن تبط بحسب ما تبينه منحنيات الخواص المبينة في الشكل 3-4 حيث يبين هذا الشكل تغير المقاومة مع تغير شدة الإضاءة لأربعة أنواع من الخلايا. وتعتمد المقاومة، بطبيعة الحال، على الخواص الفيزيائية لطبقة التوصيل الضوئي وكذلك على أبعاد الخلية.

إن مقاومة الظلام لبعض أنواع الخلايا من نوع (Cadmium Sulfide) يمكن أن تكون أكبر من مقاومتها عندما تضاء بمقدار 100,000 . وهناك مقاومات ضوئية أخرى يمكن أن تسمح بمرور تيار يبلغ حتى (1/2 Amp.). وبسبب هذه

الخصائص يمكن استخدام هذه الأنواع من المقاومات الضوئية للتحكم مباشرة بعمل الحاكمت (Relays) عندما تتغير شدة الإضاءة دون الحاجة إلى دارات تكبير.



شكل 3-3 - دائرة أساسية لتشغيل خلية كهروضوئية



شكل 3-4 - تغير المقاومة كدابع للشدة الضوئية لأربعة أنواع من الخلايا

لعناصر التوصيل الضوئي سيئة رئيسية وهي التأخر الزمني لاستجابة العنصر، أي تناقص مقاومته بعد سقوط الضوء عليه. وكذلك فإن عودة مقاومة العنصر إلى مقاومة الظلام تتأخر عن لحظة انقطاع الضوء. أي أن التيار الضوئي لا يتبع لحظياً التغير في شدة الإضاءة إلا أنه يزداد تدريجياً بعد ظهور الإضاءة، ويتلاشى تدريجياً بعد انقطاعها.

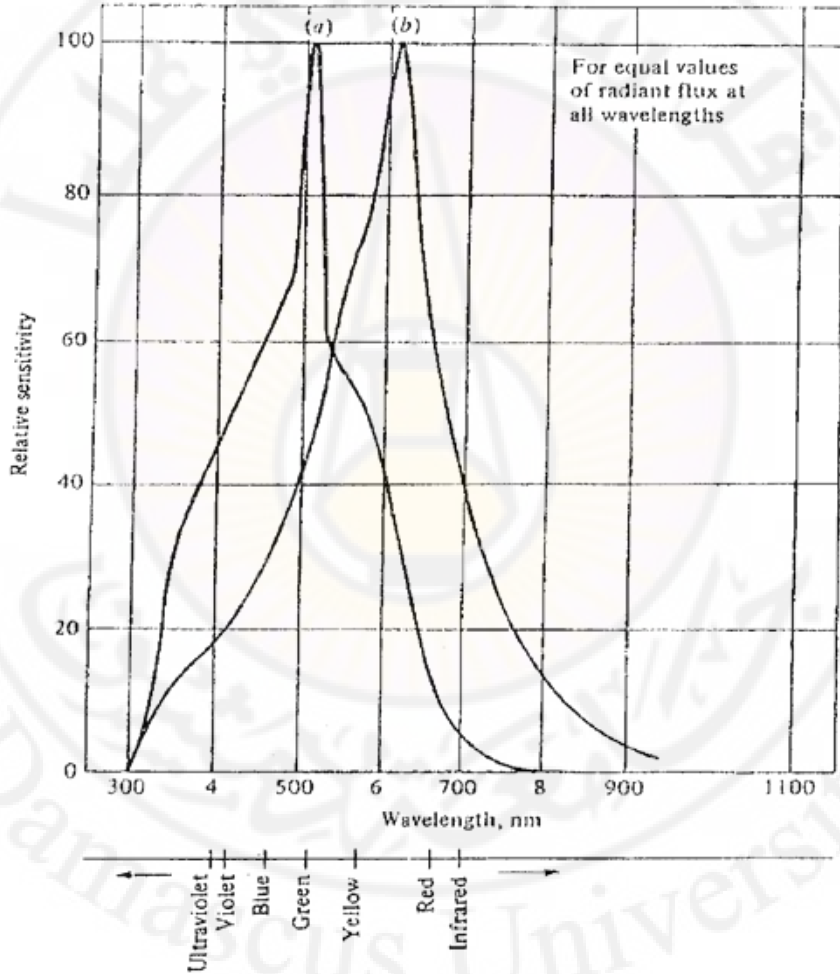
ويعتمد كل من ثابت زمن تزايد التيار وتناقصه على مادة المقاومة الضوئية وعلى مستوى شدة الإضاءة. ونتيجة لذلك فإن النظم التي تستخدم تغيرات في شدة الإضاءة يزيد ترددها عن (750 – 1000) هرتز لا يمكن أن تستعمل خلايا توصيل ضوئية بسبب هذا التأخر في زمن استجابة العنصر.

تختلف الاستجابة الطيفية لهذه العناصر بحسب المواد التي تتكون منها كما يبدو في الشكل 3-5. حيث يبدو أنه لا يوجد استجابة للإشعاع بطول موجة أقصر من (300 nm) تقريباً.

تكون خلية مقاومة ضوئية من مادة (Cadmium Sulfide) ذات حساسية عظمى في المنطقة الخضراء من الطيف أي عند طول موجة (510 nm) ويمكن استخدامها في المنطقة القريبة من تحت الحمراء وحتى بحدود (750 nm). بينما تتمتع خلية من مادة (Cadmium Sulfoselenide) بحساسية عظمى في المنطقة الصفراء البرتقالية من الطيف أي عند طول موجة (615nm) ويمكن استخدامها في المنطقة تحت الحمراء وحتى بحدود (1000 nm).

وتستجيب الخلايا نوع (Cadmium Selenide) إلى الضوء في المنطقة تحت الحمراء ضمن المجال (690 – 735 nm) من طول موجة. ويعني هذا أن هذا النوع من الخلايا يؤمن درجة من الرفض للضوء المرئي غير المرغوب به ولا يتأثر بمصادر لضوء التي تعمل في المجال (350 – 680nm) .

إن لدرجة الحرارة تأثير ضعيف على سلوك وحساسية المقاومة الضوئية إذا كانت شدة الإضاءة تزيد عن (10 fc). إلا أن تأثيرها يزداد أهمية ويبدو كبيراً عند مستويات إضاءة منخفضة حيث تزداد الحساسية بشكل كبير عند انخفاض درجة الحرارة.

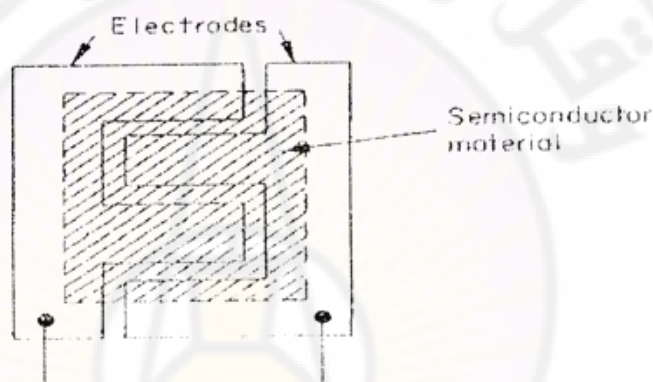


شكل 3-5- الاستجابة الطيفية لخلايا مقاومة ضوئية

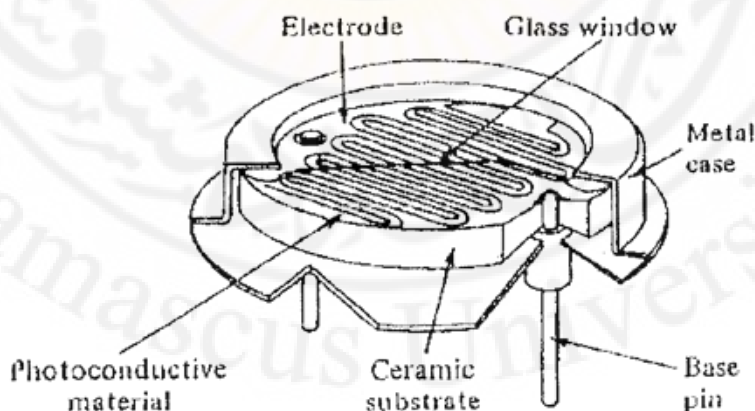
أ- خلية نوع Cadmium Sulfide

ب- خلية نوع Cadmium Sulfoselenide

يمكن، بالتحكم بأبعاد خلية المقاومة الضوئية من قبل الجهة المصنعة، تحديد قيمة المقاومة والقدرة التي تتحملها. يبين الشكل 3-6 مثلاً، بنية تفصيلية لتوزيع المادة الحساسة للضوء بشكل ثنائي بين القطبين المعدنيين من أجل تشكيل أكبر ما يمكن من مساحة تماس بين سطحي القطبين، وبالتالي زيادة إمكانية تحمل العنصر من التيار. ويبين الشكل 3-7 تركيباً بنوياً لها.



شكل 3-6 - أحد أشكال بنية مقاومة ضوئية



شكل 3-7 - مقطع في خلية مقاومة ضوئية

3-1-2- الخلايا الضوئية ذات الوصلة Junction Photocells:

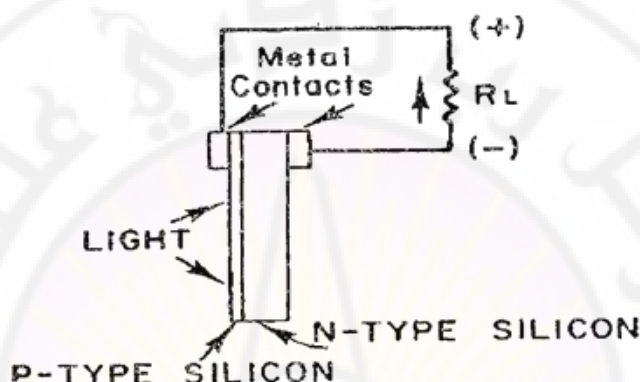
وتدعى أيضاً خلايا الوصلة الضوئية (Photojunction Cells) وتتكون من تركيبة تحتوي على طبقة من مادة (N) وطبقة من مادة (P). يمكن لهذه الخلايا الضوئية السيليكونية أن تعمل إما في النمط الجهدي الضوئي (Photovoltaic)، أو في نمط الموصل الضوئي (Photoconductive). ففي النمط الجهدي الضوئي تقدم هذه الخلية الجهدية الضوئية (Photovoltaic Cell) مقداراً صغيراً من الجهد عندما تتعرض للضوء وتكون وصلتها غير مستقطبة. ويمكن تكبير هذا الجهد الصغير بواسطة دائرة مكبر لنحصل على جهد ذي قيمة كافية من أجل القيام بعمليات تحكم في كثير من التطبيقات.

وعندما تستعمل خلايا متعددة مع بعضها لإنتاج كميات أكبر من الجهد يمكن تسمية هذه الخلايا بالخلايا الشمسية (Solar Cells) لأنها يمكنها أن تنتج قدرة كهربائية كافية من ضوء الشمس بحيث يمكن استخدامها في شحن بطاريات مثلاً أو في تشغيل حساسات (Sensors)... إلخ. وعندما تستعمل الخلية الضوئية في نمط الموصل الضوئي، أي كثنائي ضوئي، فإنه يجب تطبيق جهد استقطاب عكسي على الوصلة. ففي هذا النمط، تتغير مقاومة الوصلة عند سقوط الضوء على الثنائي الضوئي مما يجعله يعمل كمصدر للتيار.

يمكن أن تعمل الخلايا الضوئية، كخلايا شمسية أو كخلايا جهدية ضوئية (Photovoltaic Cells)، أو كثنائيات الضوئية (Photo Diodes)، أو كترانزستورات ضوئية (Photo Transistors) وغير ذلك من الخلايا الضوئية المكونة من أنصاف النواقل.

3-1-2-1- الخلية الشمسية أو الخلية الجهدية الضوئية Photovoltaic Cell :

يتألف النوع الشائع الاستعمال من وصلة (P-N) من مادة السيليكون. يبين الشكل 8-3 البنية الأساسية لهذه الخلية.



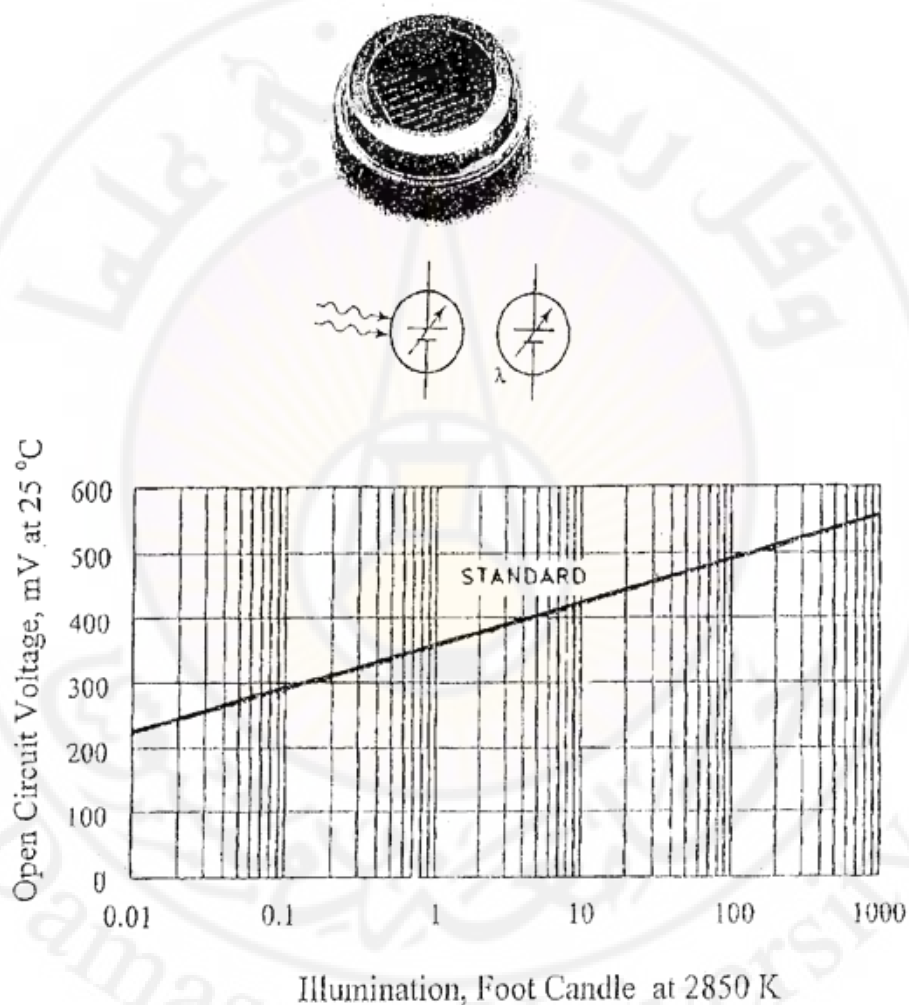
شكل 8-3 - خلية شمسية تحتوي على وصلة (P-N) سيليكونية

عند سقوط الضوء على الوصلة (P-N) تتحرك الكهارب من المادة (N) باتجاه الدارة الخارجية لتنتقل إلى المادة (P)، ومن المادة (P) إلى المادة (N) لتكمل الدارة كما هو الحال في دائرة تحتوي منبعاً للتيار المستمر (بطارية) فيكون اتجاه الكهارب هنا بعكس اتجاهها فيما لو طبق على الثنائي منبع تغذية خارجي. لذلك تعتبر الخلية الشمسية مصدراً للقدر الكهربية نتيجة سقوط الضوء عليها.

يبين الشكل 9-3 شكل الخلية الشمسية (الخلية الجهدية الضوئية) ورمزها وكذلك منحنيات الخواص لبعض أنواعها وهي العلاقة بين شدة الإضاءة الساقطة عليها والجهد الناتج.

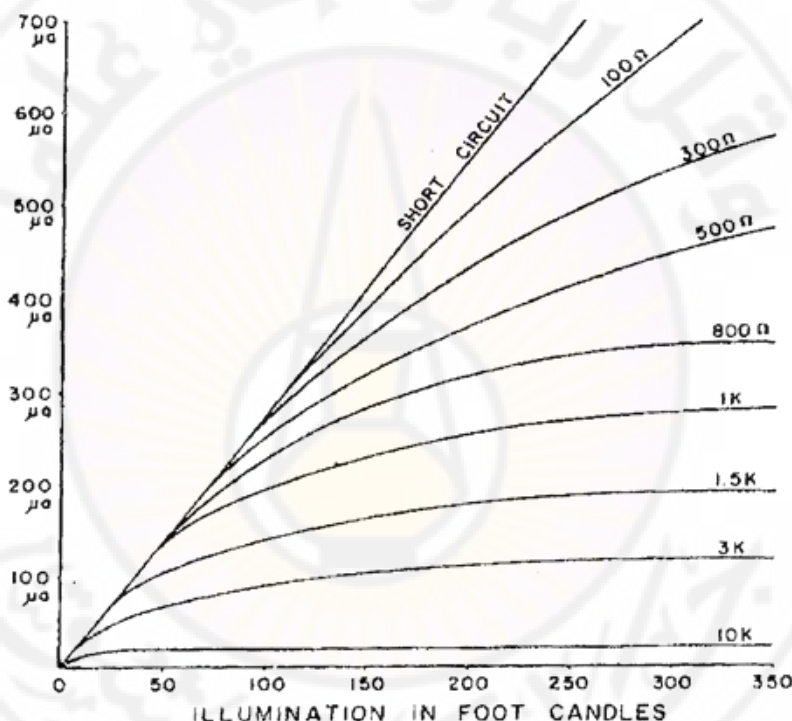
تدل هذه المنحنيات على أن العلاقة بين القوة المحركة المتولدة (حالة جهد دائرة مفتوحة) وبين شدة الضوء الساقط على الخلية ليست علاقة خطية بل علاقة أسية. ويبين الرمز سهمين أو إشارة (λ) للدلالة على أن الخلية تعمل بتأثير الضوء الذي

يُخرقها، ويدل السهم الداخلي على أن قيمة الجهد المنتج هو جهد متغير تبعاً لشدة الضوء الساقط.



شكل 3-9 - شكل الخلية الجهدية الضوئية ورمزها والعلاقة بين شدة الإضاءة وجهد الدارة المفتوحة

يبين الشكل 10-3 العلاقة بين التيار المار في الدارة وشدة الإضاءة الساقطة على الخلية وذلك من أجل قيم مختلفة من مقاومة الحمل (R). ويبدو من هذا الشكل أن العلاقة بين شدة التيار وشدة الضوء تكون أكثر خطية من أجل قيم صغيرة من مقاومة الحمل.

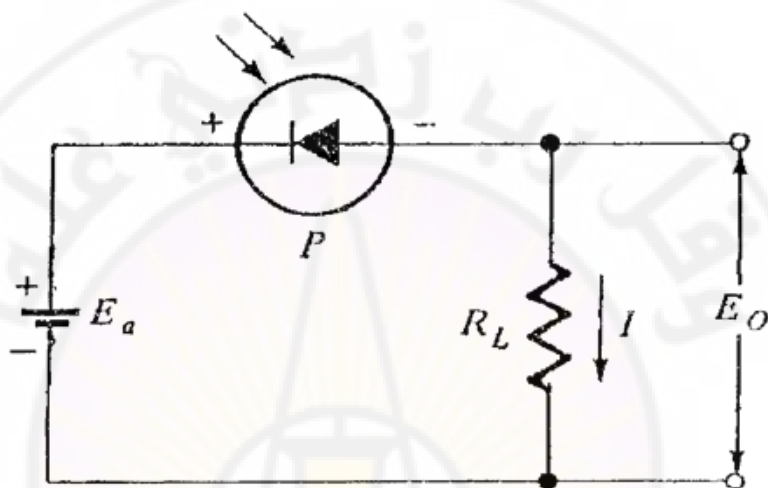


شكل 10-3 - العلاقة بين تيار الخلية الشمسية وشدة الضوء الساقط عليها وذلك من أجل قيم مختلفة من مقاومة الحمل (R)

2-2-1-3 - الثنائي الضوئي (Photo Diode) :

يحتوي الثنائي الضوئي أيضاً على وصلة ($P-N$) يسقط عليها الضوء ليعطي الثنائي تياراً. يبين الشكل 11-3 دائرة تحتوي ثنائياً ضوئياً ومنبع تغذية تيار مستمر،

ويبين الشكل 12-3 منحنيات الخواص لهذا العنصر وهي العلاقة بين تيار العنصر والجهد المطبق على طرفيه من أجل كميات مختلفة من الضوء الساقط عليه.

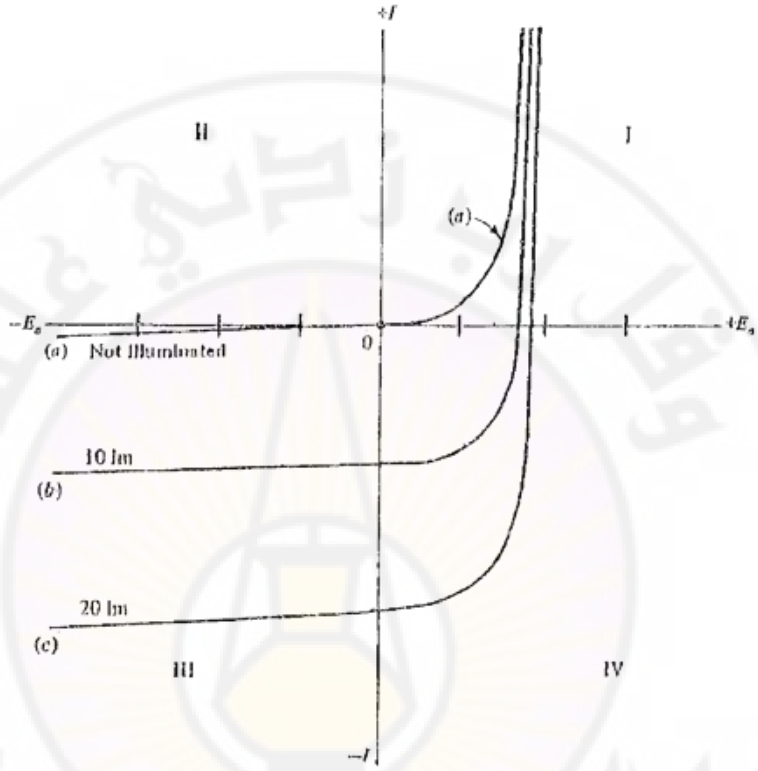


شكل 11-3- دائرة أساسية لعمل الثنائي الضوئي

في الظلام، تكون العلاقة غير خطية بين الجهد والتيار ولها شكل خواص الثنائي العادي كما يشير إليه المنحنى (a) في الشكل. وعند سقوط الضوء على الثنائي تصبح منحنيات الخواص كما هو مبين في المنحنيين (b, c).

يلاحظ أن التيار ($-I$) لا يساوي صفراً حتى ولو كان الجهد المطبق على الثنائي صفراً وهذا يعني أنه بالرغم من كون جهد الاستقطاب يساوي صفراً فإنه يتولد تيار نتيجة لسقوط الضوء على الثنائي بنفس الطريقة التي يتولد بها تيار الخلية الشمسية. إن شدة التيار المتولد هنا تتناسب مع شدة الضوء الساقط.

من الشكل 12-3 نرى أنه عندما يستقطب الثنائي عكسياً يعتبر مولداً للتيار ويكون الثنائي ذا مقاومة داخلية كبيرة جداً، فهذه الطريقة يعمل العنصر كخلية كهروضوئية أو ثنائي ضوئي.

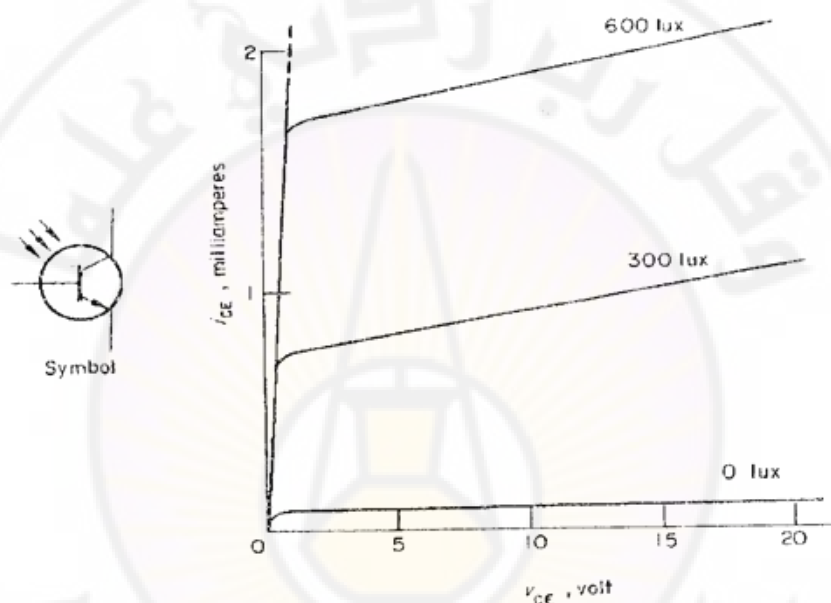


شكل 3-12- منحنيات خواص الضوئي

3-2-1-3- الترانزستور الضوئي Photo Transistor :

يعمل هذا الترانزستور (نوع NPN مثلاً) بتعريض وصلة القاعدة-الباعث إلى الضوء، (حيث يترك في غلافه فتحة تسمح باختراق الضوء نحو القاعدة)، فيزداد تيار القاعدة بسبب الضوء الساقط. ويؤدي تذبذب قيمة الشدة الضوئية للضوء الساقط إلى تغير قيمة تيار القاعدة. ويبدو أن الحال هنا يشبه تطبيق إشارة على قاعدة الترانزستور من أجل تكبير هذه الإشارة.

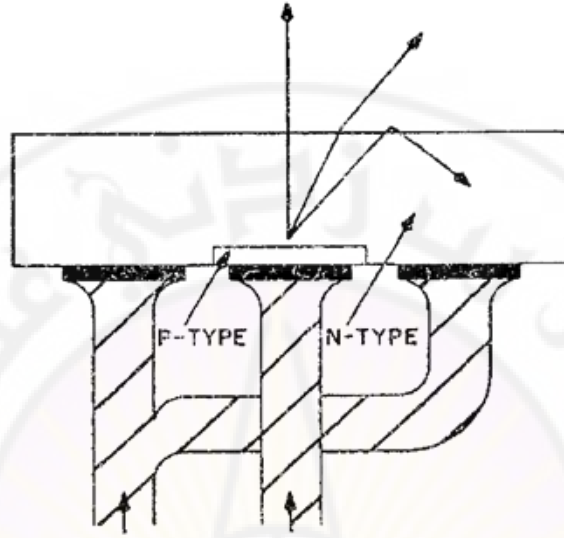
يبين الشكل 13-3 رمز العنصر وخواصه النموذجية. تقدر الحساسية، من أجل ترانزستور ضوئي نموذجي، بقيمة (500 mA/lm)، ويكون تيار الجمع عادة، بضعة ميللي أمبير وهذا يكفي من أجل تشغيل حاكمة.



شكل 13-3 - رمز ترانزستور ضوئي نموذجي وخصائصه

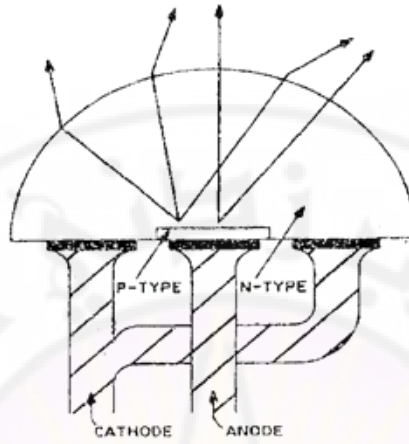
3-1-2-4 - الثنائي الباعث للضوء LED: Light Emitting Diode

تصنع معظم الثنائيات الباعثة للضوء (LED) من أنصاف النواقل نوع زرنيخ الغاليوم (GaAs). ويتألف العنصر من مادة نوع (N)، تعالج كيميائياً بطريقة أن جزءاً من السطح الأسفل منها يتحول إلى مادة من النوع (P)، ويتم توصيل أقطاب معدنية إلى كل من المادتين (P) و (N) بطريقة لا تعيق الضوء الناتج كما يبينه الشكلان 14-3 و 15-3 .



شكل 14-3 - بنية ثنائي LED ذي سطح مستوي

إن جزءاً كبيراً من الضوء المتولد عند وصلة الثنائي يضيع بسبب الانعكاسات الداخلية. إن معامل الانكسار لزرنيخ الغاليوم يساوي 3.6 مرة أكثر مما للهواء، ويعني هذا أن الشعاع الذي يرد إلى السطح العلوي لمادة نصف الناقل بزاوية أكبر من 16 درجة، بالنسبة للعمود على السطح، ينكسر داخلياً حيث تقتصه البلورة ويضيع. لذلك يؤثر شكل سطح العنصر على شدة الضوء الصادر منه، ففي النوع ذي السطح المستوي المبين في الشكل 14-3 ينعكس الشعاع الذي يتجه نحو سطح قمة نصف الناقل إذا كانت الزاوية بين الشعاع ومحور العنصر أكبر من (16 deg.) فلا تتم الاستفادة من هذا الشعاع الضائع. بينما تزيد فاعلية الثنائي المبين في الشكل 15-3 بحدود عشرة مرات أكثر عندما يكون شكل سطح القمة نصف كروي مقارنة مع الثنائي ذي السطح المستوي نتيجة تناقص الانعكاسات الداخلية للأشعة. تتراوح الأقطار النظامية لهذه البلورات عادة بين (1 mm) و (3 mm).

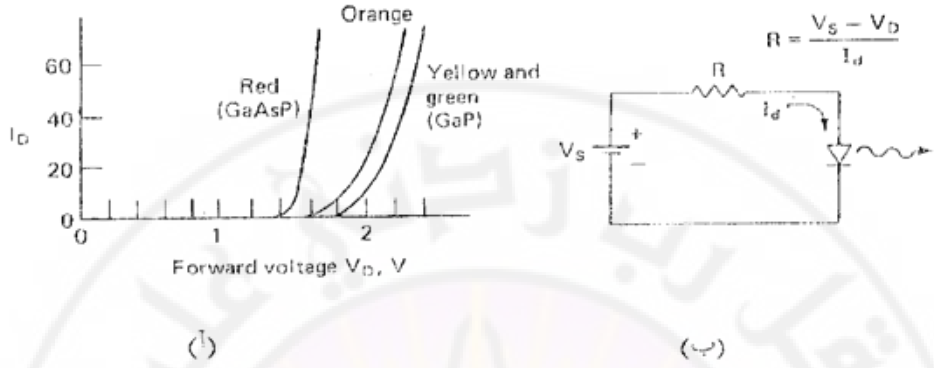


شكل 3-15 - بنية ثنائي LED ذي سطح نصف كروي

ومن أجل رسم منحنيات خواص العنصر نضعه في دائرة كهربائية حسب ما يبينه الشكل 3-16-ب- فنحصل على منحنيات خواص العنصر وهي العلاقة بين الجهد والتيار حسب ما هو مبين في الشكل 3-16-آ- . إن منحنيات الخواص هذه تشبه منحنيات خواص ثنائي عادي مستقطب أمامياً إلا أن الجهد الذي يبدأ عنده التيار يأخذ قيمة ملحوظة هو محدود ($1.4 - 2.7 V$). ومن أجل تحديد قيمة التيار ضمن الحدود الآمنة المسموح بها، فإنه يجب ربط مقاومة على التسلسل مع الثنائي، وتحسب هذه المقاومة من المعادلة التالية:

$$R = (V_S - V_D) / I_d$$

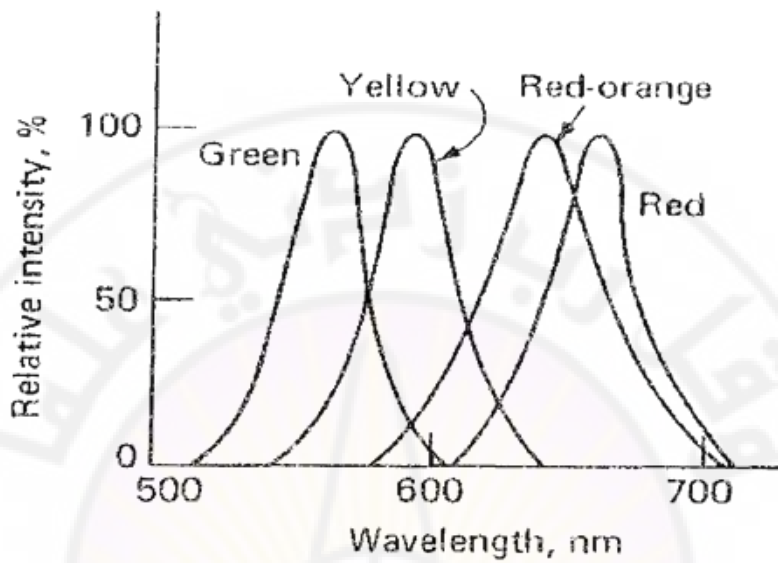
إن استقطاب الثنائي LED هو بعكس استقطاب الثنائي الضوئي. فعندما يُستقطب الثنائي LED أمامياً، تتدفق حوامل الشحنات عبر الوصلة وتتحد مع الحوامل الأكثرية فتتحرر طاقة على شكل فوتونات ذات قيم تعتمد على نوع مادة نصف الناقل.



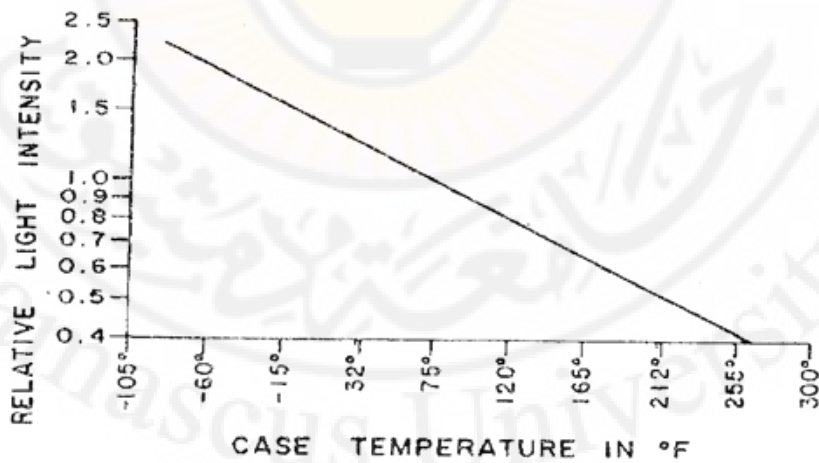
شكل 16-3- منحنيات خواص ثنائي LED

إن أنصاف النواقل التي تتمتع بما يسمى طاقة ثغرة (Gap Energy) أعلى تعطي طاقة فوتون أعلى، أي أنها تعطي ضوءاً ذا طول موجة أقصر. فمن أجل ثنائيات نوع سيليكون يكون أعظم طول موجة محدود (900 nm) ويقع هذا قرب المنطقة تحت الحمراء من الطيف. ومن أجل ثنائيات نوع زرنيخ الغاليوم ذات طاقة ثغرة أعلى، يقع الإرسال في المنطقة المرئية من الطيف. إن الثنائيات الباعثة للضوء الشائعة تعمل في المنطقة الحمراء أو البرتقالية أو الصفراء أو الخضراء كما يوضحه مخطط الطيف المبين في الشكل 17-3.

إن ارتفاع درجة الحرارة يمكن أن يخفض من مردود الثنائي الباعث للضوء كما يبدو على الشكل 18-3 الذي يبين العلاقة بين درجة حرارة جسم الثنائي والشدة النسبية للضوء الناتج مع الأخذ بعين الاعتبار المحافظة على قيمة ثابتة لتيار الاستقطاب. يبدو من الشكل أن الضوء الذي يولده الثنائي عند درجة حرارة ($120^{\circ}\text{F} +$) يبلغ 80% فقط من قيمته عند درجة حرارة ($75^{\circ}\text{F} +$). وإذا كان ممكناً من الناحية العملية تبريد الثنائي إلى درجة حرارة ($75^{\circ}\text{F} -$)، فإن شدة الضوء الناتج ستكون ضعف شدته عند درجة حرارة ($75^{\circ}\text{F} +$).



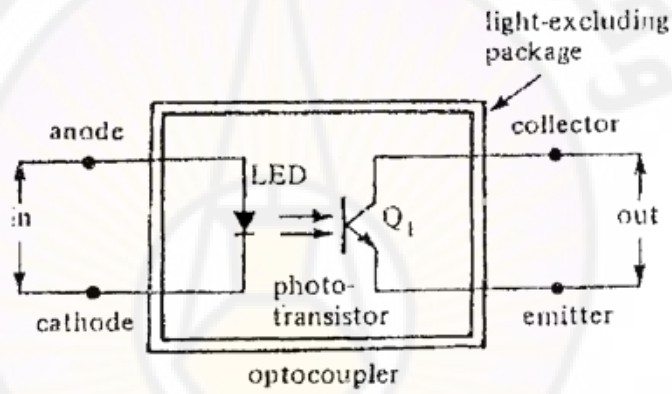
شكل 3-17 - مخطط طيف لثنائيات LED



شكل 3-18 - العلاقة بين درجة حرارة الغلاف وشدة الضوء النسبية لثنائي LED عند تيار استقطاب أمامي ثابت

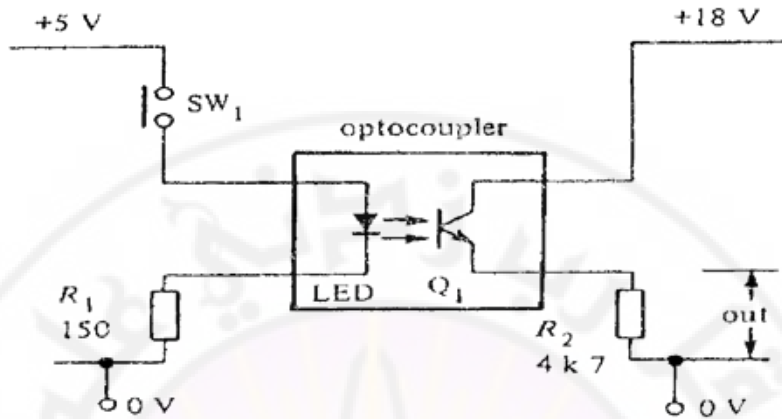
3-1-3- أدوات الاقتران الضوئية OptoCoupler Devices:

لقد تحدثنا في الفقرات السابقة عن العناصر المولدة للضوء مثل العنصر LED والعناصر الحساسة للضوء مثل الترانزستورات الضوئية. فإذا جُمع هذان العنصران قريبين من بعضيهما في علبة واحدة لا تسمح بدخول الضوء إليها بحيث يسقط ضوء العنصر LED على وجه الترانزستور الضوئي كما يبينه الشكل 3-19، فإننا نحصل على عنصر قارن ضوئي.



شكل 3-19 - أداة قارن ضوئي أساسية

يمكن توصيل القارن الضوئي بدارة كهربائية كما يبينه الشكل 3-20. حيث نجد أن تيار التوصيل للترانزستور Q₁ يمكن التحكم به بواسطة تيار التوصيل للعنصر LED بالرغم من أن كلا من العنصرين منفصلان بنيوياً. عندما يكون المفتاح SW₁ مفتوحاً فإنه لا يمر أي تيار في الـ LED ولا يسقط أي ضوء على وجه الترانزستور الضوئي Q₁ ويشكل Q₁ دارة مفتوحة ويكون الجهد اأمايط على المقاومة R₂ صفراً. وعندما يغلق المفتاح SW₁ يمر تيار خلال الـ LED عن طريق المقاومة R₁ ويسقط الضوء الصادر الـ LED على وجه Q₁ مما يؤدي هذا إلى أن يصبح Q₁ بحالة توصيل فيتولد جهد خرج على المقاومة R₂.

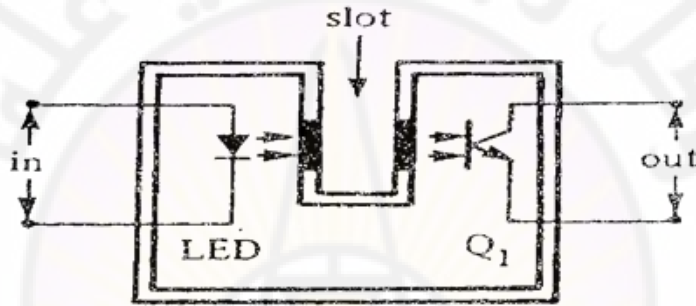


شكل 20-3- دائرة قارن ضوئي أساسية

يمكن أن تتضمن تطبيقات القارن الضوئي العازل اقتران إشارة من جهد منخفض إلى جهد مرتفع (أو بالعكس). إن النقطة الأكثر أهمية التي يجب ملاحظتها عن أداة الاقتران الضوئي للشكل 3-19 هي أن الدارة الموصلة إلى مدخل القارن يمكن أن تكون معزولة كهربائياً كلياً عن دائرة المخرج، ويمكن أن يوجد فرق كمون يصل إلى مئات أو آلاف الفولت بين هاتين الدارتين دون أن يؤثر ذلك على عمل القارن الضوئي. إن خصائص العزل هذه هي الظاهرة الهامة الرئيسية للقارن الضوئي الذي يعرف عادة كقارن ضوئي عازل.

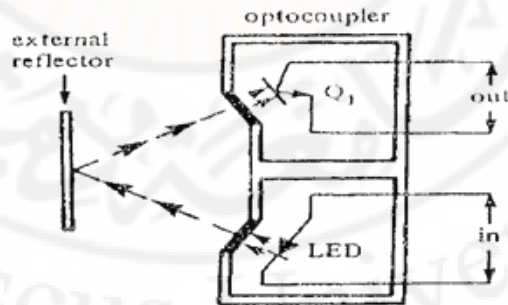
هناك أشكال أخرى من القارنات الضوئية، يعرف النوع المبين في الشكل 3-21 بقارن ضوئي مشقوق (Slotted Optocoupler) حيث يوجد شق في العلبة بين مصدر الضوء (عنصر الـ LED) والعنصر الحساس للضوء (الترانزستور الضوئي). يمر الضوء في هذه الأداة بشكل عادي من الـ LED إلى Q_1 دون أن يتعرض إلى تخامد مهم من خلال الشق. يمكن في هذا النوع أن يعاق الاقتران الضوئي كلياً بوضع شريط حاجز يمر في الشق للكشف عن نهاية الشريط أو تحديد موقع مثلاً.

أما العنصر المبين في الشكل 3-22 فإنه يعرف بالقارن الضوئي العاكس (Reflective Optocoupler) حيث يكون كل من الـ LED و Q_1 ضمن العلبة محجوبين عن بعضيهما ضوئياً ويتوجه وجه كل منهما من العلبة، خارجياً، بنفس الاتجاه. وتكون البنية بحيث أنه تنشأ حلقة اقتران ضوئي بواسطة جسم عاكس قريب يقع خارج العلبة.



شكل 3-21- قارن ضوئي مشقوق

يمكن أن تستعمل هذه القارنات الضوئية في تطبيقات عديدة نذكر منها مثلاً كشف الدخان أو الضباب أو عداد دوران محرك أو قياس السرعة.



شكل 3-22- قارن ضوئي عاكس

3-1-4- معاملات (Parameters) القارن الضوئي:

آ- نسب النقل (التحويل) Transfer Ratios:

إن إحدى المعاملات (Parameters) الأكثر أهمية لقارن ضوئي هي كفاءة الاقتران الضوئي له. ومن أجل أن نزيد من أهمية هذا الم عامل فإن الـ LED والترانزستور الضوئي (الذان يعملان عادة في المنطقة تحت الحمراء) يتوافقان طيفياً دائماً. إن الطريقة الأفضل من أجل توصيف مردود الاقتران الضوئي هي في تقييم نسبة التحويل لتيار العنصر (Current Transfer Ratio, CTR) بين مخرج القارن ومدخله، أي نسبة تيار المخرج (I_c) مقاساً عند مجمّع الترانزستور الضوئي إلى تيار المدخل (I_f) الذي يدخل العنصر LED. وهكذا نكتب: ($CTR = I_c / I_f$). ويمكن أن نعبر عن CTR عملياً كرقم بسيط مثل: 0.5، أو كنسبة مئوية: 50%. وتعتمد قيم CTR الفعلية على قيم تياري المخرج والمدخل للعنصر وكذلك على قيمة جهد التغذية للترانزستور الضوئي. يبين الشكل 3-23 ثلاث مجموعات نموذجية من تيارات (مخرج \ دخل) عند قيم مختلفة من الجهد V_e .

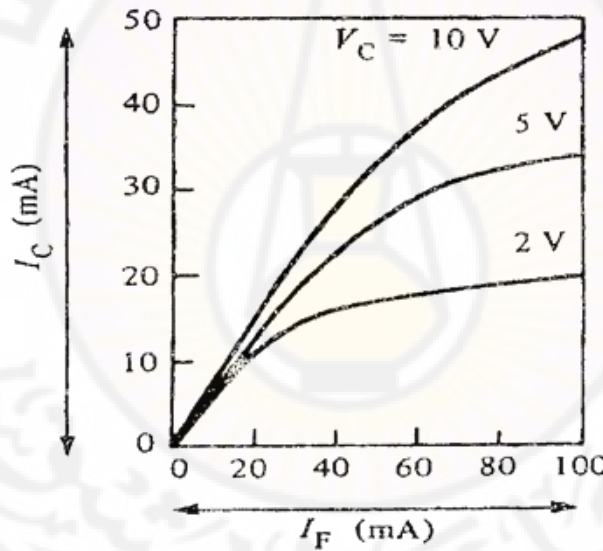
ب- جهد العزل (Isolation Voltage):

وهو الجهد المستمر الأعظمي المسموح تواجدّه بين دارتي المدخل والمخرج، وتغيّر القيم النموذجية له بين 500 V و 4 kV.

ج - $V_{CE} (max)$: وهو الجهد المستمر الأعظمي المسموح تطبيقه على ترانزستور الخرج، وتغيّر القيم النموذجية له من 20 V إلى 80 V.

د - $I_F(\max)$: وهو التيار المستمر الأعظمي المسموح مروره في الـ LED، وتتغير القيم النموذجية له من 40 mA إلى 100 mA.

هـ - عرض الحزمة (Band Width): وهو تردد الإشارة النموذجي الأعظمي (مقاساً بالكيلو هرتز) الذي يمكن أن تمر عنده الإشارة بشكل مفيد خلال القارن الضوئي عندما يعمل القارن وفق نمط عمله الطبيعي. وتتغير القيم النموذجية لعرض الحزمة من 20 kHz إلى 500 kHz.



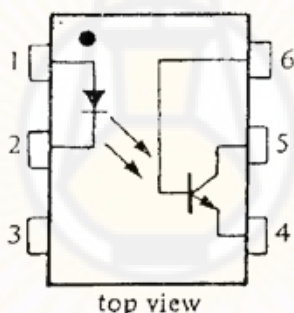
الشكل 3-23- خصائص ($I_F \setminus I_C$) نموذجية لقارن ضوئي بسيط عند قيم مختلفة من جهد مجمع الترانزستور

3-1-5- قارنات عملية:

توجد أشكال أساسية من القارنات الضوئية إلا أنها تعطي أرقاماً مختلفة بحسب الشركة الصانعة وسنبين هنا أمثلة نموذجية من هذه العناصر. تتوفر القارنات الضوئية

العملية بستة أشكال أساسية كما تبينه الأشكال من 24-3 إلى 29-3. تتصف أربعة منها بأنها قارنات ضوئية عازلة (الأشكال من 24-3 إلى 27-3، أما القارنان الضوئيان الآخران فهما من النوع المشتق ومن النوع العاكس. ويبين الجدول 1-3 قيم معاملات نموذجية لهذه القارنات الستة.

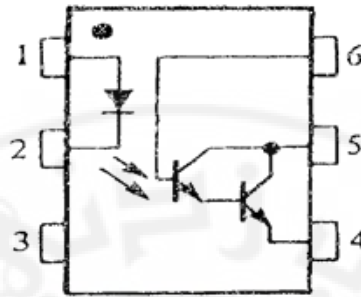
إن القارن الضوئي العازل المبين في الشكل 24-3 يستعمل مرحلة خرج ذات ترانزستور ضوئي واحد موضوع ضمن علبة ذات ستة أطراف بحيث تكون القاعدة موصلة إلى إحدى هذه الأطراف. فمن أجل الاستعمال العادي تترك القاعدة ذارة مفتوحة، وتحت هذه الظروف يكون للقارن الضوئي قيمة CRT دنيا تساوي 20 % وعرض حزمة مفيد يساوي 300 kHz.



شكل 24-3- قارن ضوئي عازل بسيط

يمكن تحويل الترانزستور الضوئي إلى ثنائي ضوئي وذلك بتقصير القاعدة مع الباعث (الطرف 6 مع الطرف 4) فيؤدي هذا إلى تناقص قيمة CTR إلى حوالي 0.2 % ويزداد عرض الحزمة إلى حوالي 30MHz.

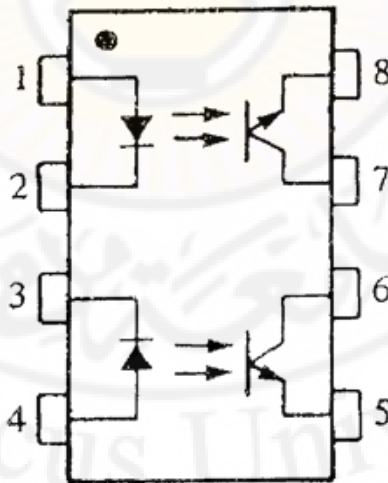
أما الشكل 25-3 فهو قارن ضوئي دارلنغتون، وبسبب ربح التيار الكبير للترانزستور دارلنغتون فإن لهذا القارن قيمة CTR نموذجية دنيا بحدود 300 % إلا أن عرض حزمته المفيد هو 30 kHz فقط.



top view

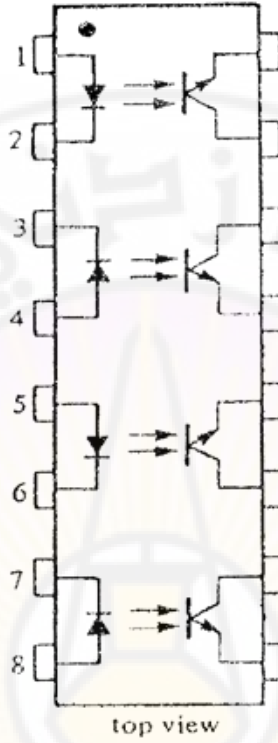
شكل 3-25- قارن ضوئي دارلنغتون عازل

إن القارنات الضوئية المزدوجة (الشكل 3-26) والرباعية (الشكل 3-27) تستخدم مراحل خرج وحيدة الترانزستور لا تكون القاعدة فيها موصلة إلى طرف خارجي. نلاحظ هنا أن أطراف المدخل تكون على جانب واحد من العلبة وتكون أطراف المخرج على الجانب الآخر .



top view

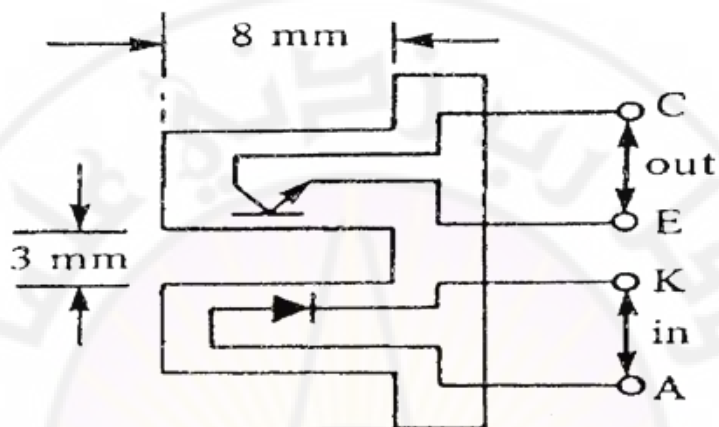
شكل 3-26- أداة قارن ضوئي عازل مزدوج



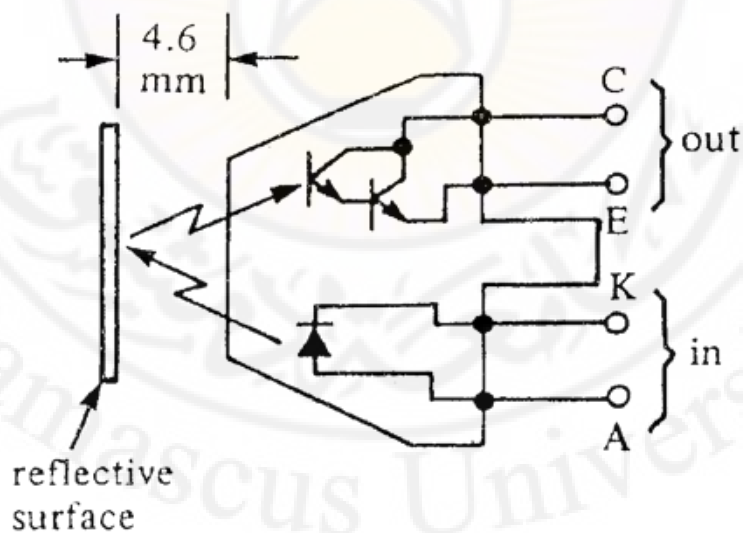
شكل 3-27- أداة قارن ضوئي عازل رباعي

إن هذه البنية تسهل الحصول على قيم ممكنة عظمتى من جهد العزل. وبالرغم من أن هذه الأدوات المتعددة الأقطاب هي ذات قيم جهد عزل تبلغ بحدود 1.5 kV فإن قيم الجهود العظمى المسموح بها بين قناتين متجاورتين يجب ألا يزيد عن 500 V. إن قيم جهد العزل هي غير محددة لأدوات الاقتران الضوئي المشقوقة (الشكل 3-28) والعاكسة (الشكل 3-29). يبلغ عرض الشق النموذجي بحدود 3 mm وتبلغ CTR للنوع ذات الشق قيسة دنيا 10 % وعرض حزمة 300 kHz. أما القارن الضوئي العاكس (الشكل 3-29) فإنه يستعمل مرحلة خرج دارلنغتون وهو ذو عرض حزمة مفيد تبلغ 20 kHz فقط وقيمة CTR دنيا تبلغ

0.5 % فقط عند عاكس 5 mm من سطح ذي مردود انعكاس 90 % عندما يعمل LED المدخل عند تياره الأعظمي 40 mA.



شكل 3-28- فارن ضوئي مشقوق نموذجي



شكل 3-29- فارن ضوئي عاكس نموذجي

جدول 3-1: قيم معاملات نموذجية لقارنات الأشكال من 3-24 إلى 3-29

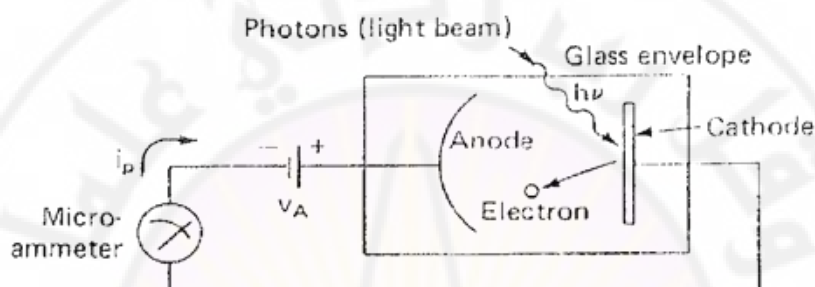
Parameter	Isolating Optocoupler				Slotted Optocoupler	Reflective Optocoupler
	Simple Type	Darlington Type	Dual Type	Quad Type		
Isolating Voltage	+ 4 kV	+ 4 kV	± 1.5 kV	+ 1.5 Kv		
V_{CE} (max)	30 V	30 V	30 V	30 V	30 V	15 V
I_B (max)	60 mA	60 mA	100 mA	100mA	50 mA	40 mA
CTR (min)	20 %	300 %	12.5 %	12.5 %	10 %	0.5 %
Bandwidth	300 kHz	30 kHz	200kHz	200kHz	300 kHz	20 kHz

3-2- المضاعفات الضوئية Photomultipliers:

وتعتمد في عملها على الظاهرة الكهروضوئية، أي تحرير الإلكترونات من سطح معدني تصدمه فوتونات عالية الطاقة. وتشبه بنية المضاعف الضوئي، مبدئياً، بنية خلية ضوئية ذات الأنبوب المفرغ (Vacuum Tube Photocell)، حسب ما يبينه الشكل 3-30. تتألف هذه الخلية، من وعاء زجاجي مفرغ يحتوي مهبطاً ذا سطح حساس للضوء، ومن مصعد لتجميع الإلكترونات، ويكون سطح المهبط، عادة، كبيراً نسبياً للحصول على أكبر كمية من الإلكترونات.

تعتمد فكرة هذه الخلية الضوئية على أنه عندما يصدم الفوتون الضوئي سطح المهبط المعدني، وإذا كانت طاقة الكم (Quantum Energy) التي يحملها الفوتون تساوي أو أكبر من تابع العمل (Work Function) للسطح، فإنه من الممكن أن يتسبب ذلك في إصدار إلكترون. ونقول أنه قد تم امتصاص الفوتون، وإذا كانت طاقته أكبر من تابع العمل، فإن الطاقة الزائدة تظهر كطاقة حركية (Kinetic Energy) للإلكترون المنبعث. وحيث إن شدة الضوء هي مقياس لعدد الفوتونات الواصلة إلى

سطح المعدن، فإن تزايد الشدة يؤدي إلى تزايد التيار المنبعث. وليس بالضرورة أن يؤدي كل فوتون إلى إصدار إلكترون، حيث ينعكس العديد من الفوتونات من السطح.

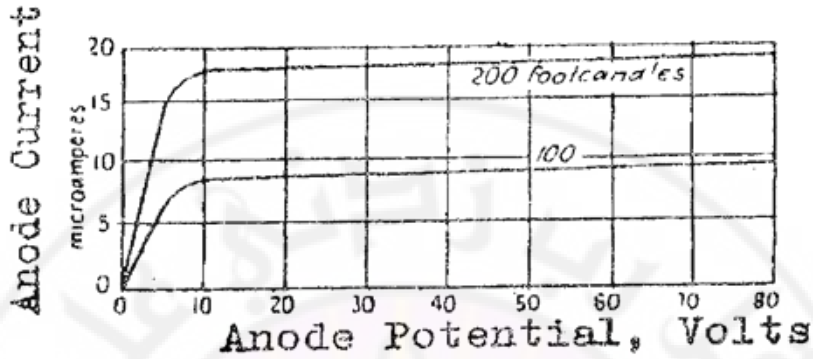


شكل 30-3 - خلية كهروضوئية ذات وعاء مفرغ

إن المواد ذات تابع العمل المنخفض هي المواد الأفضل من أجل مهبط كهروضوئية، ونذكر منها: السيزيوم، البوتاسيوم، الروبيديوم، الصوديوم، والليثيوم، حيث تعالج هذه المواد بوجود الهيدروجين أو الأوكسيجين وهي ذات حساسية كبيرة أمام الطيف المرئي.

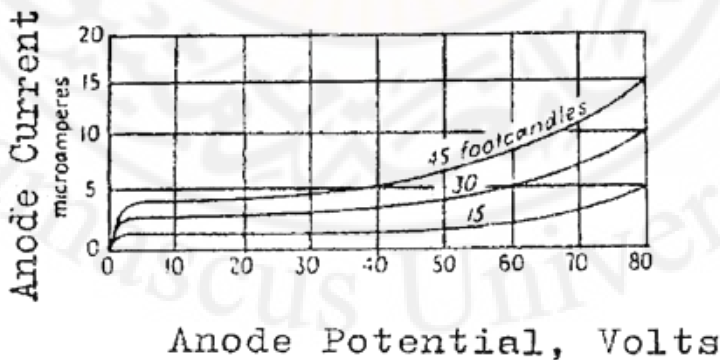
عندما تصدم الفوتونات الضوئية سطح المهبط، تتحرر الإلكترونات من هذا السطح، ويتم تجميعها بواسطة المصعد المطبق عليه جهد موجب، ($V \approx 150 \text{ V}$)، ويكون التيار الناتج عن سقوط الضوء على المهبط متناسباً مع عدد الفوتونات الساقطة، أي مع شدة الضوء عند أي طول موجة محدد.

يبين الشكل 31-3 منحنيات الخواص خلية كهروضوئية مفرغة ومثل العلاقة بين كل من الجهد المطبق على المصعد و التيار المصعد من أجل شدة ضوئية مختلفة. ويبدو أن التيار يصل إلى الإشباع تقريباً من أجل قيم صغيرة من الجهد المطبق.

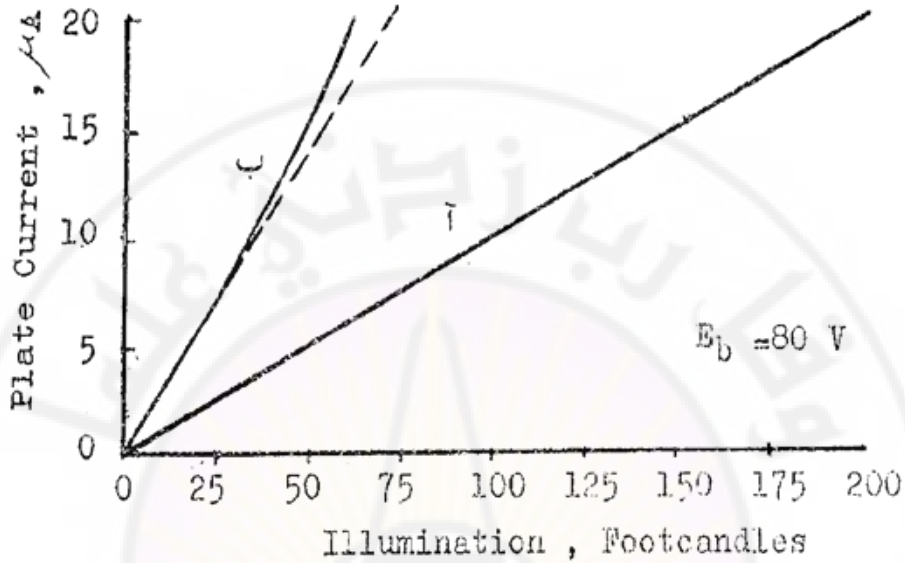


شكل 31-3- منحنيات الخواص لخلية كهروضوئية مفرغة

ويبدو أن وجود الغاز الحامل وبضغط منخفض يغير، عملياً، منحنيات الخواص للخلية فتبدو كما يبينه الشكل 32-3، ونلاحظ تزايد حساسية الخلية حيث يزداد التيار من أجل شدة إضاءة محددة وذلك بازدياد الجهد. وبمقارنة تيارى الخليتين المفرغة والغازية عند شدات ضوئية مختلفة نحصل على الشكل 33-3 الذي يبدو فيه أن تيار المصعد يتغير خطياً مع الشدة الضوئية بالنسبة للخلية المفرغة، بينما ينحرف عن الخطية بالنسبة للخلية الغازية.



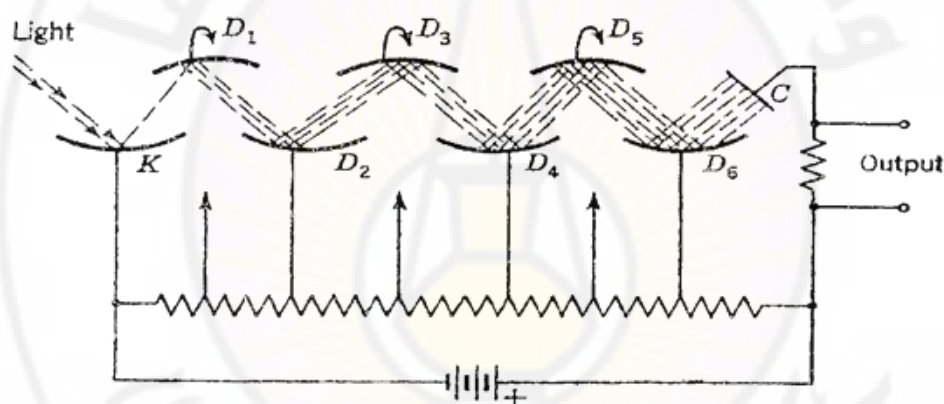
شكل 32-3- منحنيات الخواص لخلية كهروضوئية غازية



شكل 3-33- تيار الخلية الكهروضوئية كنابع للشدة الضوئية
آ- خلية مفرغة، ب- خلية غازية

يتم الحصول على مضاعف ضوئي بإضافة مضاعف إلكتروني متعدد المراحل (متعدد المصاعد) إلى الخلية الضوئية كما يبينه الشكل 3-34. فعندما تصدم فوتونات ذات طاقة كافية، سطح المهبط، تتحرر إلكترونات تنجذب إلى المصعد المجاور بسرعة بسبب جهده الموجب المرتفع بالنسبة إلى المهبط، ويؤدي اصطدام هذه الإلكترونات بالمصعد المجاور إلى إصدار إلكترونات ثانوية من المصعد المجاور. وينتج عن كل إلكترون وارد، عادة، عدد اثنين أو ثلاثة إلكترونات ثانوية، فينتج عن ذلك ظاهرة مضاعفة الإلكترونات، ويحدث هذا عند كل مرحلة أو كل مصعد. وتكون النتيجة هي أن التيار الضوئي (Photocurrent) المنبعث يتضاعف حتى حدود (10^6) ، بحسب عدد المصاعد، ويعني هذا حساسية عالية جداً تتصف بها المضاعفات الضوئية.

يعتبر المضاعف الضوئي هو الكاشف الضوئي المتوفر الأسرع والأكثر حساسية، حيث يستجيب لبضعة فوتونات بمردود عالي. ويمكن أن يستجيب للأشعة تحت البنفسجية إذا كان زجاج الخلية شفافاً يسمح بمرور هذا النوع من الإشعاع، إلا أن العيب فيه هو ضعف استجابته للأشعة الحمراء وتحت الحمراء. ومن عيوبه هي تعطل مهبطه إذا تعرض لشدات ضوئية عالية وكان الجهد الكهربائي موصلاً إليه. ونظراً لحجمه وضعف بنيانه وكلفته فإنه لا يستعمل إلا عند الحاجة إلى عنصر عالي الحساسية وسريع الاستجابة.



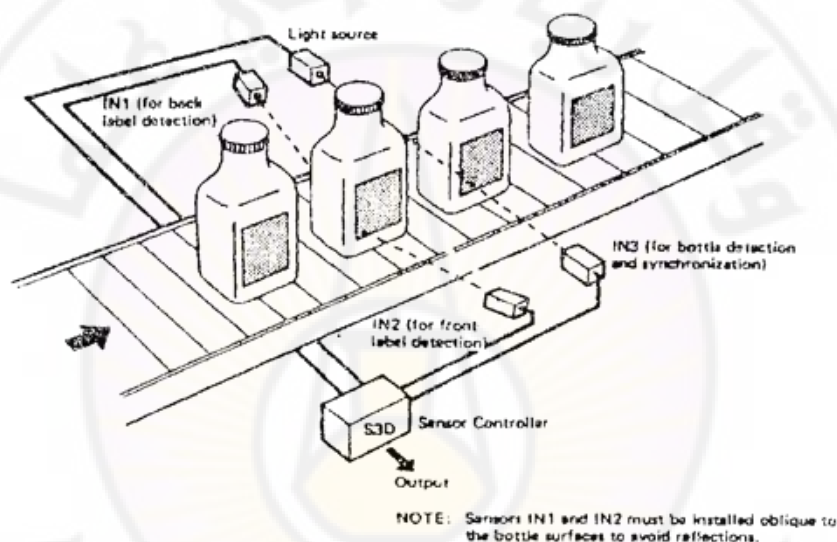
شكل 3-34- مضاعف ضوئي

3-3- تطبيقات باستخدام العناصر الكهروضوئية:

3-3-1- مثال في التحكم الكهروضوئي : Photoelectric Control

تُستخدم عمليات التحكم الكهروضوئية في تطبيقات عديدة لتراقب، مثلاً، وجود أجزاء ما من مُنتج، أو لتكشف عن موضع هذه الأجزاء، أو لتبين مستوى سائل في خزان، أو لتدل على عملية تعداد لمنتج في عملية إنتاج... إلخ. يبين الشكل 3-35 مثالاً عن مبدّل (مفتاح) كهروضوئي (Photoelectric Switch).

تتضمن المبدلات الكهروضوئية حساسات جهدية ضوئية. تتكون من مرسل ضوئي يرسل حزمة من الضوء تصطدم بعنصر مستقبل للضوء (الحساس الجهدية الضوئية). فإذا قطعت الحزمة الضوئية بأي جسم، يتم تفعيل المبادل الكهروضوئي.



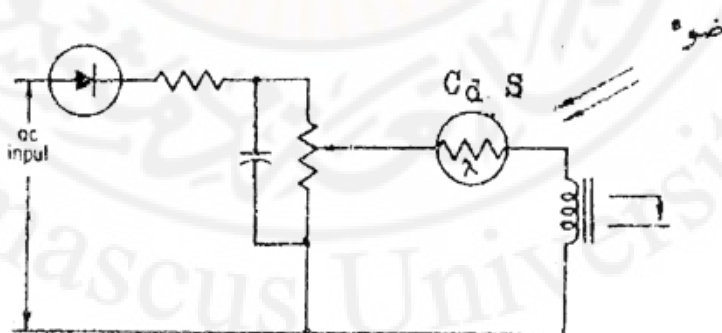
شكل 3-35- تطبيق يستخدم حساسات كهروضوئية للكشف عن وجود الغطاء واللوحة على الزجاجاة

وكما يبدو في المثال، هناك عنصرا تحسس، عنصر يتحسس لوجود غطاء الزجاجاة وعنصر يتحسس لوجود اللوحة على جسم الزجاجاة ويتم هذا الفعل عندما تختار الزجاجاة نقطة الاختبار ويحدث قطع للحزمة الضوئية. فإذا قطعت الحزمتان الضوئيتان سوية يعني هذا أن الزجاجاة تتضمن الغطاء واللوحة. وإذا كان الغطاء غير موجود فإن حزمة الضوء العليا ستصدم المستقبل الضوئي. وإذا كانت اللوحة غير موجودة فإن حزمة الضوء السفلى ستصدم المستقبل الضوئي.

ويمكن أن يكون هناك حساس كهروضوئي ثالث من أجل القيام بعملية تعداد للزجاجات التي تمر بين المرسل الضوئي والمستقبل (الكاشف) الضوئي. ويمكن إرسال الإشارات الصادرة عن هذه الحساسات الثلاثة إلى دائرة منطقية من أجل الكشف عن واقع عملية الإنتاج.

3-3-2- دائرة تشغيل حاكمة باستخدام مقاومة ضوئية:

يبين الشكل 36-3 دائرة تحتوي على حاكمة ومقاومة ضوئية تتغذى من منبع تيار مستمر بجهد متغير القيمة عن طريق المقاومة المتغيرة بحيث نجعل التيار المار في الحاكمة أقل بقليل أو بكثير من القيمة الحدية التي تكفي لتشغيل الحاكمة، وذلك في حال عدم سقوط الضوء على المقاومة الضوئية. يؤدي ازدياد الشدة الضوئية للضوء الساقط على المقاومة إلى نقص في قيمة المقاومة، وبالتالي ازدياد التيار المار في ملف الحاكمة. فإذا كانت الشدة الضوئية كبيرة بما يكفي، فإن المقاومة الضوئية تناقص إلى القيمة المناسبة لتشغيل الحاكمة. يفيد الجهد المستمر المتغير القيمة، إذًا، إلى التحكم بحساسية الدارة من أجل الاستجابة لشدة ضوئية مختلفة.



شكل 36-3- دائرة ذات مقاومة ضوئية وحاكمة

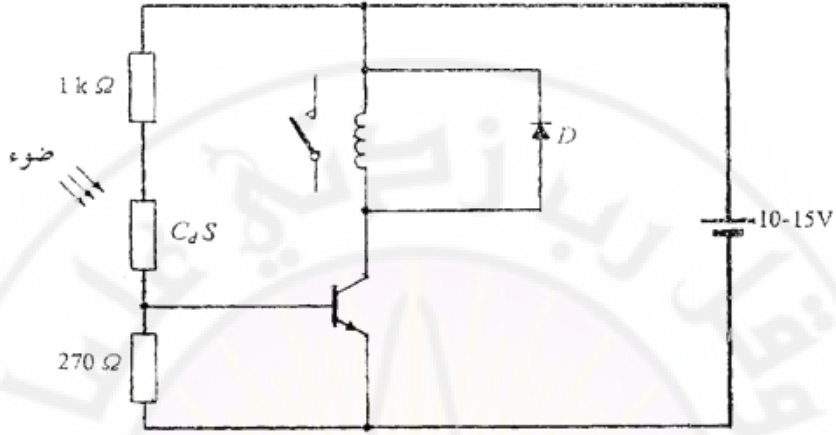
3-3-3- دارة تشغيل حاكمة باستخدام مقاومة ضوئية وترانزستور:

يبين الشكل 3-37 دارة ترانزستورية تستخدم مقاومة ضوئية من أجل التحكم في عملية قطع وتوصيل الترانزستور، وبالتالي التحكم في تشغيل حاكمة. تُوصّل المقاومة الضوئية إلى دارة استقطاب قاعدة الترانزستور، وحيث إن الشدة الضوئية تتحكم في مقدار التوصيلية لهذه الخلية الضوئية، فإن هذا يفيد في تغيير تيار القاعدة بحسب قيمة الشدة الضوئية للضوء الساقط.

في الظلام، تكون مقاومة الخلية الضوئية كبيرة جداً، ويكون، بالتالي التيار المار فيها صغيراً جداً، ويكون تيار القاعدة صغيراً أيضاً، ومنه يكون تيار المجمّع الذي يمر في ملف الحاكمة صغيراً أيضاً لا يكفي لتفعيل الحاكمة، فتبقى تماسات الحاكمة بحالة فتح، حسب الشكل، بفرض أن الحاكمة من النوع (N/O).

إن ازدياد الشدة الضوئية سيؤدي إلى ازدياد تيار القاعدة، وبالتالي ازدياد تيار المجمّع، وكذلك تيار الملف. وعند مستوى محدد من شدة الإضاءة، سيصبح تيار المجمّع وبالتالي تيار الملف ذا قيمة كافية لتغيير حالة الحاكمة، نوع (N/O)، من وضعية الفتح إلى وضعية الإغلاق.

عند انخفاض سوية الإضاءة من جديد، ستعود الحاكمة إلى الحالة الأولى. فإذا حدث هذا الهبوط في الإضاءة بصورة مفاجئة، فإنه يمكن أن تتولد قوة محرّكة كهربائية كبيرة جداً في ملف الحاكمة نتيجة للتغير المفاجئ في شدة التيار التحريضي النار في الملف، وقد يؤدي هذا الجهد التحريضي المفاجئ إلى تلف الترانزستور بسهولة. فمن أجل حماية الترانزستور من هذه الظاهرة، يوصّل ثنائي (D) على التوازي مع ملف الحاكمة، ويكون عمل هذا الثنائي هو إحداث ممر أمام التيار التحريضي عند انتقال الترانزستور المفاجئ إلى حالة القطع.



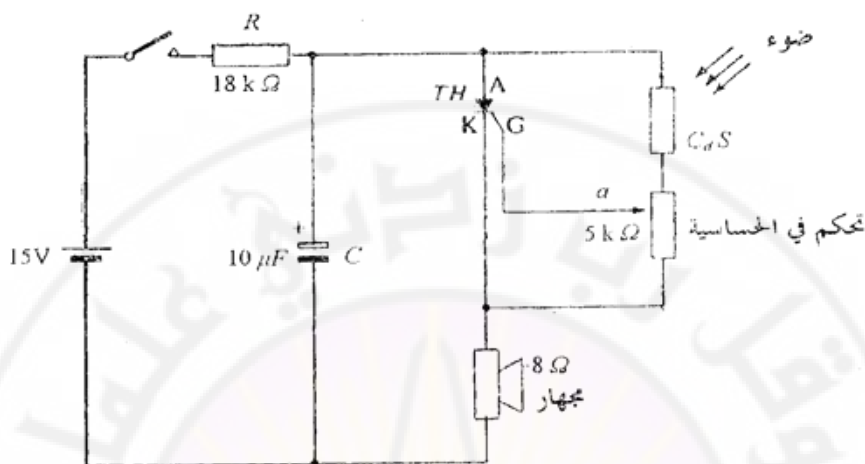
شكل 3-37- يؤدي سقوط الضوء على المقاومة
الضوئية إلى غلق الحاكمة

إن من أحد تطبيقات هذه الدارة هو نظام الكشف عن انقطاع اللهب في المراجيل، حيث يمكن اختيار مقاومة ضوئية ذات حساسية عظمى في النقطة من الصيف تقع ضمن المجال (أحمر / أصفر).

3-3-4- دارة إنذار باستخدام مقاومة ضوئية وثايرستور:

يبين الشكل 3-38 دارة تستخدم مقاومة ضوئية وثايرستور وذلك للتنبيه والإنذار عند سقوط الضوء على المقاومة الضوئية.

في الظلام، تكون قيمة المقاومة الضوئية عالية جداً، ويكون بالتالي، التيار المار فيها صغيراً جداً. ويكون جهد البوابة، وهو الجهد الذي تحدده النقطة (a) من المقاومة المتغيرة، صغيراً لا يكفي لتوصيل الثايرستور الذي يكون عندها بحالة قطع. إن المكثف يشحن ويبقى مشحوناً إلى جهد يساوي جهد المنع (15 V).



شكل 3-38- دائرة إنذار ذات مقاومة ضوئية وثايرستور
تنذر عند سقوط الضوء

يؤدي سقوط الضوء على المقاومة إلى تناقص قيمتها وتزايد التيار المار في المقاومة المتغيرة ($5\text{ k}\Omega$)، وينتج عن ذلك ارتفاع الجهد المطبق على البوابة إلى قيمة تكفي لإغلاق الثايرستور، ويصبح الثايرستور موصلاً، فتتخفص كثيراً قيمة مقاومته (المقاومة بين مصعده ومهبطه). ويؤدي توصيل الثايرستور المفاجئ إلى تفريغ المكثف بصورة دورية وذلك بعد سقوط الضوء للمرة الأولى على المقاومة الضوئية.

يتم تفريغ المكثف بمعدل سريع خلال الجهار عن طريق الثايرستور، ويسبب مرور التيار السريع إلى صدور صوت في الجهار. ويؤدي تفريغ المكثف إلى هبوط الجهد على طرفيه، ويستمر هذا الجهد بالهبوط وكذلك هبوط التيار المار بالثايرستور إلى القيمة الحدية التي يرجع عندها الثايرستور إلى حالة القطع.

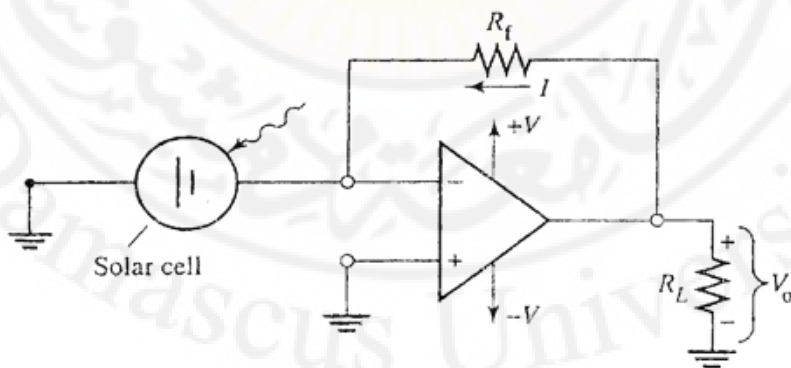
يبدأ بعد ذلك المكثف بالشحن من جديد عبر المقاومة (R) باتجاه قيمة جهد المنبع (15 V)، وعندما يصل الجهد على المكثف إلى قيمة كافية تزيد عن جهد

القطع (V_B) للثايرستور، يدخل الثايرستور ثمانية حانة التوصيل ويبدأ المكثف بالتفريغ السريع من جديد خلال الثايرستور والمجهر ليصدر بالتالي صوتاً جديداً وهكذا. نستنتج من ذلك أنه عندما تزداد شدة الإضاءة لتصل إلى مستوى معين، يبدأ المجهر بإصدار صوت متقطع.

يمكن، بواسطة المقاومة المتغيرة ($5\text{ k}\Omega$)، أن نغير من حساسية الدارة للضوء. وكذلك يمكن أن نتحكم بمعدل تكرار التقطع في الصوت بواسطة تغيير قيمة ثابت الزمن (RC).

5-3-3- مكبر إشارة خلية شمسية:

يمكن تكبير إشارات من حساسات يظهر فيها تغير في الجهد بدلاً من تغير في المقاومة. يبين الشكل 39-3 دائرة ذات خلية شمسية (خلية جهدية ضوئية) موصلة إلى دائرة مكبر عمليات. فعندما يسقط الضوء على الخلية الشمسية، سيتغير الجهد الصادر عن هذه الخلية، وسيكبر مكبر العمليات جهد الإشارة الصغير. وبالتالي، يمكن الاستفادة من هذه العناصر في الكشف عن ظاهرة فيزيائية ما.



شكل 39-3- دائرة تكبير إشارة خلية شمسية

الفصل الرابع

عناصر التحسس والمجسات وتطبيقاتها

Transducers and Applications، Sensing Elements

مقدمة [9-11-5-17].

يتم الكشف عن ظاهرة فيزيائية وتحويلها إلى نوع آخر ميكانيكي أو كهربائي حيث يؤدي هذا التحويل إلى الحصول على إشارة مفيدة يمكن استخدامها في عملية قياس مثلاً. ومن أجل عملية الكشف هذه لابد من وجود عنصر يتحسس المتغير المطلوب قياسه فيعطي إشارة تمثل مقدار هذا المتغير. يعطي هذا العنصر عدة مسميات كمبدّل، طاقة أو مجس أو عنصر تحسس أو كاشف. وهذه الأسماء مترادفة تقريباً بالرغم من وجود بعض الاختلافات الطفيفة في معانيها وسنستخدم كلمة مجس (Transducer) للدلالة على عنصر التقاط الإشارة وتحويلها.

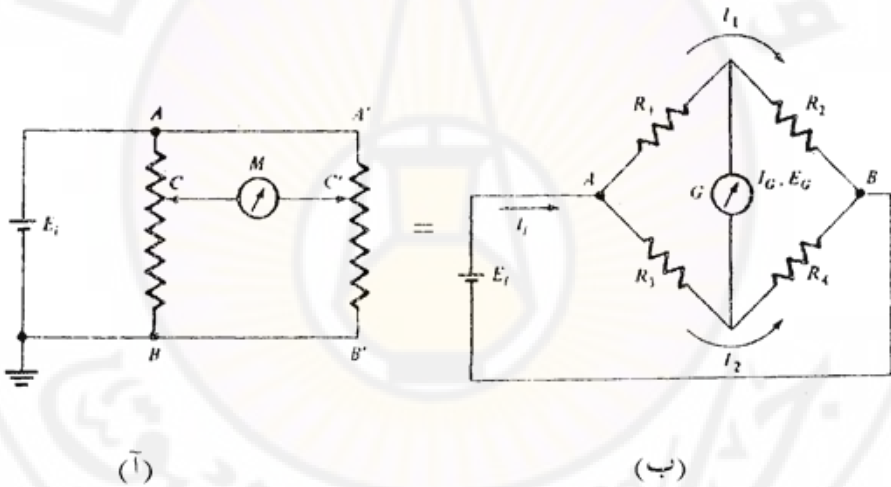
يتم في أغلب الأحيان تحويل الظاهرة الفيزيائية (درجة حرارة، ضغط، كمية تدفق، قوة، ارتفاع مستوى سائل، انقطاع أو ظهور الضوء، ... إلخ) المطبقة على مدخل المجس إلى إشارة كهربائية تظهر عند مخرجه حيث تعتبر الإشارة الكهربائية هي النوع الأسهل للتعامل معه في عمليات القياس.

4-1- المجسات ذات المقاومة الكهربائية وقياس المقاومة باستخدام جسر واتسن:

تعتمد عملية الكشف عن العديد من الظواهر غير الكهربائية على تغير المقاومة الكهربائية للمادة تحت تأثير الظاهرة المطلوب كشفها. فمن المواد ما تتغير مقاومتها

بتغير درجة الحرارة أو بتغير الضغط الواقع عليها أو بتغير شدة الضوء الساقط عليها أو بتغير طول موجة هذا الضوء.... إلخ.

ذكرنا أن المقاومة الكهربائية للمادة تتغير نتيجة تعرضها لتغير في الظواهر الفيزيائية ولتكن تغير درجة الحرارة مثلاً. يكون قياس مقاومة المادة مؤشراً لدرجة حرارة هذه المادة أو لمقدار تغيرها. يستعمل جسر واتسن من أجل عملية القياس كما يبينه الشكل 1-4 ويتألف من مجزئ جهد (مقاومة متغيرة) AB ومن مجزئ جهد آخر $\bar{B}\bar{A}$ موصولين إلى نفس المنبع E .



شكل 1-4 - جسر واتسن لقياس المقاومة المجهولة
أ- الدارة النظرية، ب- الدارة الفعلية

يتغير جهدا التماسين C و C' بدءاً من الصفر عندما يكون التماسان عند النقطتين B و B' إلى قيمة عظمى تساوي E عندما يصبحان عند النقطتين A و A' . فإذا كان الجهد عند النقطة C مساوياً إلى الجهد عند النقطة C' فإن جهاز القياس المبين لا يشير في هذه الحالة إلى مرور أي تيار بين نقطتي التماسين C و C' .

تدعى الدارة السابقة بجسر واتسن وتستعمل لقياس المقاومات وتكون، من الناحية العملية، كما يبينه الشكل 4-1-ب. وعندما يكون التيار I_g مساوياً للصفر نقول إن الجسر متوازن ويتحقق هذا الشرط عندما:

$$R_1 \times R_4 = R_2 \times R_3 \quad (4-1)$$

وبافتراض أن R_1 هي مقاومة مجهولة القيمة يراد قياسها، وبعد تحقيق حالة توازن الجسر تكون:

$$R_1 = R_2 \frac{R_3}{R_4} \quad (4-2)$$

وتبقى حالة التوازن موجودة حتى ولو أبدلنا منبع التغذية وجهاز القياس أحدهما بالآخر.

ويمكن تثبيت النسبة (R_3/R_4) بحيث تصبح مساوية إلى (0.1 أو 1 أو 10 مثلاً) وجعل R_2 مقاومة متغيرة من أجل الوصول إلى حالة توازن الجسر. تستعمل الجسور بإحدى طريقتين:

1- طريقة الجسر المتوازن وهي الطريقة التي شرحت سابقاً.

2- طريقة الانحراف.

في طريقة الانحراف، تدخل المقاومة المجهولة R_1 في الجسر ويتم توازن الجسر أولاً بتغيير R_2 ، R_3 ، R_4 حتى يصبح تيار جهاز القياس ($I_g = 0$). وبعدها فإن أي تغيير في قيمة المقاومة R_1 بمقدار ΔR_1 يؤدي إلى اختلاف توازن الجسر ومرور تيار I_g في المقياس يؤدي إلى انحراف مؤشر المقياس. يتم تدريج الجهاز عادة ليدل على

$$\text{المقدار: } \frac{\Delta R_1}{R_1} \times 100$$

إن الحصول على قياسات دقيقة بواسطة الجسر يتطلب معرفة قيم المقاومات بدقة تامة ويجب أن يكون جهاز القياس حساساً جداً ليكشف حالات عدم التوازن الضعيفة في دائرة الجسر .

يعتبر جسر واتستن والجسور الأخرى مفيدة جداً في القياسات العملية فجسر واتستن واسع الانتشار في قياس مقاومات المجسات التي تبدل المتغير الفيزيائي إلى تغير في قيمة المقاومة .

4-1-1- تغير المقاومة الكهربائية للمواد بتغير درجة الحرارة:

تزداد بصورة عامة مقاومة المعادن بازدياد درجة الحرارة، فنقول إن للمعدن معامل مقاومة حراري (α) موجب. بينما تتناقص مقاومة أنصاف النواقل والمواد العازلة بازدياد درجة الحرارة فنقول إن للمعدن معامل مقاومة حراري (α) سالب. يبين الجدول 1-4 قيم معامل المقاومة الحراري لبعض أنواع المواد عند درجة حرارة المحيط علماً أن (α) لا تبقى ثابتة بل تتناقص عادة بارتفاع درجة الحرارة. يستعمل النيكل حتى درجة حرارة (300°C) بينما تستعمل خلاط الفوسفور برونز عند درجات الحرارة المنخفضة جداً حيث تنصف هذه المواد بتغير كبير لمعامل المقاومة الحراري لها عند قيم منخفضة جداً من درجات الحرارة (-266°C).

4-1-2- مجسات درجة الحرارة ذات المقاومة المعدنية:

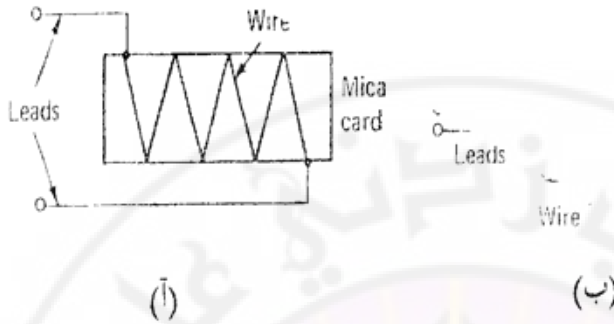
يعتبر البلاتين مهماً جداً كعنصر تحسس في مجسات درجة الحرارة ذات المقاومة (Resistance Temperature Detectors, RTD) المعدنية، حيث يعتبر كأساس في المجسات المعيارية لدرجات حرارة تقع بين (-190°C) و ($+660^{\circ}\text{C}$) لكنه يمكن أن يستعمل من أجل مجال يتراوح بين (-264°C) و ($+1000^{\circ}\text{C}$).

ويعتبر البلاتين أكثر العناصر دقة بالنسبة لجميع عناصر التحسس الحراري. فعند درجة حرارة تقارب الصفر يمكن أن تصل دقة القياس له حتى 10^{-4} درجة مئوية. وعند درجة حرارة 450 درجة مئوية تصل الدقة إلى بضعة أجزاء من مئة من الدرجة. وتكبت الدقة إلى حوالي عُشر الدرجة عند درجة حرارة 1000 درجة مئوية.

الجدول 1-4

اسم المادة	المقاومية Resistivity $\Omega.cm$	معامل المقاومة الحراري، α Resistive Temperature Coefficient / $^{\circ}C$
بلاتين	$10^{-6} \times 9.8$	$10^{-3} \times 3.92$
فضة	$10^{-6} \times 1.5$	$10^{-3} \times 4.1$
نحاس	$10^{-6} \times 1.55$	$10^{-3} \times 4.1$
نيكل	$10^{-6} \times 6.8$	$10^{-3} \times 6.8$
رصاص	$10^{-6} \times 19.3$	$10^{-3} \times 4.2$
أوكسيد معدني (تيرمستور)		$10^{-3} \times \pm(40 \text{ to } 70)$

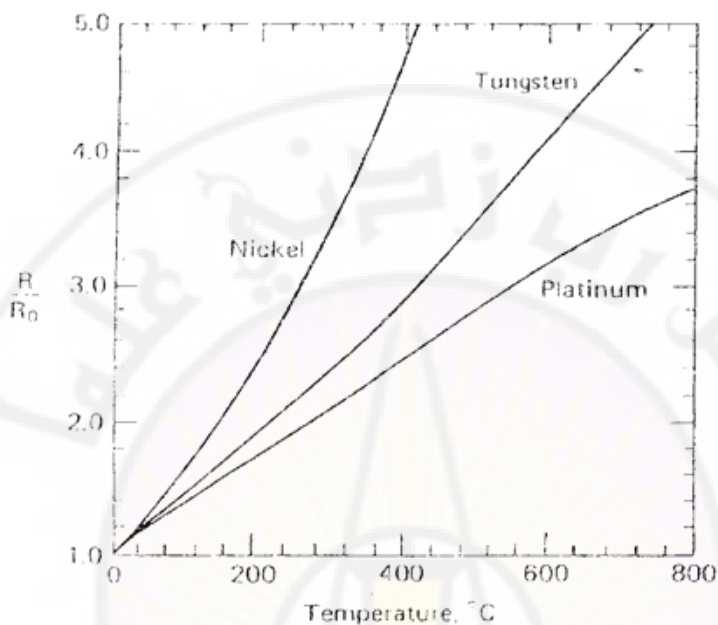
يبين الشكل 2-4 بنية مجس حراري ويكون عادة على شكل سلك رفيع من البلاتين أو النيكل أو التنغستين، منفوف على قالب من الميكا أو السيراميك أو أية مادة أخرى مقاومة للحرارة. ويبين الشكل 3-4 معطيات عن هذه المجسات الحرارية.



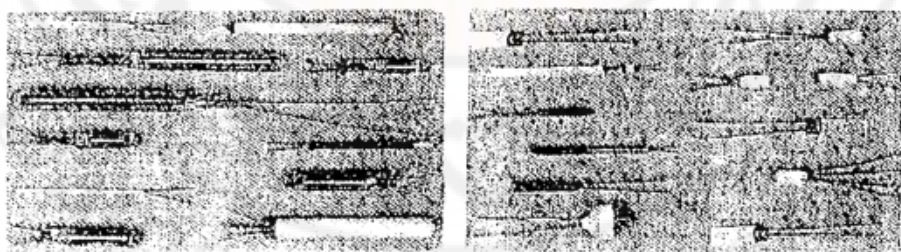
شكل 4-2- مجسات حرارية ذات مقاومة سلكية
 أ- عنصر سلكي مكشوف، ب- عنصر محمي

تتوفر عناصر التحسس الحراري، تجارياً، بأشكال متنوعة كثيرة كما يبينه الشكل 4-4. يتألف أحد الأنواع المستعملة من سنك من البلاتين عالي النقاوة (99.99 %) ملفوف حول نواة من السيراميك ومغلق عليه بإحكام ضمن كبسولة من السيراميك. يعتبر البلاتين المعدن الأفضل من أجل عمليات القياس الأكثر دقة حيث يتصف بخصائص كهربائية وميكانيكية ثابتة خلال فترات طويلة من الزمن.

إن العناصر المستعملة في الشكل (4-4- أ) هي مجسات من النوع المغمور حيث تغمر في السائل لقياس درجة حرارته. إن زمن الاستجابة في هذا النوع من القياس طويل عادة (حيث يحتاج القياس من ثانية واحدة إلى خمس ثوان للوصول إلى 100 % من درجة حرارة السائل)، كما يبدو في الشكل 4-5 الذي يبين زمن الاستجابة لمقاومات RTD من البلاتين ذات سلك ملفوف وذات غشاء ثخين مغمورة في سائل ذي درجة حرارة (T) . إن زمن الاستجابة هذا، الطويل نسبياً، للمقاييس الحرارية ذات النوع المغمور ليس بقضية ذات أهمية نظراً لأن معدل التغير في درجات حرارة السائل صغير في معظم العمليات.



شكل 4-3- معطيات حساس مقاومة حراري



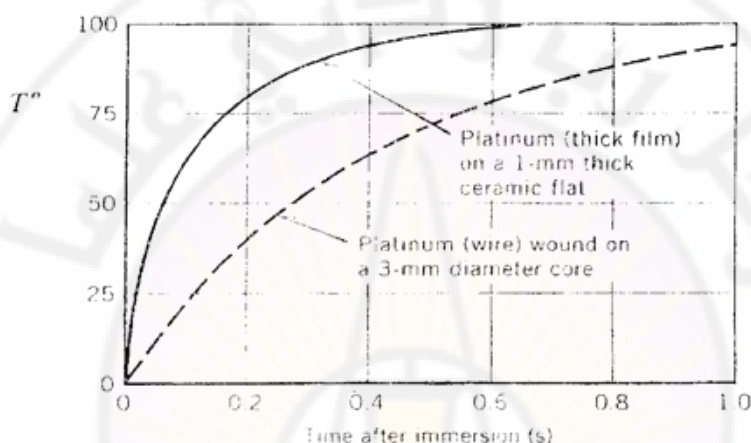
(أ)

(ب)

شكل 4-4- مجسات درجة الحرارة ذات المقاومة (RTD)

أ- نوع الملف السلكي، ب- نوع الغشاء الرقيق

تُصنع مجسات درجة الحرارة ذات المقاومة (RTD) أيضاً باستخدام تقانات الغشاء الرقيق أو الغشاء الثخين. في كلا هاتين الطريقتين، يوضع غشاء من البلاتين على شريحة من السيراميك رقيقة ومسطحة، وتُغلف بطبقة من الزجاج أو السيراميك.

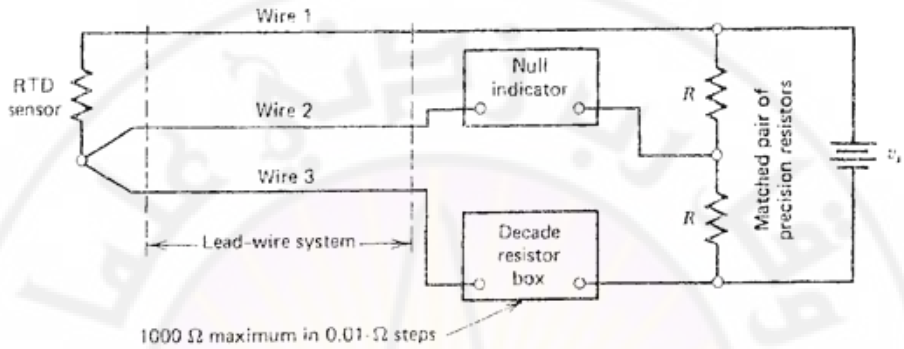


شكل 4-5- زمن الاستجابة لمقاومات RTD من البلاتين ذات سلك ملفوف
و ذات غشاء ثخين مغمورة في سائل ذي درجة حرارة (T)

تسمح طريقتا التصنيع ذات الغشاء الرقيق والغشاء الثخين بالحصول على مقاومة (100 Ω) عادة للعنصر الحساس المركب على الشريحة بحجم وكتلة أصغر. وكنتيجة لذلك، ينقص زمن الاستجابة للعنصر ذي الغشاء بشكل ملحوظ كما يبينه الشكل 4-5. ويوضع العنصر الحساس عادة ضمن كبسولة مغلقة خُمائته من تأثيرات التآكل للوسط الذي تجري فيه عملية القياس، وكذلك لحماية الوصلة بين العنصر الحساس وأسلاك التوصيل الضعيفة الداخلية.

إن الخرج من مجس درجة حرارة ذي المقاومة (RTD) هو تغير في المقاومة ($\Delta R/R$) يمكن مراقبته بطريقة مناسبة باستخدام جسر واتسن كما يبينه الشكل 4-6.

يركب الجس في أحد أذرع الجسر، ويركب صندوق مقاومات مقروءة عشرياً في الذراع المجاور، وتوجد في الذراعين الآخرين للجسر مقاومتان دقيقتان متوافقتان.



شكل 6-4- دائرة جسر واتسن ذات تعادل حراري لأسلاك التوصيل

يجب الانتباه إلى تأثير أسلاك التوصيل على دقة القياس، حيث إن أي تغير في مقاومة الأسلاك سيؤدي إلى حدوث خطأ في القياس. إن الترتيب المبين للأسلاك الثلاثة في الشكل 6-4 يفيد في إلغاء تأثير أي تغير في المقاومة ناتج عن تغير في درجة الحرارة. يمكن إجراء التوازن للجسر واتسن (الشكل 6-4) بواسطة ضبط صندوق المقاومة العشري. في حالة وضع المؤشر الصفري (حالة التوازن)، تكون القراءة على صندوق المقاومات مساوية تماماً إلى قيمة المقاومة الحرارية (RTD). تحدد درجة الحرارة، حينئذ، من جدول يبين العلاقة بين المقاومة الحرارية (RTD) ودرجة حرارتها. يجب الانتباه إلى مقدار القدرة الكهربائية المقدمة للجسر وتجنب أية تيارات كبيرة في عنصر التحسس والتي تؤدي إلى خطأ نتيجة التسخين الذاتي للعنصر. يحدث التسخين الذاتي للحساس بسبب القدرة التي يجب تصريفها بواسطة الحساس. وتعطى هذه القدرة بالتعبير التالي:

$$P_T = i^2 R_T \quad (4-3)$$

على سبيل المثال، تكون القدرة (P_T) المصروفة بواسطة مقاومة (RTD) موضوعة في جسر واتسن ذي مقاومات (R_T) متساوية في كل من الأذرع الأربعة ويغذى بجهد تغذية (v_s):

$$P_T = \frac{v_s^2}{4R_T} \quad (4-4)$$

إذا كان (ΔT_{Sh}) هو التزايد في درجة الحرارة الناتج عن التسخين الذاتي لتصريف القدرة (P_T) يكون:

$$\Delta T_{Sh} = F_{Sh} P_T \quad (4-5)$$

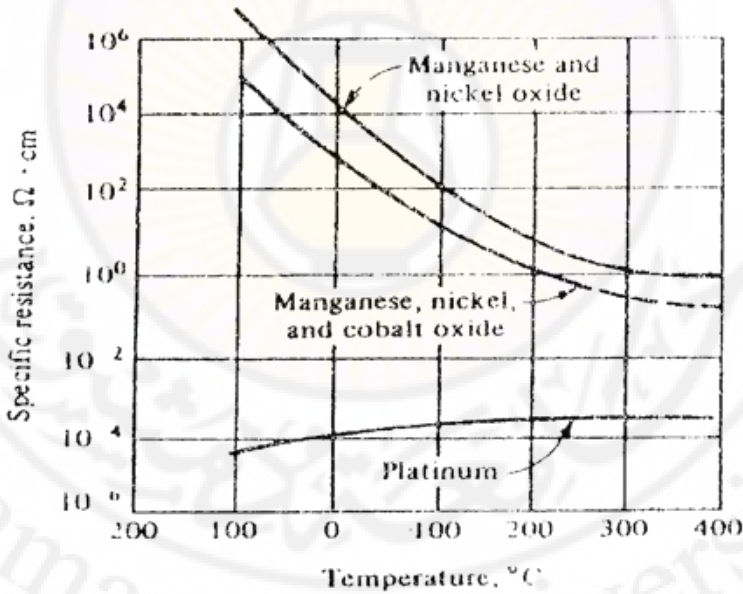
حيث: (F_{Sh}) هو عامل التسخين الذاتي (Self-heating factor, $^{\circ}\text{C} / \text{mW}$). إن المقدار (F_{Sh}) تقدمه الجهة المصنعة لعنصر التحسس. ويتعلق هذا المقدار بنقل الحرارة من العنصر الحساس إلى الخيط. ومن الواضح أنه يتناقض مع تزايد إما مساحة العنصر الحساس أو معامل النقل الحراري.

يأخذ (F_{Sh}) قيمة نموذجية هي ($0.5^{\circ}\text{C} / \text{mW}$) من أجل مقاومة (RTD) ذات سلك ملفوف من البلاتين موجودة في الهواء الساكن. إذا وضع هذا العنصر ($R_T = 100 \Omega$) في جسر له نفس القيمة في باقي الأذرع، وكان جهد التغذية (1 V_{dc})، تكون القدرة ($P_T = 2.5 \text{ mW}$)، وتكون ($\Delta T_{Sh} = 1.25^{\circ}\text{C}$). وهكذا سيحدث خطأ في قياس درجة الحرارة مقداره (1.25°C) ما لم نجر تصحيحاً لمعادلة تأثير التسخين الذاتي.

4-3-1- Thermistor: الثيرمستور

هو مقاومة حساسة لتغيرات درجة الحرارة وتصنع من بعض المواد مثل أكاسيد أو سينيكاك أو كبريتات لعناصر (النيكل، النحاس، الرصاص، الألومنيوم). حيث إن معامل المقاومة الحراري (α) لهذه المواد هو أكبر بعدة مرات من معامل المقاومة الحراري للمعادن وتسمى العناصر المستعملة من هذه المواد بالثيرمستور (Thermistor).

يبين الشكل 7-4 مقارنة بين خواص الثيرمستور والبلاتين حيث يبدو أنه من أجل تغير في درجة الحرارة من صفر إلى 300 درجة مئوية تنقص مقاومة الثيرمستور بحدود 1000 مرة بينما تزيد مقاومة البلاتين بحدود مرتين.

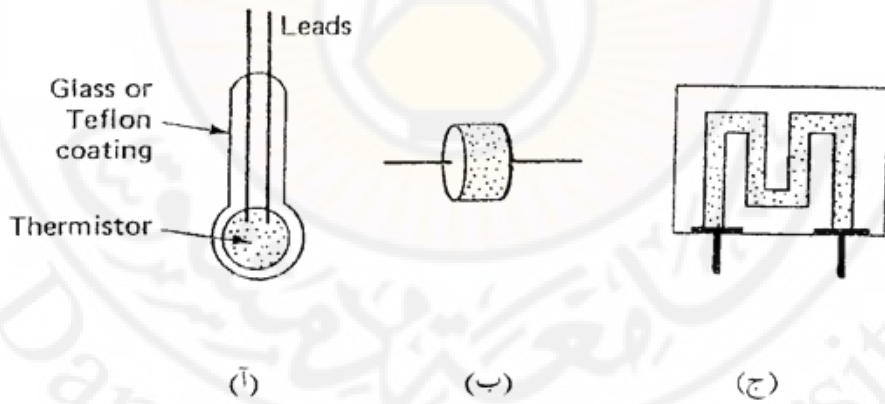


شكل 7-4 - مقارنة بين خواص الثيرمستور والبلاتين

يمتاز الثيرمستور عن مقاييس الحرارة (Thermometers) ذات المقاومة المعدنية بارتفاع معامل المقاومة الحراري (α) له وهو ذو حجم صغير يسهل إجراء

عملية القياس في النقاط ذات التركيز الحراري. ويمكن الحصول منه على قيم مقاومة عالية تفيد في التغلب على أثر تغير مقاومة أسلاك التوصيل ومقاومات التماس. وبحسب نوع المادة التي يتركب منها الثيرمستور يمكن أن تأخذ المقاومة النوعية قيماً بحدود $(10^{-1} - 10^9 \Omega.cm)$.

وعند استخدام ثيرمستورات لقياس درجات الحرارة، تكون الأخطاء الناتجة من تأثير أسلاك التوصيل صغيرة بما فيه الكفاية بحيث يمكن إهمالها حتى في حال استخدام أسلاك توصيل طويلة. إن حساسية الثيرمستورات كبيرة، لذلك فإن التغير في المقاومة (ΔR_T) الناتج عن تغير درجة الحرارة هو أكبر بكثير من التغير الصغير في مقاومة الأسلاك الناتج عن تغير درجة الحرارة. وكذلك فإن مقاومة الثيرمستورات كبيرة جداً بالمقارنة مع مقاومة أسلاك التوصيل $(R_T / R_L \approx 1000)$ ، وبالنسبة فإن أي انخفاض في دقة القياس، بسبب مقاومة سلك التوصيل، يكون مهماً.

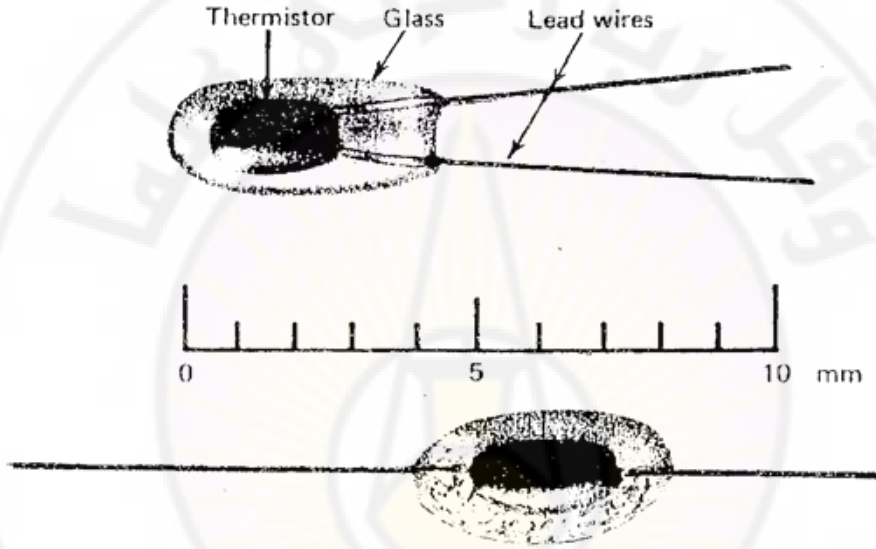


شكل 4-8- أشكال مختلفة من الثيرمستور

أ- كرتة مغلقة، ب- قرص، ج- غشاء

يمكن أن تأخذ بنية الثيرمستور أشكالاً مختلفة (حبيبية أو كرتة مغلقة، أو قرص، أو غشاء...) يوصل إليها سلكان خارجيان كما يبدو في الشكل 4-8.

ويمكن أن تتوفر أشكال من الثيرمستور تبدو كحبيبات ذات أقطار تبلغ بحدود (0.125–1.5 mm) كما يبينه الشكل 9-4. تتعدد بذلك أشكال الثيرمستور من أجل الحصول على عناصر تناسب مجالاً واسعاً من التطبيقات.

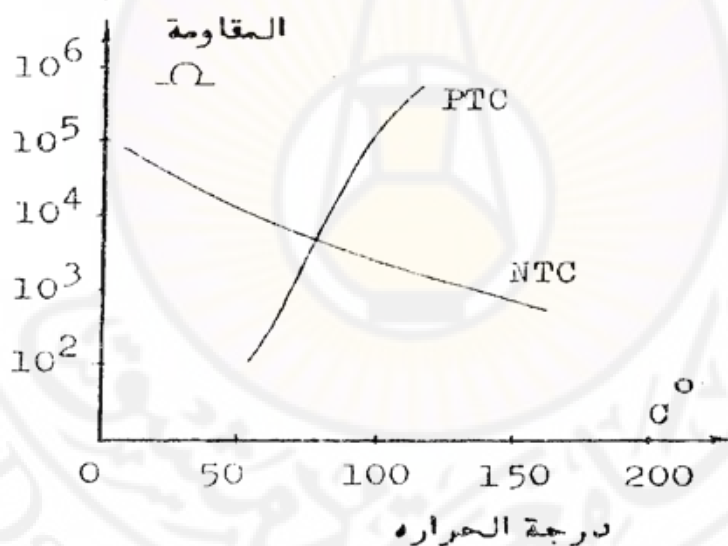


شكل 9-4- ثيرمستورات خيصة الشكل

تختلف سرعة استجابة الثيرمستور لتغير درجة الحرارة بحسب نوع المادة المصنوع منها. فحتى يصل إلى 63% من قيمة المقاومة عند الحالة المستقرة لها بعد تعرضه لدرجة الحرارة الجديدة تحتاج الأنواع التجارية منه إلى زمن بحدود (1-200 Sec). تتوفر تجارياً أنواع عديدة جداً من الثيرمستورات ذات مقاومات (عند درجة الحرارة المرجعية، T_0) تتراوح من بضعة أومات إلى عدة ميغا أوم. وعندما نختار ثيرمستوراً من أجل تطبيق محدد، يجب أن تكون القيمة الدنيا للمقاومة عند درجة الحرارة العظمى كافية لتجنب التحميل الزائد على جهاز القراءة. وبالمثل، يجب ألا

تكون القيمة العظمى للمقاومة عند درجة الحرارة الدنيا عالية جداً بحيث يصبح الضعيف مشكلة كبيرة.

تتصف بعض أنواع الثيرمستور بأن مقاومتها تنقص مع ارتفاع درجة الحرارة (أي تزداد توصيليتها مع ارتفاع درجة الحرارة) ويسمى هذا النوع (NTC) أي الثيرمستور ذو معامل المقاومة الحراري السالب. أما النوع الآخر فإنه يتصف بأن مقاومته تزداد مع ارتفاع درجة الحرارة ويسمى هذا النوع بالثيرمستور ذي معامل المقاومة الحراري الموجب (PTC). يبين الشكل 10-4 منحنيات الخواص لكلا النوعين.



شكل 10-4 - خواص الثيرمستور نوع NTC ونوع PTC

تستخدم عادة ثيرمستورات ذات مقاومة ($R_0 = 3000 \Omega$) تتغير، من أجل المجال الكامل من تغير درجة الحرارة، من قيمة منخفضة بحدود (2000Ω) إلى قيمة مرتفعة بحدود (5000Ω).

وتستخدم الثيرمستورات لقياس درجات الحرارة ابتداء من بضعة درجات فوق درجة الصفر المطلق إلى حوالي ($600\text{ }^{\circ}\text{F}$, $315\text{ }^{\circ}\text{C}$). ويمكن استخدامها عند درجات حرارة أعلى إلا أن استقرارها أو ثبات عملها يبدأ بالتناقص بشكل ملحوظ فوق هذا الحد. ويحدد، عادة، مجال عمل الثيرمستور بحدود ($100\text{ }^{\circ}\text{C}$). ويمكن أن تصل الدقة في الأنواع الجيدة حتى ($0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$).

4-1-4- تطبيقات عن تغير المقاومة بتغير درجة الحرارة:

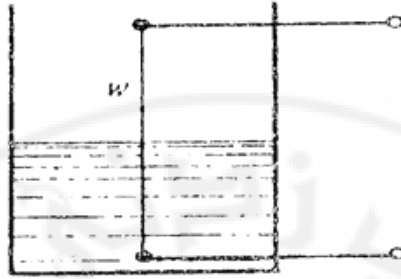
1- قياس ارتفاع مستوى سائل (غاز النتروجين المميع)^[7]:

يعتبر تغير المقاومة بتغير درجة الحرارة أساس عدد كبير من عناصر التحسس أو الكشف. يبين الشكل 4-11 عنصر تحسس لقياس ارتفاع مستوى سائل حيث يشد سلك معدني عمودياً في وعاء مملوء جزئياً بالسائل ويتم تسخين السلك بتيار كهربائي ثابت القيمة.

إن انتقال الحرارة من السلك إلى السائل يتم بشكل أسرع من انتقالها من السلك إلى الهواء. وبالتالي فإن جزء السلك المغمور في السائل سيكون أكثر برودة وستنقص مقاومته بالتالي عما إذا كان غير مغمور في السائل. أي أنه كلما تناقص ارتفاع مستوى السائل ازدادت المقاومة الكلية للسلك.

تستعمل هذه الطريقة لقياس ارتفاع مستوى سائل غاز النتروجين المميع حيث يمكن أن تصل الدقة في تحديد المستوى إلى (2.5 mm).

يمكن زيادة حساسية القياس بإنقاص قطر السلك حيث يستعمل سلك من البلاتين يصل قطره حتى ($10\text{ }\mu\text{m}$) ويمكن أن يكون تدريج الجهاز خطياً تقريباً إذا كانت درجة حرارة السائل كدرجة حرارة البخار الذي يغلو.



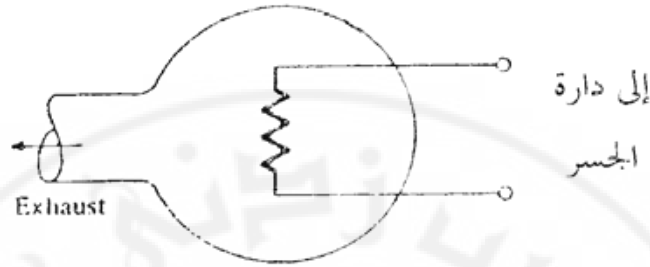
شكل 4-11-- كشف ارتفاع مستوى سائل

2- قياس ضغط منخفض جداً 17.51° :

يمكن بالاعتماد على تغير المقاومة بتغير درجة الحرارة قياس ضغط منخفض جداً لنظام مفرغ ويسمى الجهاز هذا بقياس بيراني (Pirani) ويتألف كما يبدو من الشكل 4-12 من سلك رفيع يتراوح قطره بحدود (0.025 mm) مركب في أنبوب زجاجي أو معدني. يوصل الأنبوب إلى النظام المفرغ ويسخن السلك إلى درجة حرارة تتراوح بين $(100^\circ C)$ و $(400^\circ C)$ ويتم التبريد نتيجة للتوصيل الحراري خلال الغاز الذي يحيط بالسلك.

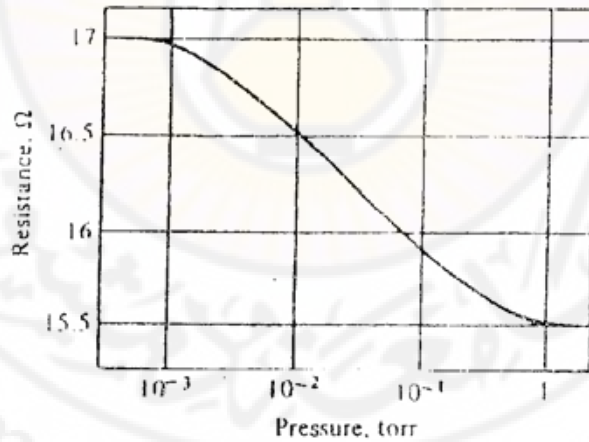
عند الضغط الجوي لا تعتمد التوصيلية الحرارية (Thermal Conductivity) للغاز على ضغطه. لكن عندما ينخفض الضغط حتى يصل إلى حوالي (10 mm Hg) يبدأ التوصيل الحراري للغاز عندئذ بالانخفاض مع استمرار نقصان الضغط.

إن ذرات الغاز التي تصطدم بالسلك الساخن تنقل الطاقة الحرارية من السلك إلى جدران الوعاء. ستأثر درجة حرارة السلك بالتالي بمتوسط عدد الذرات المصطدمة به، ومنه فإن انخفاض ضغط الغاز سينقص من سرعة فقدان السلك لحرارته بسبب تناقص عدد الذرات المصطدمة به والناقلة للحرارة مما يؤدي ذلك إلى ارتفاع درجة حرارة السلك و بالتالي ارتفاع مقاومته.



شكل 4-12 - مقياس يراي

يوصّل مقياس يراي عادة إلى جسر واطستن، ويوازن الجسر من أجل ضغط محدد. انحل المقياس. يؤدي حدوث تغير ما في الضغط إلى تخلخل توازن الجسر فيتحرك مؤشر جهاز الجهد الكهربائي الخاص بالجسر.

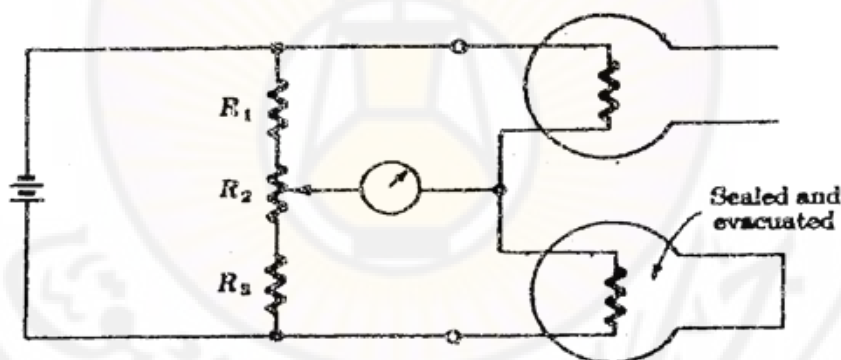


$$1 \text{ Torr} = 1 \text{ millimeter of Mercury} = 1 \text{ mm Hg} \\ = 1333.22 \text{ microbar}$$

شكل 4-13 - منحنى الخواص لمقياس يراي

يبين الشكل 4-13 العلاقة بين تغير الضغط وتغير المقاومة لأحد أنواع المقاييس. وحيث إن التوصيلية الحرارية تختلف من غاز لآخر فسيختلف شكل منحنى الخواص عندئذ بين غاز وآخر. إلا أنه يمكن في حال عدم وجود الهيدروجين والهيليوم إهمال هذه الفروق في منحنيات الخواص.

يقيس جهاز بيراني الضغط الكلي أي مجموع ضغوط جزيئات الغازات أو الأبخرة الموجودة. ومجال القياس عادة هو بحدود $(10^{-3} - 1 \text{ mm Hg})$. وإن تغير المقاومة هو بحدود 10% من المجال الكلي وهي بحدود $(15 - 17 \Omega)$. تختلف سرعة استجابة الجهاز من عدة ثواني إلى عدة دقائق ويجب ألا يستعمل الجهاز لغازات يمكن أن تتفاعل مع السلك الحار.



شكل 4-14 - طريقة لمعادلة تأثير تغير درجة حرارة المحيط على دقة القياس

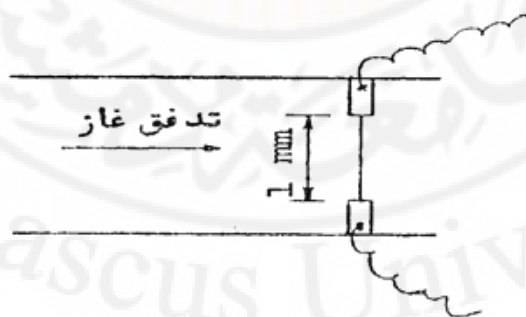
يمكن أن تتأثر المقاومات الحرارية من السلك أيضاً بدرجة حرارة المحيط لذلك يمكن وضع جهازي بيراني في دائرة جسر واتستن كما يبينه الشكل 4-14 وذلك من أجل معادلة أي تغيرات ممكنة في درجة حرارة المحيط. يوصل أحد الجهازين إلى حجرة الضغط المنخفض أما الثاني فيغلق بعد تفريغه. ويوضع الاثنان في نفس الظروف

اخريطة. ويمكن بعد ذلك موازنة الجسر بواسطة المقاومة (R_2) والبدء بتخفيض الضغط وملاحظة انحراف مؤشر جهاز القياس للدلالة بالتالي على مقدار تغير المقاومة أو مقدار تغير الضغط.

4- قياس سرعة تدفق غاز^[7]:

حيث إن معادل تبريد السلك المسخن يعتمد على سرعة التدفق (v) للمادة اخريطة به بالإضافة إلى عوامل أخرى متعددة فبالتالي يمكن الاستفادة من هذه الخاصية لقياس سرعة تدفق غاز والحصول على مايسمى مقياس (Anemometer).
يبين الشكل 4-15 مثلاً لمجس حراري لقياس سرعة تدفق غاز. يتألف المجس من سلك معدني دقيق من النيكل أو البلاتين أو التنغستين ممسوك بين قطبين ومعرض لتدفق الغاز.

يعتمد معدل الفقد الحراري وبالتالي تغير المقاومة عنى ($\sqrt{v}$) تقريباً. ويمكن لهذا النظام أن يقيس التدفق اللحظي للغاز وأن يستجيب أيضاً للتغيرات السريعة في التدفق تصل حتى (10.000 Hz). يمتد مجال القياس من (5 cm/sec) وحتى انجبال في السمعي.

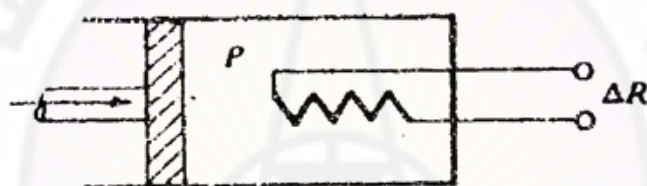


شكل 4-15 - مجس لقياس سرعة تدفق الغاز

4-1-5- تغير المقاومة الكهربائية للمادة بتغير الضغط (مجس Bridgman)^[7]:

يمكن الاستفادة من تغير مقاومة المادة بتغير الضغط الواقع عليها والحصول على مجس الضغط ذي المقاومة (Resistive Pressure Transducer).

إذا عُرض سلك لضغط خارجي متزايد مطبق عليه من كل الجوانب كما هو مبين في الشكل 4-16 فإن مقاومته الكهربائية ستتغير. تزداد المقاومة في بعض المعادن بارتفاع الضغط وتتناقص في بعضها الآخر أولاً ثم تزداد عند ضغوط مرتفعة.



شكل 4-16 - مجس ضغط نوع Bridgman

من أجل معادن متعددة ومن أجل مجال محدود من تغيرات الضغط فإن المقاومة (R_0) عند الضغط الجوي تتغير إلى المقاومة (R) عندما يتعرض السلك إلى تغير في الضغط مقدار (ΔP) بحسب العلاقة التالية:

$$R = R_0 (1 + b \cdot \Delta P) \quad (4-6)$$

حيث (b) هو معامل الضغط للمقاومة للمادة المعنية. ويبين الجدول 4-2 قيم المعامل b لعدة مواد مختلفة.

تعتبر مجسات الضغط من نوع Bridgman مناسبة من أجل الضغوط العالية جداً حتى قيم تبلغ (20.000 kg/cm^2) .

إن تغير المقاومة من أجل مادة Manganin مثلاً يبلغ (2.3%) من أجل تغير في الضغط يبلغ (10.000 kg/cm^2) . وإن $[\Delta R/R = f(P)]$ للعديد من المعادن وهي خطية تقريباً بينما هي غير خطية للبعض الآخر من المعادن مثل: Bismuth, Sodium , Rubidium

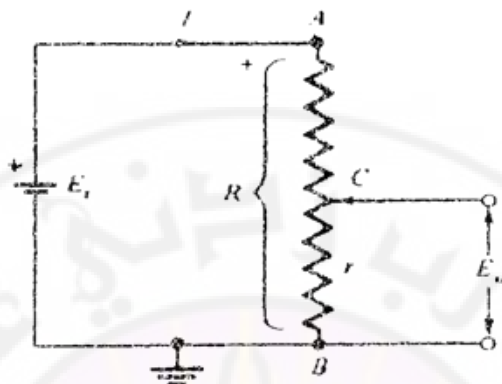
إن من مميزات الجس نوع Bridgman بالنسبة لأي مقياس ميكانيكي آخر هي متانته الميكانيكية وبساطته.

الجدول 2-4

المادة	معامل الضغط <i>b</i> . Pressure Coefficient (cm^2 / kg)
Bismuth	21.4×10^{-6}
Copper	$- 1.8 \times 10^{-6}$
Iron	$- 2.3 \times 10^{-6}$
Lithium	7.72×10^{-6}
Rubidium	$- 155 \times 10^{-6}$
Manganin	2.3×10^{-6}

4-1-6- مجزئات الجهد (المقاومة المتغيرة، عنصر كشف إزاحات ميكانيكية):

يبين الشكل 17-4 منبع تغذية E ثابت القيمة موصل إلى مقاومة متغيرة R بحيث يطبق كل الجهد بين النقطتين A و B .



شكل 4-17 - دائرة مجزئ أساسية

إذا كانت النقطة B موصلة إلى الأرض فإن جهدها يعطى قيمة الصفر اصطلاحاً ويزداد الجهد كلما ابتعدنا عن النقطة B باتجاه النقطة A . أما جهد النقطة C فإنه يساوي إلى E_0 :

$$E_0 = \frac{r}{R} E \quad (4-7)$$

أي أن جهد الخرج يعتمد فقط على جهد الدخل وعلى مكان النقطة C وذلك في حال كون مقاومة الحمل R_L كبيرة جداً أمام المقاومة r وإلا فإنه يجب إدخال مقاومة الحمل R_L في الحساب على التفرع مع المقاومة r . إذا نظرنا إلى الدارة من جهة المخرج من أجل حساب مقاومة المخرج بين النقطتين B و C ، فإننا نشاهد الدارة المبينة في الشكل 4-18 التي تكافئ الدارة السابقة.

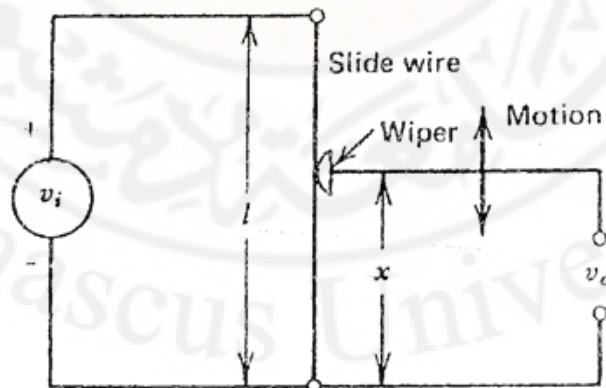
تظهر المقاومتان (r) و $(R \parallel r)$ مربوطين على التوازي مع بعضهما، وتكون مقاومة المخرج وهي المقاومة المكافئة لهما مساوية إلى:

$$R_0 = \frac{(R-r)r}{(R-r)+r} = \frac{(R-r)r}{R} \quad (4-8)$$



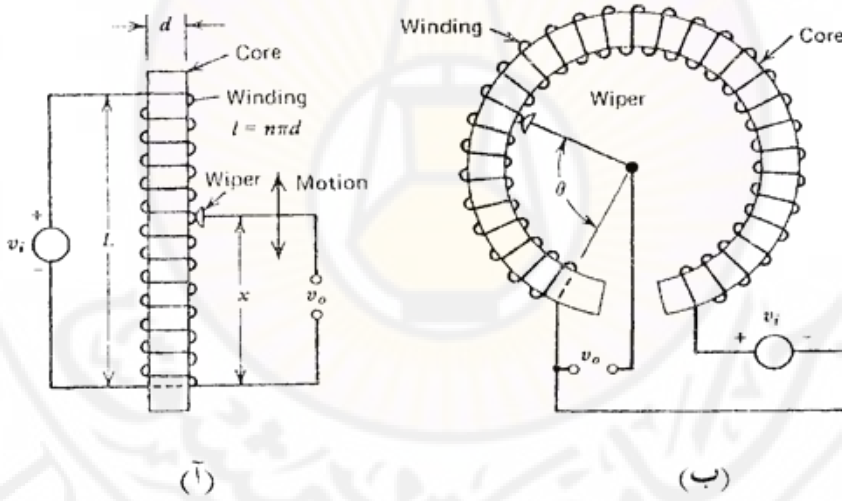
شكل 4-18- الدارة المكافئة

وهذا يبين أنه عندما تكون: $(r = 0)$ أو $(R = r)$ أي أنه عندما تكون النقطة (C) عند النقطة (B) أو عند النقطة (A) تكون ممانعة الخرج صفراً. فعندما تتحرك النقطة (C) من (B) باتجاه (A) فإن مقاومة الخرج تزداد أولاً ثم تصل إلى قيمة عظمى تساوي $(R/4)$ من أجل $(r = R/2)$ ثم تتناقص إلى الصفر ثانية. في بعض التطبيقات، يعتبر التغير في مقاومة الخرج عيباً غير مرغوب به وعندها يجب استعمال أنواع أخرى من المجزئات.



شكل 4-19- مجزئ جهد سلبي

يمكن اعتبار المقاومة المتغيرة ككاشف وهي عنصر تحسس شائع الاستعمال. يصنع هذا الكاشف من نقطة تماس تتحرك على سلك شكل 4-19 أو على ملف من سلك وبحيث تكون الحركة مستقيمة أو دائرية شكل 4-20. وقد يكون هذا الكاشف نقطة تماس تتلقى على طبقة فحمية بحركة مستقيمة أو حركة دائرية. وبهذا يمكن أن يحول هذا الكاشف الإزاحة المستقيمة أو الإزاحة الزاوية إلى إشارة كهربائية. وقد تكون هذه الإزاحة ناتجة عن قوة أو عن ضغط. إن هذا الكاشف يفيد إذن في قياسات الضغط والقوة.



شكل 4-20- مجزئ جهد من ملف سلكي
أ- لقياس الإزاحة المستقيمة، ب- لقياس الإزاحة الزاوية

مة مجزئ الجهد ذي الملف السلكي يمكن أن تتراوح بين (10Ω) وهذا يعتمد على نوع السلك المستعمل وقطره وعنى طول الملف.

وتتزايد هذه المقاومة بطريقة تدرجية عندما تتحرك المترلقة من لفة ما إلى اللفة المجاورة. إن هذا التغير التدرجي في المقاومة يُحد من خاصية التمييزية (Resolution) للمجزي إلى القيمة (L/n) حيث (L) هو طول الملف و (n) عدد اللفات. إن مجال المجزي يُخضع للطول الفعال (L) للملف. وتتوفر مجزئات خطية بطول يصل حتى بحدود (1 m) . أما مجال مجزي الجهد ذي الإزاحة الزاوية فإنه يمكن أن يُمدد يجعل الملف يأخذ شكلاً لولبياً. تتوفر مجزئات جهد لولبية بخلقات عديدة (20 حلقة مثلاً)، فيكون مقدار الإزاحات الزاوية التي يمكن قياسها بسهولة مساوياً إلى:

$$20 \times 360 = 7200 \text{ deg.}$$

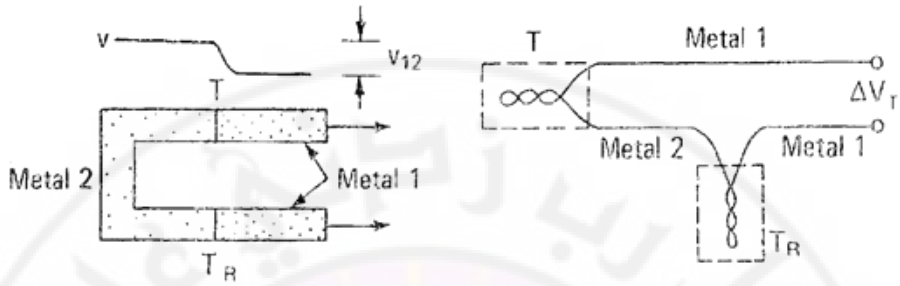
ومن أجل تحسين التمييزية، يمكن أن يكون مجزي الجهد ذا غشاء رقيق على طبقة عازلة بدلاً من النوع ذي الملف السنكي. على سبيل المثال، يمكن استعمال أغشية بلاستيكية موصلة ذات مقاومة بحدود $(50 - 100 \Omega / \text{mm})$ تستعمل بمجزئات الجهد والحصول على تمييزية (0.001 mm) .

تستخدم مجزئات الجهد عادة لقياس الإزاحات الكبيرة (10 mm) أو أكثر للحركة الخطية و (15 deg) أو أكثر للحركة الزاوية.

7-1-4- المزدوجات الحرارية Thermocouples^{[10]-[11]}:

أ- المزدوجة الحرارية المعدنية:

المزدوجة الحرارية هي عنصر حساس لدرجة الحرارة وتُصنع من موصلين غير متماثلين يكونان على تماس حراري وكهربائي، وعادة ما يكونان سلكين معدنيين. وعند تسخين الوصلة ينتج جهد كهروحراري صغير يزداد خطياً تقريباً مع درجة حرارة الوصلة. وفي الواقع يكون هناك وصلتان، وصلة القياس ووصلة مرجعية كما يبينه الشكل 21-4.



شكل 21-4 - وصلات مزدوجة حرارية

أ- المخطط الكهربي

ب- ترتيب مرجعي للقياس

عند أية وصلة بين معدنين، يوجد فرق كمون (v_{12}) كنتيجة لفروقات في التركيز الفعال للإلكترونات في المعدنين. تعرف هذه الظاهرة الكهروحرارية بتأثير سيبيك (*Seebeck Effect*).

من الواضح أن الوصلتين في الشكل 21-4 موصلتان إلى الدارة بقطبيات متعاكسة. وعندما تكون الوصلتان بنفس درجة الحرارة، فإن كموني الوصلتين يلغيان بعضهما:

$$(\Delta V_T = v_{12} - v_{21} = 0)$$

إلا أنه من جهة أخرى، يمكن أن تأخذ (ΔV_T) قيمة موجبة أو سالبة، ويعتمد هذا على فيما إذا كانت T أكبر أو أصغر من T_R . في المخابر الفيزيائية تستعمل درجة الحرارة صفر (0°C) غالباً كدرجة حرارة مرجعية.

تتضمن تركيبات المزدوجات الحرارية الشائعة المواد التالية:

Iron/Constanan	حديد/كونستانان
Chromel/Alumel	كرومل/ألومل
Chromel/ Constanan	كرومل / كونستانان
Copper/Constanan	نحاس/كونستانان
Platinum/Platinum-Rhodium	بلاتين/بلاتين-روديوم

ويبين الجدول 3-4 الحساسيات الكهروحرارية ($\mu V/C^0$) لعدد من المواد المختلفة المتصلة مع البلاتين.

إن المعطيات التي يقدمها الجدول 3-4 يمكن استخدامها لتحديد حساسية أية وصلة مزدوجة حرارية. ملاحظة، مثلاً، أن:

$$S_{\text{Chromel/Alumel}} = S_{\text{Chromel/Platinum}} - S_{\text{Alumel/Platinum}} \quad (4-9)$$

$$= + 25.8 - (- 13.6) = 39.4 \mu V/C^0$$

يبين الشكل 4-22 توضيحاً آخر لدائرة مزدوجة حرارية، ونكتب من الدائرة قيمة جهد الخرج (v_0) ويتعلق بدرجة حرارة كل وصلة وفق المعادلة التالية:

$$v_0 = S_{A/B} (T_1 - T_2) \quad (4-10)$$

حيث:

$S_{A/B}$ - هي حساسية تركيبة المادتين A و B

T_1 - هي درجة الحرارة عند الوصلة 1

T_2 - هي درجة الحرارة عند الوصلة 2

الجدول 3-4

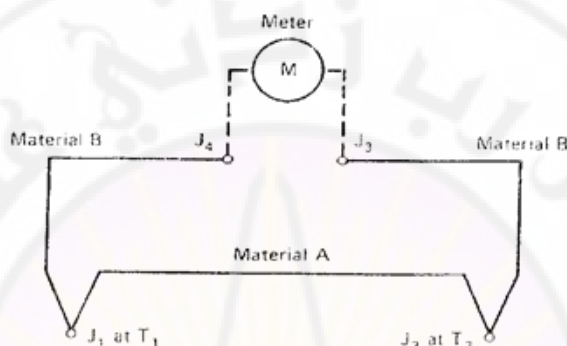
المادة	الحساسية ($\mu V/C^0$)	المادة	الحساسية ($\mu V/C^0$)
Constantan	- 35	Copper	+ 6.5
Nickel	- 15	Gold	+ 6.5
Alumel	- 13.6	Tungsten	+ 7.5
Carbon	+ 3	Iron	+ 18.5
Aluminum	+ 3.5	Chromel	+ 25.8
Silver	+ 6.5	Silicon	+ 440

من الناحية العملية، تكون الوصلة (J_2) هي الوصلة المرجعية التي تبقى عند درجة حرارة مرجع مضبوطة بدقة. أما الوصلة (J_1) فإنها توضع على تماس مع الجسم في النقطة التي يطلب قياس درجة حرارتها.

وعندما نوصل جهاز القياس إلى دائرة المزدوجة الحرارية، فإنه تتشكل وصلتان (J_3) و (J_4) عند نقطتي التماس بين الأسلاك (المادة B) وطرفي جهاز القياس. فإذا كانت نقطتا التماس هذه عند نفس درجة الحرارة أو أي ($T_3 = T_4$)، فإن الوصلتان الإضافيتان (J_3) و (J_4) لن تؤثر على جهد الخرج (V_0).

إن المزدوجة الحرارية، كعنصر حساس، يمكن أن تصنع من سلك ذي قطر صغير جداً (0.0005 in.) وذلك من أجل إنقاص الكتلة والحجم. إن المزدوجات الحرارية المصغرة هذه تتميز بزمان استجابة سريع جداً (بضع ميلي ثانية) وبإمكانية الحصول على قياسات نقطية لدرجة الحرارة. يمكن للمزدوجة الحرارية أن تعطي مجالاً واسعاً من قياس درجات الحرارة، إلا أن تغيرات الخرج ليست خطية تماماً مع تغيرات درجة

الحرارة، ونحتاج من أجل تحسين الخطية إلى دارات خاصة. وبالإضافة إلى جهد الخرج غير الخطي، فإن هناك سيئة أخرى وهي أن جهد إشارة الخرج صغير جداً، وكذلك الحاجة الماسة إلى ضبط درجة الحرارة المرجعية عند الوصلة J_2 .

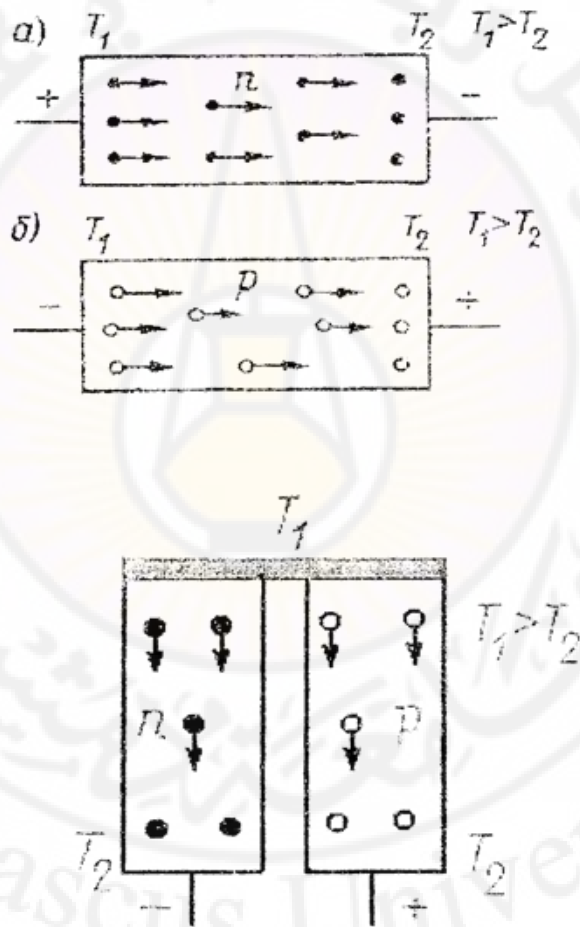


شكل 4-22- دائرة مزدوجة حرارية نموذجية

ب-المزدوجة الحرارية نصف الناقلة:

تعمل المزدوجة الحرارية نصف الناقلة بشكل مشابه للمزدوجة الحرارية المعدنية. فلو فرضنا إنه لدينا نصف ناقل من النوع n (الشكل 4-23- a) وأحد جوانبه (الأيسر على الرسم) أسخن من الجانب الآخر (الأيمن). عندئذ يصبح تركيز حاملات الشحنة المتحركة (الإلكترونات) على الجانب الساخن أكبر من تركيزها في الجانب الآخر (البارد)، فيحصل انتشار الإلكترونات من الجانب الساخن إلى الجانب البارد. ونتيجة لذلك تتشكل شحنة سالبة على الجانب البارد وشحنة موجبة على الجانب الساخن. بين هاتين الشحنتين يتشكل مجال كهربائي، يعيق حركة الإلكترونات ويحاول دفعها بالاتجاه المعاكس، مما يحقق التوازن عند فرق جهد معين على طرفي نصف الناقل، فتتشكل بذلك القوة المحركة الكهربائية الحرارية. وتصل قيمتها إلى $(0.5mV)$ لكل درجة مئوية. بشكل مماثل تنشأ قوة محركة كهربائية حرارية على طرفي نصف

الناقل نوع p (الشكل 4-23- b)، ولكن عوضاً عن الإلكترونات تنتشر الثقوب وتتشكل شحنات معاكسة بالقطبية للشحنات المتشككة على جانبي الناقل نوع n.



الشكل 4-23. بنية المزدوجة الحرارية نصف الناقل

في التطبيقات العملية تستخدم المزدوجة الحرارية نصف الناقلة المبنية في الشكل 4-23-c، وفيها يتم تسخين نقطة الوصل بين المادة n و المادة p للحصول على قوة محرّكة كهربائية حرارية.

إن المزدوجات الحرارية المصنوعة من أنصاف النواقل تعطي قيم قوة محرّكة كهربائية حرارية أكبر بكثير من القيم التي تعطيها المزدوجات الحرارية المعدنية. فعند تسخين المزدوجة حتى الدرجة 600 K تصل قوتها المحركة الكهربائية الحرارية إلى 0.3V.

تستخدم المزدوجات الحرارية بنجاح ليس فقط في قياس درجات الحرارة، وإنما كمولدات تيار مستمر صغيرة. ففي الحرب العالمية الثانية استخدم الروس فانوساً يعمل على الكيروسين (الكاز) وضع عليه عدد كبير من المزدوجات الحرارية تولد تياراً مستمراً لتغذية أجهزة الاتصالات.

في عام 1834م اكتشف الفيزيائي الفرنسي "بيلتي" الظاهرة العكسية للمزدوجات الحرارية، فعند مرور تيار كهربائي عبر مزدوجة حرارية تسخن الوصلة بين المادتين المختلفتين أو تبرّد وذلك حسب اتجاه التيار. وعلى هذا الأساس تصنع البرادات الكهروحرارية الصغيرة. وهي عبارة عن وحدة تبريد تضم عدداً كبيراً من المزدوجات الحرارية الموصولة على التسلسل.

4-1-8- مقياس الشد، Strain-Gauge [10,6]:

وهو تطبيق عن استخدام تغير المقاومة بتغير أحد أبعادها، فعندما يخضع سلك معدني دقيق لحالة شد ضمن حد المرونة له فإن مقاومته تتغير بسبب تغير قطر السلك وتغير طوله وكذلك تغير عامل المقاومة له (المقاومة، Resistivity). إن مقياس

الشدة التي تعتمد هذه الفكرة يمكن أن تقيس إزاحات متناهية في الصغر من فئة النانو متر.

ويمكن بالرجوع إلى قانون المقاومة يمكن أن نبين العوامل التي تؤدي إلى تغير في المقاومة مقدار (ΔR) كما يلي:

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (4-11)$$

حيث:

L - طول السلك، (m).

A - مساحة مقطع السلك، (m^2).

ρ - عامل المقاومة، (Ohm-meter)

$$\Delta R = \frac{\rho}{A} dL + \frac{\rho L}{A^2} dA + \frac{L}{A} d\rho \quad (4-12)$$

سنعدل هذا التعبير بحيث إنه يمثل تغيرات محدودة في عوامله ويكون تابعاً للمحددات الميكانيكية النظامية. فيقسم المعادلة (4-12) على المعادلة (4-11) نحصل على:

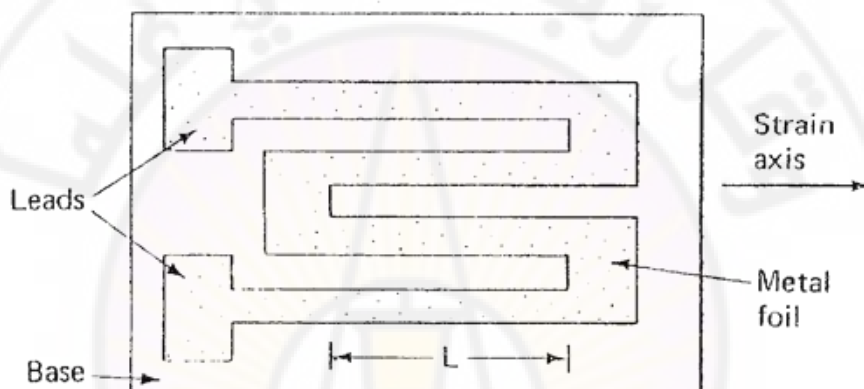
$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (4-13)$$

إن مقياس الشد مخصص لقياس إزاحات صغيرة أو شد ناتج عن جهد (Stress) واقع على أجسام صلبة كما هو الحال في الخنأ ذراع مثلاً. ويحدد الشد (ϵ Strain) كما يلي:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (4-14)$$

حيث (L) هو طول الجسم، أو بصورة عامة هو البعد بين نقطتين مرجعيتين ثابتتين على الجسم.

تتألف معظم المقاييس من عنصر معدني (شريحة معدنية أو سلك)، يلصق هذا العنصر بصفحة بلاستيكية أو قاعدة عازلة أخرى كما يبينه الشكل 24-4.



شكل 24-4 - مخطط مقياس شد

وُثِّبَت القاعدة على سطح الجسم موضوع الاختبار. ولذلك فإن المقياس يخضع لنفس الشد الذي يقع على الجسم. وعندما يزداد طول الشريحة، فإن مقاومتها الكهربائية تزداد بنفس النسبة، على الأقل من أجل إزاحات صغيرة حسب ما يلي:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = G_f \epsilon \quad (4-15)$$

ب مقدار التزايد الصغير للمقاومة.

قيمة المقاومة قبل تطبيق حالة الشد.

G_f هو عامل المقياس (Gauge Factor). ويفيدنا هذا العامل بمقارنة مواد مقياس الشد المختلفة. ويمكن أن نكتب أيضاً:

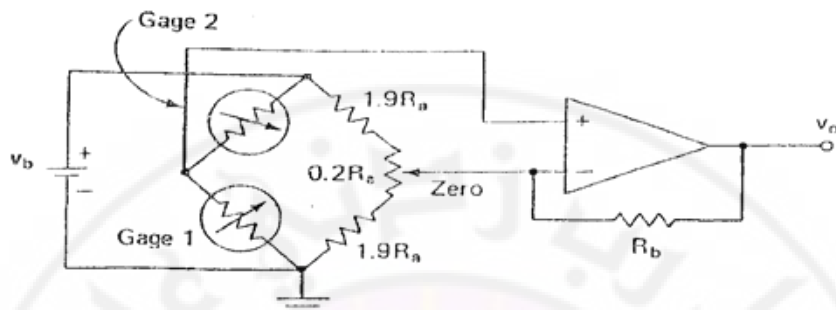
$$G_f = \frac{\Delta R / R_0}{\Delta L / L} \quad (16-4)$$

في بعض التطبيقات، وخصوصاً حيث يكون هناك تيار مستمر، يكون معامل درجة الحرارة للمقياس (عنصر الشد) مهماً وذلك لأن التغير في المقاومة بسبب درجة الحرارة لا يمكن تمييزه عن التغير في المقاومة الناتج عن الشد (Strain). في هذه التطبيقات، وبالإضافة إلى اختيار مقياس ذي معامل درجة حرارة منخفض، فإننا نضيف مقياساً ثانياً كما يبينه الشكل 4-25.

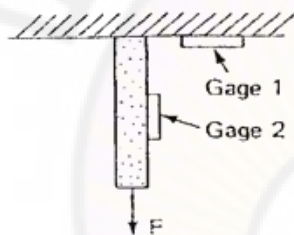
يجب تركيب المقياسين قريبين من بعضهما حتى يكونا عند نفس درجة الحرارة. أما من الناحية الكهربائية، فإنهما يوصلان إلى ذراعي جسر واتسن، حسب الشكل (4-25-آ) فلا يحدث عدم توازن الجسر ولا يظهر هناك أي إشارة خرج إذا كان تغير المقاومات في المقياسين متماثلاً. كما هو متوقع أن يحدث إذا تغيرت درجة حرارة اغيظ.

هناك طريقتان لتركيب المقياسين. يبين الشكل (4-25-ب) تركيب عنصر الشد الثاني في موقع لا ينضع حالة شد وقريب بما يكفي من عنصر الشد الأول الذي هو عنصر التحسس، فيكون عنصرا الشد تحت نفس درجة الحرارة.

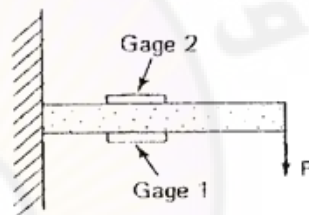
وأحياناً، كما هو الحال في الشكل (4-25-ج) يمكن أن يركب عنصر الشد الثاني في موقع حيث يكون الشد مساوياً في المقدار إلا أنه معاكس للشد في عنصر الشد الأول. في هذه الحالة، بالإضافة إلى أنه يحدث هناك تعادل في درجة الحرارة، فإن جهد خرج الجسر يكون مضاعفاً أي ضعف جهد الخرج لدارة ذات عنصر شد مفرد.



(د)



(ب)



(ج)

شكل 4-25- تعادل تأثير درجة الحرارة

4-2- انجسات السَّعَوِيَّة (انجسات ذات السَّعة الكهربائية) [6-7]:

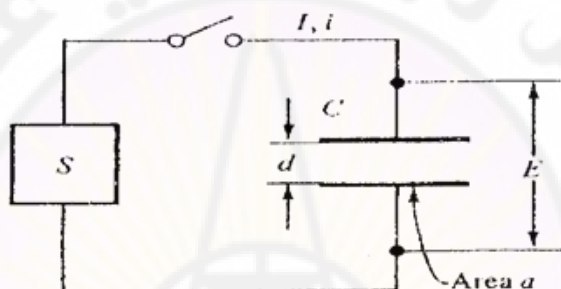
مقدمة:

يبين الشكل 4-26 صفيحتين تبعدان عن بعضهما مسافة (d, cm) ومساحة التقابل بينهما (A, cm^2) وبينهما مادة عازلة ذات ثابت عازلية (ϵ) . تشكل هاتان الصفيحتان مكثفاً سعته (C) تعطى بالعلاقة التالية:

$$C = 0.0885 \frac{\epsilon A}{d} \quad \text{Pico Farad} \quad (4-17)$$

وإذا كان الجهد الكهربائي المطبق على طرفي المكثف هو (E) وكانت (Q) هي شحنته تكون:

$$C = Q / E \quad (4-18)$$



شكل 4-26- مكثف كهربائي

يمكن قياس ثابت العازلية وذلك بقياس سعة المكثف بوجود المادة العازلة فنحصل على السعة (C) ثم بقياس السعة بوجود الهواء فنحصل على السعة (C_0) ، فتكون:

$$\epsilon = \frac{C}{C_0} \quad (19-4)$$

ويبين الجدول (4-4) قيم ثابت العازلية لبعض المواد العازلة.

وإذا وصلت مكثفتان (C_1) و (C_2) على التوازي، تعطى السعة المكافئة هما بالعلاقة التالية:

$$C_{eq} = C_1 + C_2 \quad (4-20)$$

وإذا وصلنا على التسلسل تكون السعة المكافئة لهما كما يلي:

$$C_{eq} = (C_1 \times C_2) / (C_1 + C_2) \quad (4-21)$$

الجدول (4-4)

المادة	ϵ
Glass	4 – 6
Mica	6.9 – 9.2
H ₂ O (0 C°)	88
H ₂ O (100 C°)	55.33
Porcelain	6 – 8
Titanium Dioxide	14 – 110

وإذا صنع مكثف بحيث يحتوي على عدة طبقات من مواد عازلة كما يبينه الشكل 4-27 فإنه يعامل كما لو كان مؤلفاً من مجموعة مكثفات جزئية متصلة مع بعضها على التسلسل بحيث تكون مكونات المكثف الواحد هي (d) سماكة طبقة عازلة واحدة و (ϵ) ثابت العازلية لنفس المادة العازلة وتكون السعة بين الطرفين (a) و (b) كما يلي:

$$C = 0.0885 \frac{A}{d_1 + \frac{d_2}{\epsilon_2}} \quad (4-22)$$

يتكون المكثف التفاضلي من ثلاثة طبقات: طبقتان ثابتتان (P_1) و (P_2) وصفيحة قابلة للحركة (M) حيث تشكل هذه المجموعة مكثفين (C_1) و (C_2) وبحيث تكون الصفيحة (M) مركزية بين الطبقتين (P_1) و (P_2) فيكون بالتالي:
 $(C_1 = C_2)$.

وبافتراض أن الصفيحة المركزية أزيحت نحو الأعلى بمقدار (x) فتصبح قيمتا كل من (C_1) و (C_2) كما يلي :

$$C_1 = 0.0885 \varepsilon \frac{A}{d-x} \quad (4-23)$$

$$C_2 = 0.0885 \varepsilon \frac{A}{d+x} \quad (4-24)$$

فتكون قيمة الإزاحة (x) حينئذ:

$$x = d \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \quad (4-25)$$

فيبدو من هذه العلاقة أن الإزاحة (x) تتغير خطياً مع المقدار:

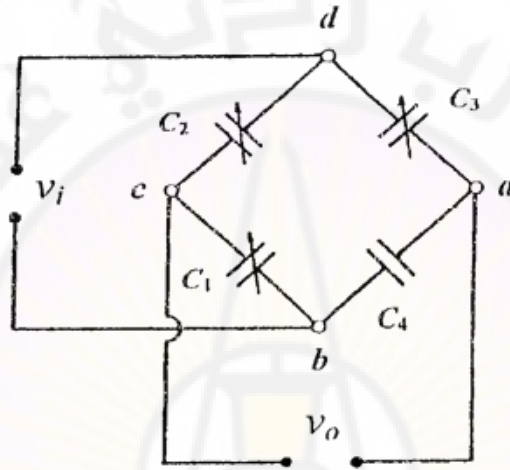
$$\frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2}$$

يستعمل المكثف التفاضلي مع الجسر الميّن في الشكل 4-29 حيث إنه قبل أن تتعرض الصفيحة المركزية للإزاحة تكون: $(C_1 = C_2)$. ويتم بواسطة المكثف (C_3) موازنة الجسر وتكون عندها: $C_3 = C_4$. ويعطى جهد خرج الجسر بعد الإزاحة بالعلاقة التالية:

$$v_o = \frac{v_i}{2} \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \quad (4-26)$$

$$v_o = \frac{v_i}{2d} x \quad (4-27)$$

فيدل هذا على أن جهد الخرج يتناسب خطياً مع مقدار الإزاحة.



شكل 29-4

مثال في حساب قيمة جهد الخرج v_o :

$$v_{ab}(j\omega) = \frac{\frac{1}{(j\omega C_4)} v_i(j\omega)}{\frac{1}{j\omega C_3} + \frac{1}{j\omega C_4}}$$

$$v_{cb}(j\omega) = \frac{\frac{1}{(j\omega C_1)} v_i(j\omega)}{\frac{1}{j\omega C_1} + \frac{1}{j\omega C_2}}$$

$$v_o(j\omega) = v_{ab}(j\omega) + v_{cb}(j\omega)$$

$$v_o(jw) = [(\frac{C_3}{C_4 + C_3}) - (\frac{C_2}{C_1 + C_2})] v_i(jw)$$

وحيث إنه عند بدء عملية القياس (كانت الدارة في حالة توازن) تكون فيها $(C_3 = C_4)$ فينتج:

$$v_o(jw) = v_i(jw) [\frac{C_1 - C_2}{2(C_1 + C_2)}]$$

وحيث إن هذه المعادلة لا تتغير مع التردد فينتج ما يلي:

$$v_o = \frac{v_i (C_1 - C_2)}{2 (C_1 + C_2)} \quad (4-28)$$

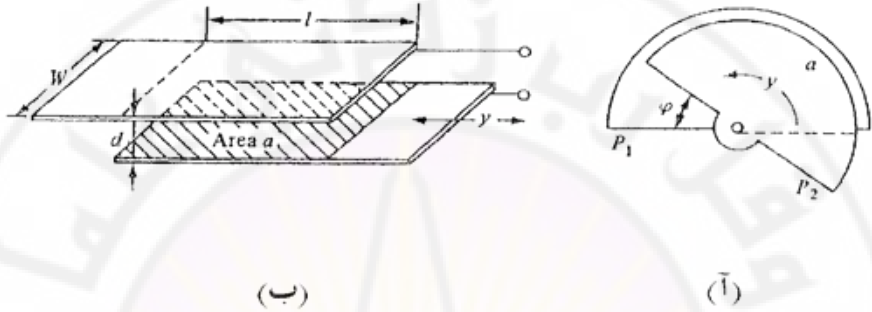
وفيما يخص تغيير مساحة سطح التقابل (A) بين قطبي المكثف من أجل كشف إزاحة مستقيمة أو زاوية، نبين في الشكل 4-30 طريقتين لتغيير مساحة سطح التقابل بين قطبي المكثف. يعتمد النوع الأول في تغيير السعة على ظهور حركة ميكانيكية مستقيمة بينما يعتمد النوع الثاني على ظهور حركة ميكانيكية دائرية.

تتمتع الحساسات السعوية بعدة مميزات، منها أنه لا يوجد أي تماس بين العناصر المتحركة ويمكن أن يكون صلباً متماسكاً ويتحمل الصدمات والاهتزازات الكبيرة. وأن إمكانية استخدامها عند درجات حرارة مرتفعة هو أمر كبير الأهمية.

يمكن تصنيع حساسات سعوية تتحمل درجات حرارة حتى (2000°F)

حيث إن ثابت العازلية للمادة العازلة بين الصفيحتين هو العامل الوحيد فقط الذي يمكن أن يتغير مع تغير درجة الحرارة. وحيث إن ثابت العازلية للهواء له قيمة ثابتة

ضمن مجال كبير من درجات الحرارة، فإن الحساس السعوي له خصائص حرارية ممتازة.



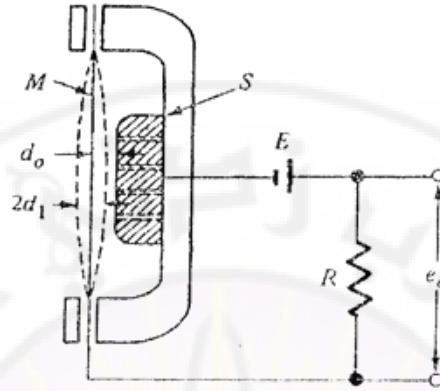
شكل 4-30 - كاشف إزاحة سعوي

أ - إزاحة زاوية، ب - إزاحة مستقيمة

4-2-2-2 - استخدام انجس السعوي لكشف ظاهرة صوتية:

يمكن كشف ظاهرة صوتية وذلك بالاستفادة من فكرة تغيير السعة الكهربائية الناتج عن تغيير (d) والخصول على ما يسمى بالميكروفون السعوي وهذا مثال عن الكاشف السعوي. يبين الشكل 4-31 مكثفًا ذا صفيحة معدنية (M) رقيقة جداً قابلة للحركة تحت تأثير ضغط إشارة صوتية تقع عليها بينما تكون الطبقة الأخرى (S) للمكثف ثابتة وقريبة من الصفيحة (M) وعلى مسافة (d_0) منها فتكون سعة المكثف عندئذ هي (C_0).

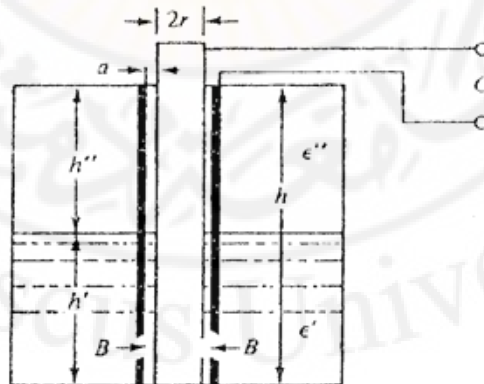
يؤدي اهتزاز الصفيحة (M) تحت تأثير ضغط الإشارة الصوتية إلى تغيير المسافة الفاصلة بين قطبي المكثف فتتغير، بالتالي، سعة المكثف. وينتج عن تغيير السعة ظهور جهد لحظي (V_0) على طرفي المقاومة (R).



شكل 4-31- مقطع بين الميكروفون السعوي ودائرة الكهربائية

4-2-3 - استخدام المجس السعوي لقياس ارتفاع مستوى سائل:

يمكن الاستفادة من تغيير ثابت العازلية لمكثف للحصول على مقياس سعوي يكشف ارتفاع مستوى سائل. يبين الشكل 4-32 مكثفاً أسطوانياً مغموراً في سائل (زيت مثلاً) غير موصل للتيار الكهربائي. يؤدي تغير ارتفاع مستوى السائل إلى تغير السعة فنستدل بالتالي من قياس تغير السعة على ارتفاع مستوى السائل.



شكل 4-32- مجس سعوي لتحديد ارتفاع مستوى السائل

ويعطى تغير السعة بالعلاقة التقريبية التالية وذلك من أجل: $(h > r > a)$

$$C = \frac{h' \epsilon' + h'' \epsilon''}{2 \ln(1 - \frac{a}{r})} \quad (4-29)$$

4-2-4- تطبيق عن استخدام المكثف في التحكم بحاكمة (مفتاح توقيت زمني):

يبين الشكل 33-4 مكثفاً موصلاً إلى دائرة كهربائية تتضمن مقاومة كهربائية R ومنبع تغذية كهربائية مستمرة E . وبافتراض أن المكثف غير مشحون، وبعد إغلاق المفتاح S سيمر تيار (i) في الدائرة ويبدأ شحن المكثف، ويكون الجهد على طرفي كل من R و C هو كما يلي:

$$v_c = \frac{1}{C} \int i \, dt, \quad v_r = i R$$

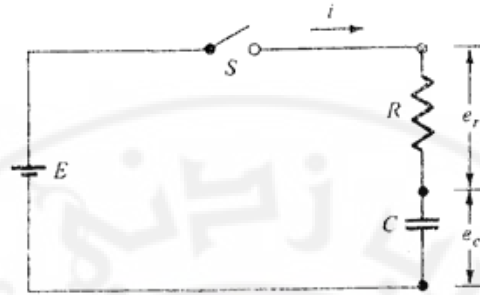
ويكون مجموع هذين الجهدين مساوياً إلى الجهد E .

وحيث إن:

$$i = C (dv_c / dt)$$

ينتج:

$$R C (dv_c / dt) + v_c = E$$



شكل 4-33- دائرة أساسية لشحن مكثف

ويكون الجهد على طرفي المكثف هو الحل الرياضي لهذه المعادلة التفاضلية وهو:

$$v_c = E (1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (4-30)$$

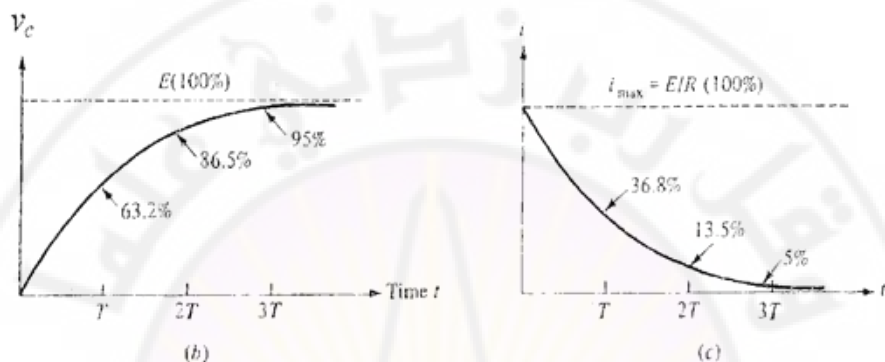
ويتغير الجهد على طرفي المقاومة R وفق المعادلة التالية:

$$v_r = E \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (4-31)$$

نرى من المعادلتين السابقتين (v_c) و (v_r أو i) أن كلاً منهما يتغير أسياً كما هو مبين في الشكل 4-34. وأن معدل تغير الجهد أو تناقص التيار يعتمدان على ثابت الزمن ($\tau = RC$) حيث يفدر ثابت الزمن بالتانية والمقاومة بالأوم والسعة بالفاراد.

وبين الشكل 4-35 حالة تفريغ مكثف عن طريق المقاومة R بعد أن يكون مشحوناً. وتكون قيمة الجهد البدائي على طرفيه (E). وبعد إغلاق المفتاح S سيمر تيار في الدارة، وسيفرغ المكثف شحنته في المقاومة، وتكون معادلة التفريغ كما يلي:

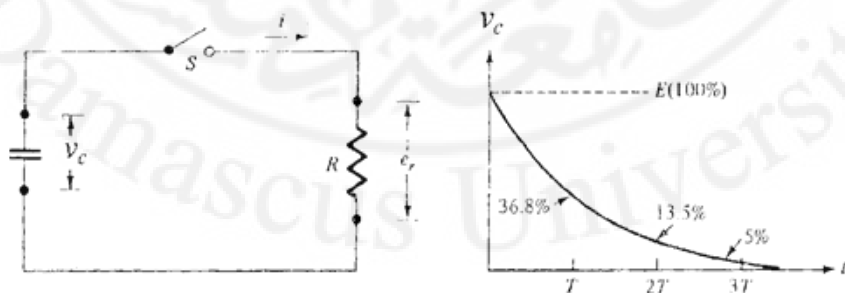
$$v_p = v_c = E \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad (4-32)$$



شكل 4-34- تغير الجهود في دائرة RC

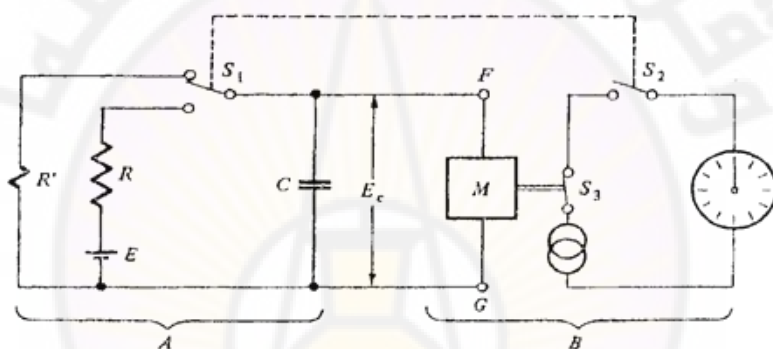
إن تفريغ المكثف في المقاومة يعني أن كلاً من الجهد والتيار سيتناقصان أسياً مع الزمن حسب ما يبينه الشكل 4-35.

إن هذه الميزة التي تتمتع بها دائرة (RC) وهي تغير الجهد والتيار أسياً مع الزمن تفيد في تطبيقات عديدة نذكر منها، على سبيل المثال، دائرة مفتاح توقيت زمني ونظم قياس زمنية وغير ذلك.



شكل 4-35- دائرة تفريغ مكثف ومنحنى التفريغ

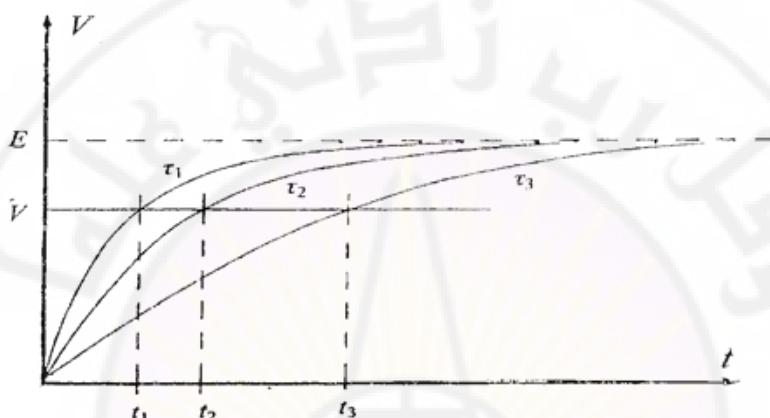
يبين الشكل 4-36 دائرة تتكون من جزأين (A) و (B). يتألف الجزء (A) من دائرة شحن (RC) ذات ثابت زمن كبير، ومن دائرة تفريغ ($\dot{R}C$)، حيث ($\dot{R}$) صغيرة جداً لإتمام عملية تفريغ المكثف في زمن قصير نسبياً. أما الجزء (B) فهو عبارة عن نظام يتألف من حاكمة، مثلاً، تبدأ عملها فقط عندما يصل الجهد المطبق على طرفيها إلى قيمة محددة (V). إن بدء عمل الحاكمة يعني فتح المفتاح (S_3) الذي يكون مغلقاً مسبقاً.



شكل 4-36- دائرة أساسية لمفتاح التوقيت

يبدأ عمل مفتاح التوقيت عند إغلاق المفتاحين (S_1, S_2) حيث يرتفع الجهد أسياً بحسب المعادلات السابقة بشرط أن تكون المقاومة بين النقطتين (G, F) كبيراً جداً حتى يكون ازدياد الجهد (v_c) معتمداً فقط على عناصر الدائرة (A). ومن أجل ثابت زمن يساوي (τ_1)، وعند الزمن (t_1)، يصل الجهد المطبق على الحاكمة إلى القيمة (V). وهو الجهد المحدد لتشغيل الحاكمة، حسب ما يبينه الشكل 4-37، يفتح حينئذ المفتاح (S_3) وتنتهي عندها عملية التوقيت الزمني. وإذا أردنا تشغيل الحاكمة عند أزمان أخرى ($t_2, t_3, \dots$) مثلاً، نختار ثوابت زمن أخرى للدائرة وهي ($t_2, t_3, \dots$). فعندما يصل الجهد على طرفي الحاكمة إلى القيمة (V) تتحدد أزمان التشغيل ($t_2, t_3, \dots$).

ومن أجل أن تبدأ الدارة عممية توقيت جديدة، يجب تفريغ المكثف ويتم ذلك عن طريق المقاومة الصغيرة (R).



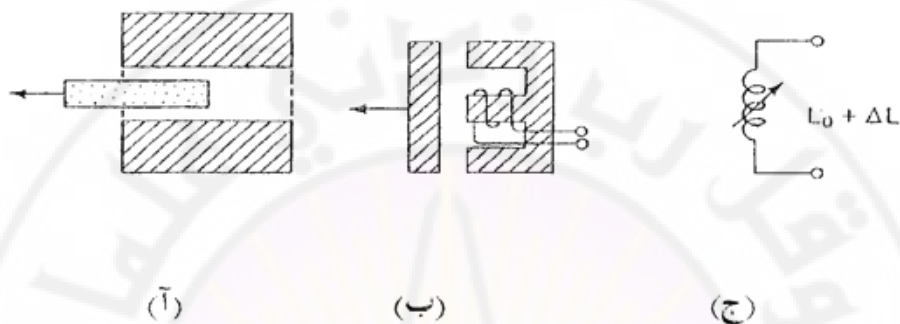
شكل 4-37- تغيير ثوابت الزمن

3-4 - المجسات التحريضية (Inductive Transducers) [11-9,6,5] :

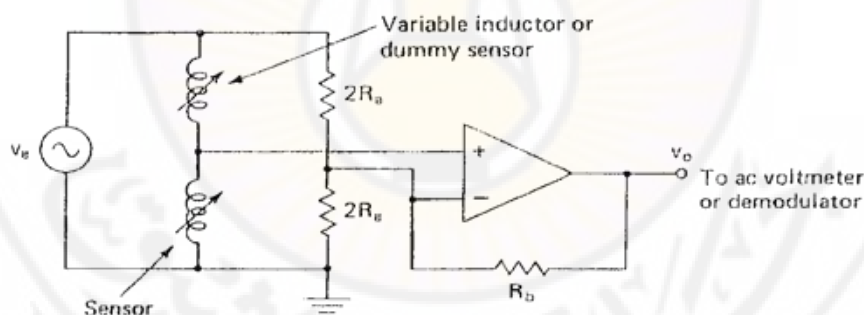
1-3-4 - مجس إزاحة ذو ملف:

يتم في هذا النوع من الكاشفات استخدام مبدأ التغير في تحريض ملف يقع بقرب مادة عالية النفاذية المغنطيسية (Ferromagnetic) كما يبينه الشكل 4-38. يتزايد التحريض عندما يتزايد دخول المادة في الملف (الشكل - آ)، أو عندما تقترب منه (الشكل - ب). ومن أجل إجراء عملية القياس، نستخدم جسر واتسن حيث يكون الملف جزءاً من الجسر كما يبينه الشكل 4-39. ويغذي الجسر منبع جهد متناوب (400 Hz مثلاً)، ويستخدم ملف متغير ثاني في ذراع آخر من الجسر من أجل معايرة الجسر. ويتم استخدام مكبر لتكبير إشارة الجسر الضعيفة التي هي إشارة جهد

متناوب. وتُقرأ هذه الإشارة بواسطة مقياس جهد متناوب وتناسب قيمة هذا الجهد مع مقدار الإزاحة.



شكل 38-4 - مجسات تحريضية



شكل 39-4 - مكبر جسري لحساس تحريضي

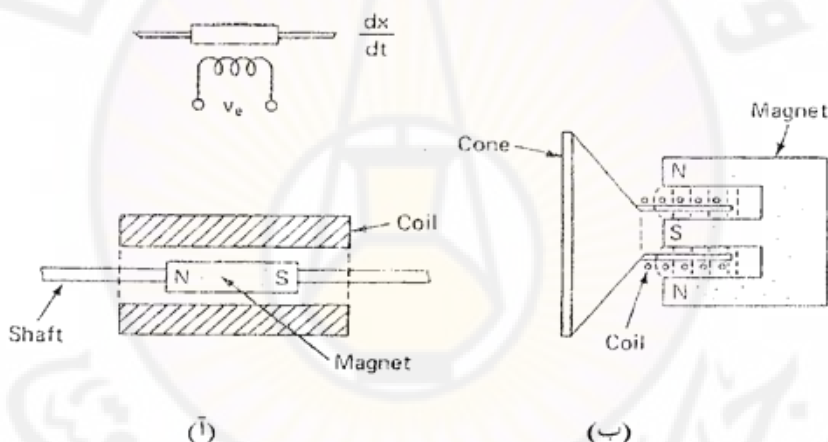
2-3-4 حساسات السرعة الكهرومغناطيسية:

يعتمد مبدأ التحسس بالحركة على فكرة توليد قوة محركة كهربائية (emf) بواسطة منف يتحرك في حقل مغناطيسي. يبين الشكل 40-4 نوعين من العناصر الكهرومغناطيسية لتحقيق هذه الفكرة. يبدو أن جهد الخرج (v_e) للملف، عندما

يتحرك سواء الملف أو القلب المغناطيسي بالنسبة لبعضهما البعض، يتناسب مع معدل حدوث الإزاحة (dx) بالنسبة للزمن (dt) أي:

$$v_e = K \frac{dx}{dt} \quad (4-33)$$

حيث (K) ثابت يتناسب مع عدد لفات الملف وقوة الحقل المغناطيسي. ويمكن الإستعانة أيضاً بمجهر عادي ليعمل كمجس لاقط للحركة.



شكل 4-40- عناصر تحسس كهرومغناطيسية

آ- مجس سرعة خطي، ب- مجهر

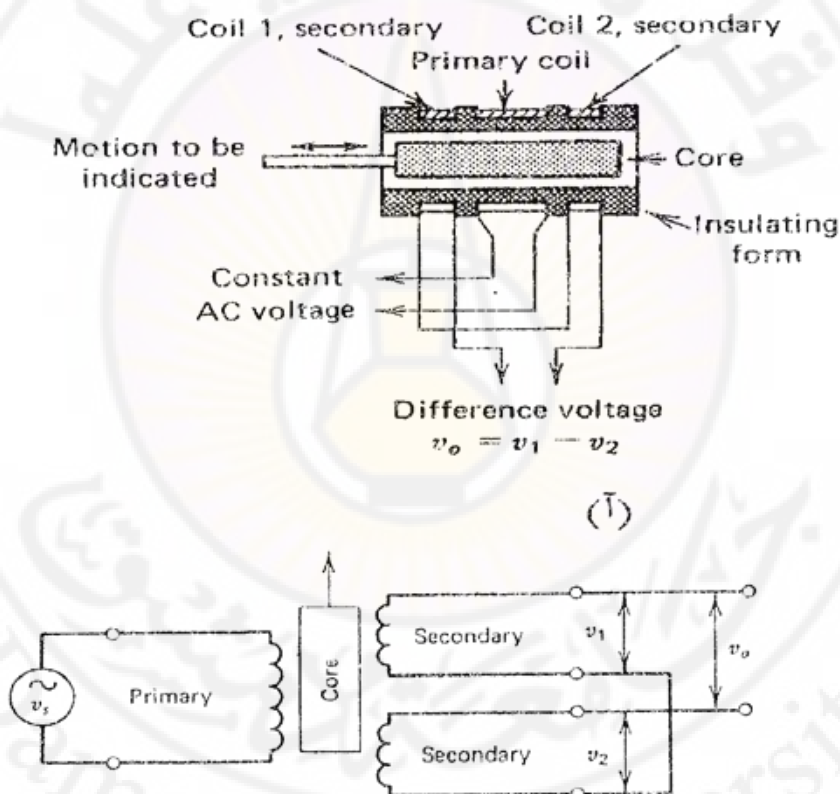
4-3-3- الخول التفاضلي المتغير الخطي:

ويعتمد في عمله على مبدأ التحريض القابل للتغير، إن المجس ذا التحريض المتغير

الأكثر شيوعاً هو الخول التفاضلي المتغير الخطي:

(Linear Variable Differential Transformer, LVDT)

وهو، حسب ما يبينه الشكل 4-41 وهو يشبه في تركيبه الجس التحريضي، يتألف الجس (LVDT) من ثلاثة ملفات، ملفوفة على بكرة معزولة وبترتيب متناظر، ومن نواة ذات خصائص مغناطيسية يمكن أن تتحرك داخل البكرة، دون أي تماس معها، تقدم ترابطاً فيض مغناطيسي بين الملفات. إن وضع النواة المغناطيسية يضبط التحريض المتبادل بين الملف المركزي والملفين الثانويين الخارجيين.



(ب)

شكل 4-41

أ- مقطع في محول تفاضلي متغير خطي (LVDT)

ب- مخطط لدائرة الجس (LVDT)

يطبق جهد دخل متناوب على الملف المركزي بتردد يتراوح بين 50 هرتز و 25000 هرتز ويؤخذ جهد الخرج عند نهاية الملفين الآخرين ويعتمد جهد الخرج عندئذ على قيمة الازدواج المغناطيسي بين القلب المتحرك والملفات ويعتمد هذا الازدواج بدوره على موضع القلب المغناطيسي المتحرك.

يخضع الحقل المغناطيسي لمتناوب جهدين متساويين تقريباً في الملفين الثانويين عندما يكون القلب مركزياً بينهما. ويحدد التوصيل بين الملفين الثانويين بحيث يكون جهدا الخرج v_1 و v_2 متعاكسين في الطور كما يبينه الشكل (4-41 - ب) لكي يكون جهد الخرج مساوياً للصفر أي:

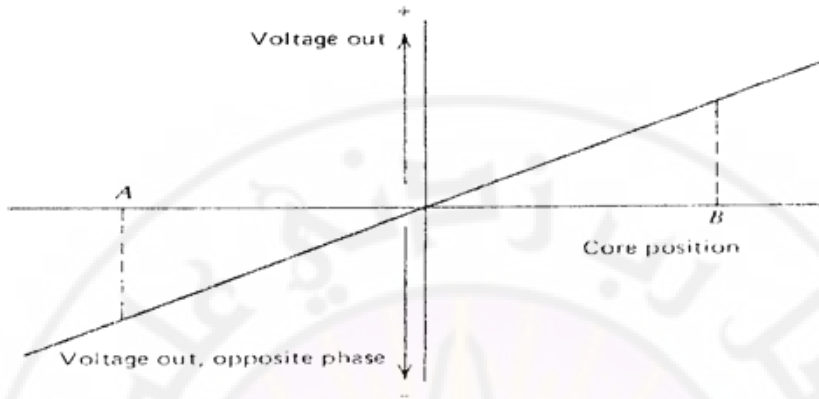
$$v_0 = v_2 - v_1 = 0$$

عندما يتحرك القلب المغناطيسي من المركز يحدث عدم توازن في التحريض المتبادل بين الملف الأولي والملفين الثانويين ويظهر جهد خرج: $(v_0 = v_2 - v_1)$.

ويعتبر جهد الخرج مؤشراً على مدى إزاحة القلب المغناطيسي فعندما يتحرك القلب المغناطيسي قرب مركز الجهاز يكون الخرج تابعاً خطياً تقريباً لموضع القلب المغناطيسي إلى حد كبير كما يبينه الشكل 4-42. ويمكن تحديد اتجاه الحركة من ملاحظة طور جهد الخرج منسوباً إلى جهد الدخل.

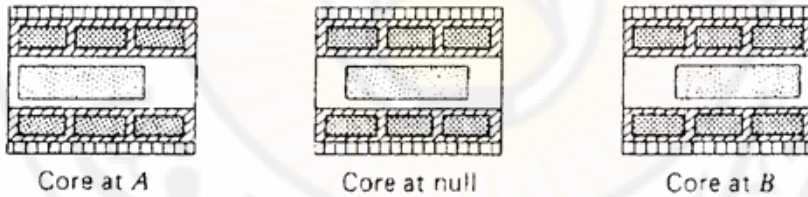
تحدد عادة المنطقة الخطية التي يعمل عندها الكاشف. وعندما يعمل الكاشف ضمن مجاله الخطي يسمى في هذه الحالة بالمحول التفاضلي المتغير الخطي ويرمز له اختصاراً بالتعبير (I.VDT).

ويظهر في الشكل 4-42 خواص خرج الكاشف من أجل ثلاثة أوضاع لقلبه المغناطيسي (A أو 0 أو B) كما هو موضح في الشكل 4-43.



شكل 4-42- خواص خرج الكاشف الخطي (LVDT)

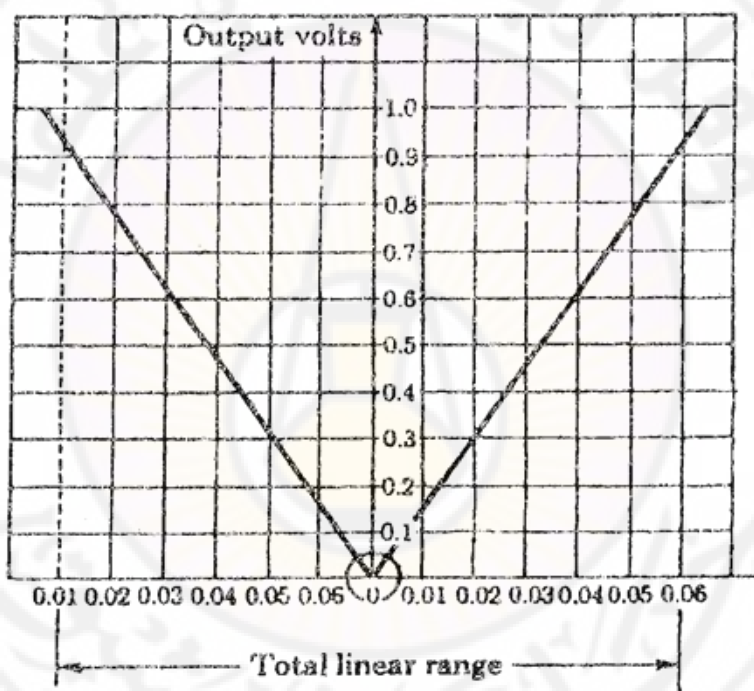
Core Displacement



شكل 4-43- إزاحة القلب المغناطيسي في الاتجاهين

نلاحظ على الشكل 4-42 أن العلاقة بين جهد الخرج والإزاحة هي علاقة خطية وأن جهد الخرج يتعرض لإزاحة في الطور مقدارها (180°) وذلك عندما تنعكس حركة القلب المغناطيسي من أحد جانبي المركز إلى الجانب الآخر. إلا أنه يمكن اعتماد القيمة المطلقة لجهد الخرج دون الأخذ بعين الاعتبار تغير فرق الطور وعندها تعطى منحنيات خواص خرج الكاشف بالشكل 4-44.

يعاني خرج المجس، في الواقع، قليلاً من اللاخطية وهذا ما نلاحظه بعد تكبير الجزء من منحنيات الخواص حول منطقة الصفر كما يبدو في الشكل 4-45. نلاحظ هنا أيضاً أن جهد الخرج عند المركز لا يساوي تماماً الصفر بسبب السعة الموجودة فعلاً بين الدخّل والخرج.

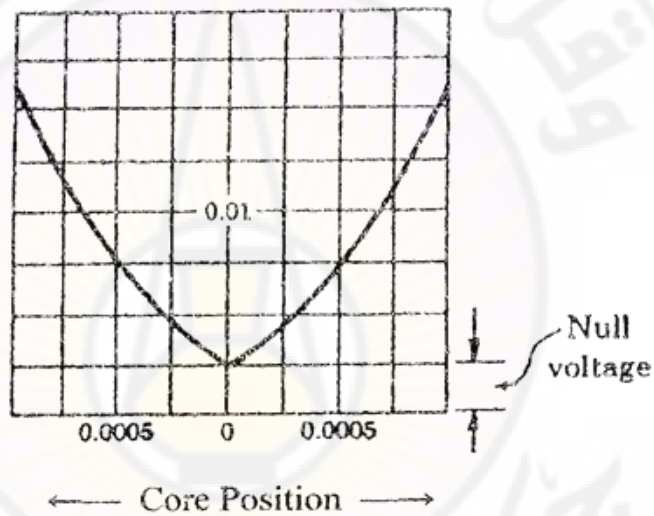


شكل 4-4- القيمة المطلقة لغيرات جهد الخرج

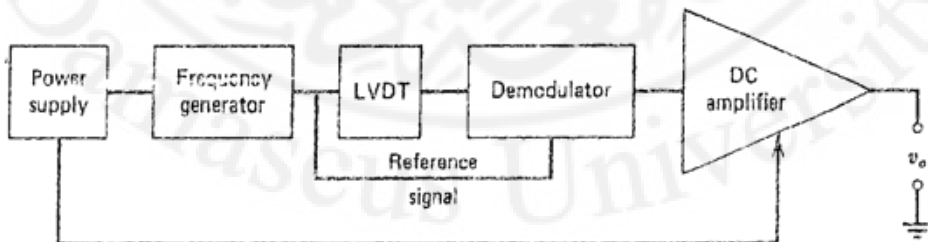
يقع جهد الدخّل المطلوب تطبيقه على الملف الأولي بين 5 و 15 فولت وتبلغ القدرة المطلوبة أقل من 1 W. وتتغير الحساسية لأنواع المختلفة من هذه المجسات بين (0.02 V/mm) و (0.2 V/mm) من الإزاحة لكل فولت من الجهد المطبق على الملف الأولي. وعادة تكون المجسات المستخدمة لقياس الإزاحات القصيرة بمجال عمل

($\pm 2 \text{ mm}$) ذات حساسية عظمى، وتتناقص الحساسية من أجل مجسات مستخدمة لقياس الإزاحات الطويلة بمجال عمل ($\pm 150 \text{ mm}$).

وحيث إن المجس (LVDT) هو حساس غير فاعل (Passive Sensor) يتطلب منبعاً متناوباً بتردد يختلف عن تردد منابع التغذية الكهربائية الشائعة فإنه يحتاج إلى دارات تكيف الإشارة (Signal Conditioning) من أجل عمله.

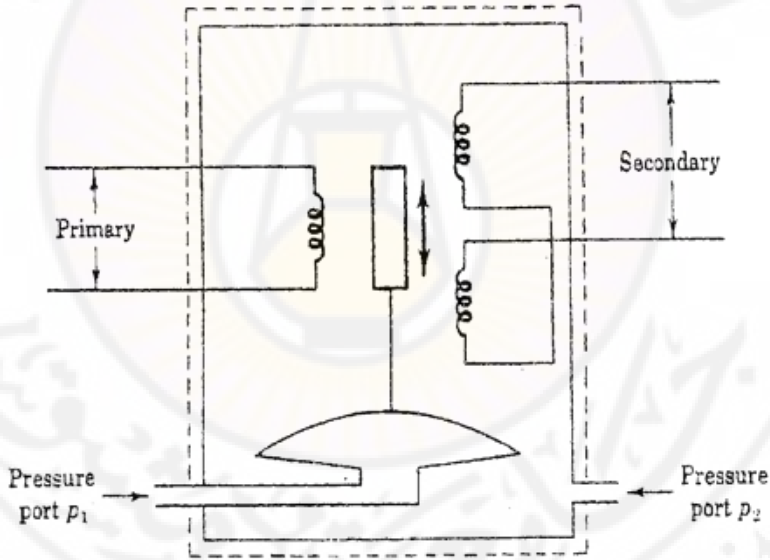


شكل 4-45- خواص لاهطية للكاشف حول منطقة الصفر



شكل 4-46- مخطط صندوقي لدارة تكيف الإشارة لمجس LVDT

يبين الشكل 4-46 مكيف إشارة نموذجي يتضمن مولد تردد (Frequency Generator) لقيادة المحس، وكاشف تعديل (Demodulator)، ليبدّل إشارة خرج المحس المتناوبة إلى جهد خرج مستمر تماثلي (Analog DC Output Voltage)، ومنبع تغذية، ومكبر تيار مستمر (DC Amplifier) لزيادة مطال جهد الخرج. توجد محسات (LVDT) بأحجام مختلفة وتستعمل بشكل واسع في قياسات الإزاحة في العديد من التطبيقات كما أنه يمكن الاستفادة منها في قياسات الضغط والقوة وذلك بعد إجراء التعديلات الميكانيكية المناسبة.

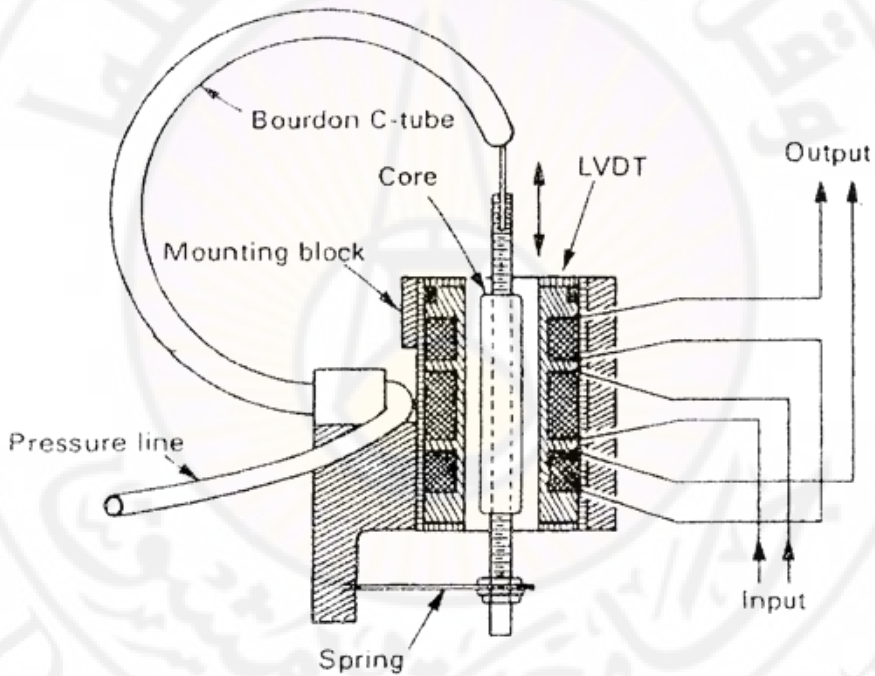


شكل 4-47-- مخطط لمقياس ضغط تفاضلي بغشاء يستخدم LVDT

يبين الشكل 4-47 محوّلًا تفاضلياً يستعمل في مقياس ضغط تفاضلي بغشاء (LVDT Diaphragm Differential Pressure Gage) حيث يبدو واضحاً أن انحراف أو تحرك الغشاء تحت تأثير فرق في الضغط بين (P_1) و (P_2) سيؤدي

إلى حركة النواة. يمكن للمقاييس التجارية أن تقيس ضغوطاً منخفضة تصل حتى (0.000035 psi) .

وبين الشكل 4-48 مقياس ضغط يستخدم أنبوبة بوردون كعنصر مرن (ذات شكل حرف C) ومحول تفاضلي للحصول على (LVDT Bourdon Tube).

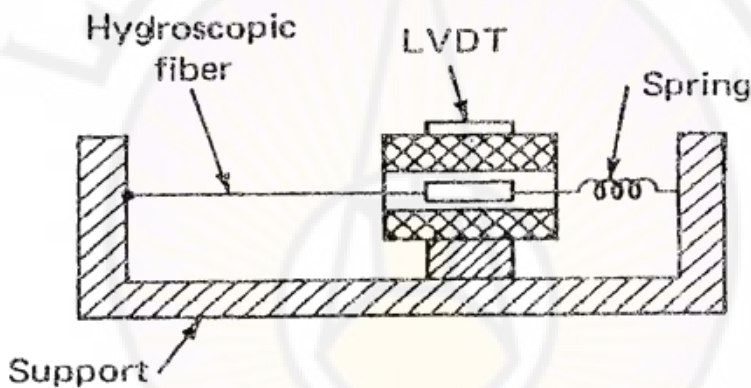


شكل 4-48 - مقياس ضغط بأنبوبة بوردون

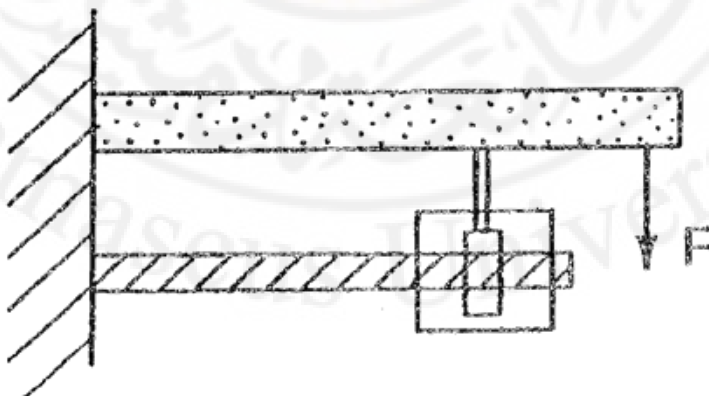
وبين الشكل 4-49 مقياس رطوبة شائع. بمحول تفاضلي حيث يعتمد في حركة القلب المغناطيسي على تغير طول الخيط الليفي نتيجة تغير مقدار امتصاصه للرطوبة. إن التغير في الطول صغير وغير خطي، ويؤدي تغير طول الخيط إلى حركة القلب

المغناطيسي وظهور جهد كهربائي عند خرج المحول (LVDT) يكون مؤشراً لمقدار الإزاحة وبالتالي لمقدار الرطوبة.

ويبين الشكل 4-50 مقياس قوة (F) تقع على حامل مرن يتصل ميكانيكياً مع القلب المغناطيسي للحامل المرن. يؤدي انحناء الحامل المرن تحت تأثير القوة إلى تفعيل المجس (LVDT).



شكل 4-49- مقياس رطوبة بمحول تفاضلي

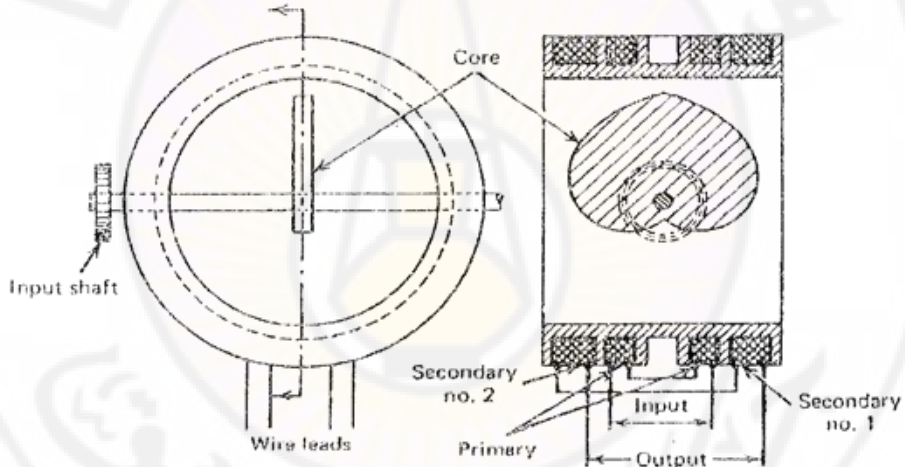


شكل 4-50 - مقياس قوة

4-3-4-- المحول التفاضلي المتغير الدوراني:

(Rotary Variable Differential Transformer, RVDT):

يقيس هذا النوع الإزاحات الزاوية. يبين الشكل 4-51 محس RVDT ويتألف من ملفين أوليين وملفين ثانويين، تُلف هذه الملفات بشكل متناظر على بكرة معزولة كبيرة القطر، ومن قلب دوار من مادة مغناطيسية مركبة على محور الدوران ضمن البكرة يفيد كنواة للملفات. عندما يدور المحور والنواة يتغير التحريض المتبادل بين الملفين الأوليين والثانويين فيظهر جهد خرج كاستجابة للحركة الدورانية.



شكل 4-51- مقطع مبسط لمحول تفاضلي متغير دوراني (RVDT)

ومع أن المحس RVDT يمكنه أن يدور دورة كاملة (360 deg.) فإن مجال عمله الخطي محدود ضمن ($\pm 40 \text{ deg.}$). وتبلغ الخطية لمحس RVDT نموذجي له هذا المجال من العمل الخطي بحدود (0.5 %) من المجال. إن إنقاص مجال العمل

يحسن من الخطئية، ومن أجل مجس RVDT يعمل ضمن المجال ($\pm 5 \text{ deg.}$) تكون خطئيته بحدود (0.1%) من هذا المجال.

4-4- مجس الإزاحة الرقمي^[10]:

Digital Displacement Transducer:

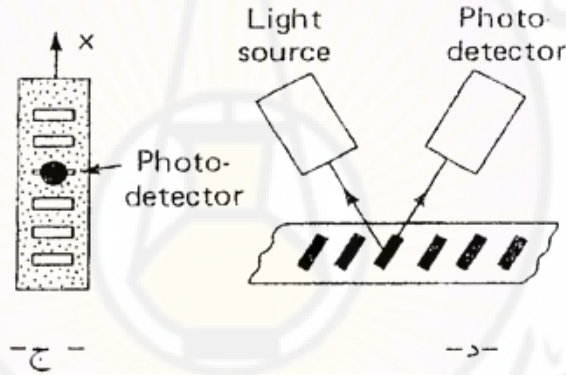
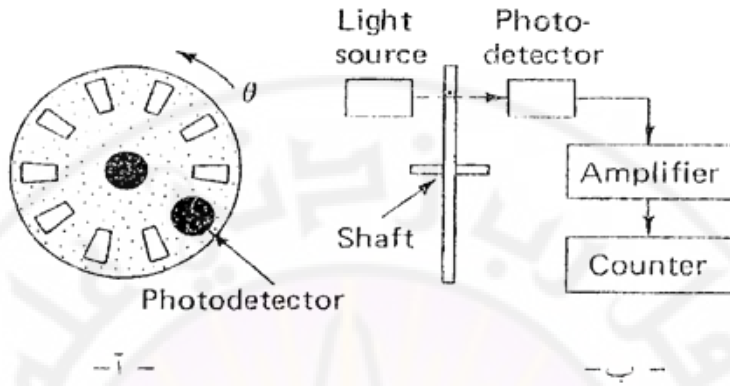
عندما يتطلب الأمر تحديد إزاحات كبيرة نسبياً يكون المجس المرمر رقمياً هو الخيار الأفضل غالباً، وخصوصاً إذا كانت القراءة رقمية.

يبين الشكل 4-52 نوعاً من المجسات (مجسات تزايدية) لنقل المعطيات الزاوية والخطئية حيث يمكن تقسيم المجال الدائري إلى عشرة مراحل (فتحات)، مثلاً، في النوع ذي العجلة. ومن أجل العديد من التطبيقات العملية، يمكن أن يُطلب أن يكون التقسيم إلى مراحل أكثر تتضمن ربما 100 أو 1000 فتحة، بينما من أجل تطبيقات أخرى قد تكفي فتحة واحدة لكل دورة.

عند دوران العجلة، يتم تحويل النبضات الضوئية التي يلتقطها الكاشف الضوئي إلى نبضات كهربائية ويتم تكبيرها وتعدادها بواسطة عداد عشري. إن القراءة الرقمية للعداد تساوي إلى الإزاحة الزاوية للعجلة أو إلى عدد الدورات. ويمكن، كذلك، إنشاء مجسات خطئية بطريقة مماثلة حسب ما يبينه الشكل (4-52 - ج ، د).

ويمكن باستخدام عداد تردد (Frequency Counter) قياس سرعة الحركة مباشرة. إن من عيوب المجسات التزايدية هي عدم وجود مرجع صفري وعدم إمكانية التعرف على اتجاه الحركة.

يجب الملاحظة هنا أن تردد السلسلة النبضية يتناسب مع السرعة. وإن توصيل عداد تردد مع الخرج بدلاً من عداد نبضات يعطينا مباشرة قيمة السرعة.



شكل 4-52- مجسات إزاحة رقمية تزايدية أساسية

نوع الإزاحة الرأسيّة - آ - منظر أمامي، ب - منظر جانبي
نوع الإزاحة الخطيّة - ج - منظر أمامي، د - منظر جانبي لنوع انعكاسي

4-5- المجس الكهروضغطي (Piezoelectric Transducer):

إن المادة الكهروضغطية، كما يشير إليها هذا الاسم، تنتج شحنة كهربائية عندما تتعرض إلى قوة أو ضغط. إن المواد الكهروضغطية مثل الكوارتز وحيد البلورة أو (Polycrystalline Barium Titanate)، تحتوي على جزيئات (Molecules)

ذات توزيع شحنة غير متناظر. وعندما يطبق ضغط على المادة، تتشوه البلورة وتظهر إزاحة نسبية للشحنات الموجبة والسالبة ضمن البلورة.

إن إزاحة الشحنات الداخلية هذه تنتج شحنات خارجية ذات إشارة معاكسة على السطوح الخارجية للبلورة. وإذا كانت هذه السطوح مكسوة بأقطاب معدنية، كما يبينه الشكل 4-53، فإنه يمكن تحديد قيمة الشحنة (q) التي تظهر وذلك بالرجوع إلى جهد الخرج (v_o) حسب المعادلة التالية:

$$q = v_o C \quad (4-34)$$

حيث: C هي سعة البلورة الكهروضغطية.
تتعلق شحنة السطح (q) مع الضغط المطبق (p) بالعلاقة التالية:

$$q = S_q A p \quad (4-35)$$

حيث:

S_q هي حساسية الشحنة (Charge Sensitivity) للبلورة الكهروضغطية.

A هو سطح القطب.

ويعطى جهد الخرج (v_o) للعنصر الحساس بالعلاقة التالية:

$$v_o = S_v h p \quad (4-36)$$

حيث:

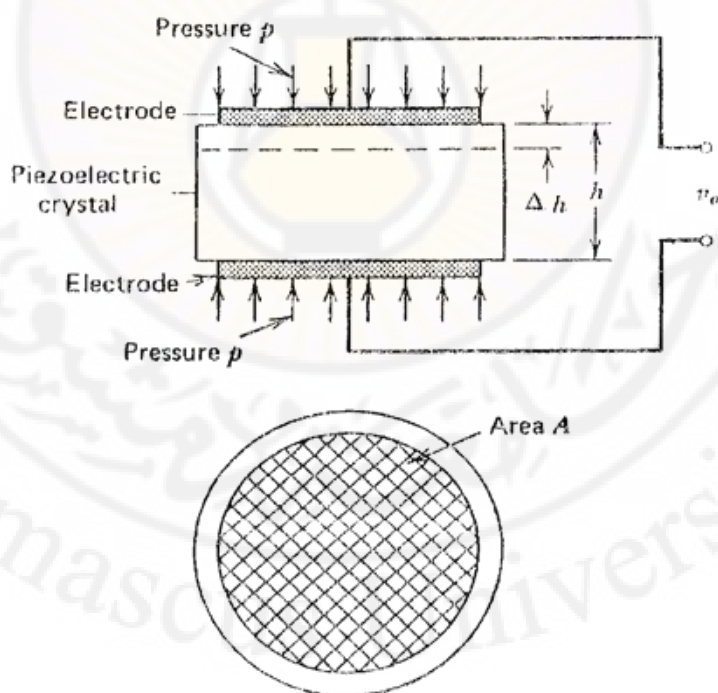
S_v هي حساسية الجهد (Voltage Sensitivity) للعنصر الحساس (البلورة الكهروضغطية)، وهذه الحساسية هي تابع إلى توجه (Orientation) محور الاسطوانة (Cylinder Axis) بالنسبة إلى المحاور البلورية (Crystallographic Axes).
يعطى الجدول 4-5 قيمة نموذجية لحساسية الجهد (S_v) وحساسية الشحنة (S_q).

تصنع معظم المجسات الكهروضغطية من كوارتز وحيد البلورة لأنه الأكثر استقراراً من بين المواد الكهروضغطية وهو، تقريباً، لا يعاني من ظهور مفاكيد ميكانيكية وكهربائية. ويتمتع بخصائص ممتازة عند درجات حرارة عالية ويمكن أن يعمل حتى درجة حرارة (550°C) . أما خصائصه فهي:

- معامل المرونة : (Modulus of Elasticity) = 86 GPa

- المقاومة : (Resistivity) = $10^{12} \Omega \cdot \text{m}$

- ثابت العازلية : (Dielectric Constant) = 40.6 pF/m



شكل 4-53- بلورة كهروضغطية تتشوه تحت تأثير ضغط مطبق

جدول 5-4

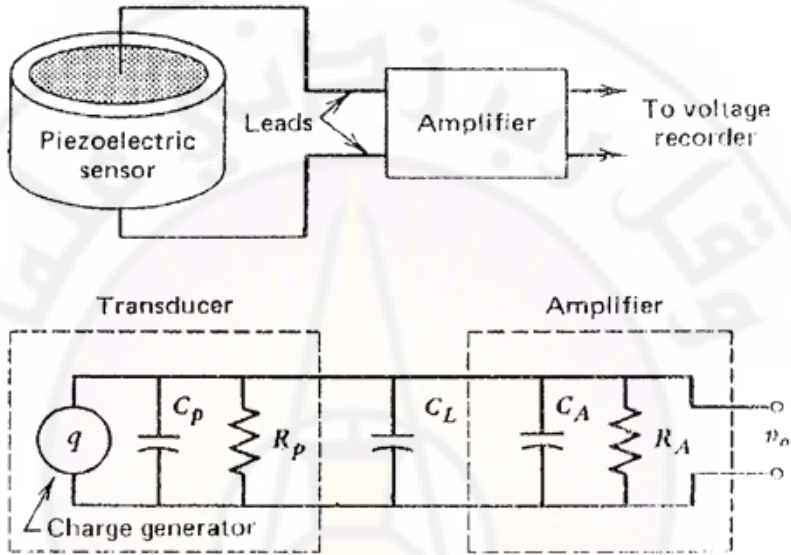
Material	Orientation	S_q ($p\ C/N$)	S_v ($V.m/N$)
Quartz SiO_2	X-cut, length longitudinal	2.2	0.055
Single crystal	X-cut, thickness longitudinal	- 2.0	- 0.05
	Y-cut, thickness shear	4.4	0.11
Barium titanate $Ba\ Ti\ O_3$	Parallel to polarization	130	0.011
Ceramic, poled	Perpendicular to polarization	- 56	- 0.004

أما مادة (Barium Titanate, $Ba\ Ti\ O_3$) فهي مادة متعددة البلورات ويتم تحويلها إلى مادة كهروضغطية [حيث يَطبق جهد عال على الأقطاب وتُعرض إلى درجة حرارة فوق نقطة (Curie) أي ($125\ C^\circ$) ، ونُحافظ على جهد الاستقطاب أثناء تبريدها. فتكتسب المادة خصائص كهروضغطية دائمة].

أما الاستقرار الميكانيكي لهذه المادة فهو ممتاز، فهي ذات مقاومة ميكانيكية عالية وذات معامل مرونة كبير جداً ($120\ GPa$). وهي أقل كلفة من الكوارتز، ويمكن تصنيعها بأشكال وأحجام مختلفة متعددة كثيراً.

من أجل قياس الجهد الناتج عن الحساس الكهروضغطي نستخدم مكبراً لتكبير إشارة هذا الحساس حسب مخطط الدارة المبينة في الشكل 4-54. يعمل الحساس الكهروضغطي كمولد شحنة، وبالإضافة إلى كونه مولد شحنة، فإننا نمثله أيضاً بمجموعة من المكونات مربوطة على التوازي تتضمن مكثفاً (C_p) بحدود ($10\ pF$) ومقاومة تسريب (Leakage Resistor, R_p) بحدود ($10^{14}\ \Omega$). وندخل في الاعتبار السعة بين أسلاك التوصيل (C_L)، وذلك لأنه حتى في حال كون أسلاك التوصيل قصيرة نسبياً فإنها ذات سعة أكبر مما هو للحساس. يجب أن يكون المكبر ذا

ممانعة دُخُل عالية جداً نسبياً ليعزل الحساس الكهروضغطي بالرغم من ممانعة خروجه العالية جداً.



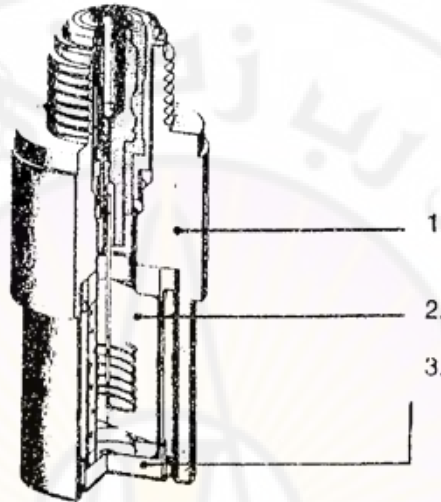
شكل 4-54- مخطط لنظام قياس يتضمن حساساً كهروضغطياً

إذا استمر الضغط المطبق على الحساس لفترة ضويلة من الزمن، فإن الشحنة (q) التي تظهر في المادة الكهروضغطية لا تبقى ثابتة بل تبدأ بالتسرب عن طريق تدفق تيار صغير خلال المقاومة (R_p) ومقاومة المكبر (R_A). يمكن، باستخدام بلورة كهروضغطية، الحصول على مجس قياس ضغط يسمى: مجس قياس ضغط من النوع الكهروضغطي

Piezoelectric-Type Pressure Transducer:

ويبين الشكل 4-55 تفاصيل التصميم لهذا المجس الذي يتكون من غلاف يحتوي على بلورة الكوارتز توضع على قاعدة استناد صلبة وتغطي من الجانب الآخر بغشاء رقيق ناقل للضغط. وعندما يطبق ضغط على الغشاء الذي يكون على تماس مع سطح

البلورة، تتولد شحنة كهربائية ساكنة، ويعتمد مقدار الشحنة على الضغط، وعلى حجم البلورة وكذلك على توجه محاور البلورة.



شكل 4-55- تفاصيل التصميم لجس قياس ضغط من النوع الكهروضغطي

- 1- هيكل الجس ويحتوي عناصر الكوارتز بشكل محكم ويفيد كذلك من أجل التركيب.
- 2- عناصر الكوارتز التي تعطي جهداً كهربائياً متناسباً مع الضغط.
- 3- الغشاء وهو مثبت بإحكام مع هيكل الجس وينقل الضغط المطلوب قياسه إلى عناصر الكوارتز.

إن مجسات الضغط الصغيرة التي تستخدم بلورة كوارتز ذات قطر (6 mm) وطول (6 mm) هي ذات حساسية بحدود (1 pC/psi)، أما البلورات الأكبر حجماً، ذات قطر (11 mm) وطول (12 mm) فهي ذات حساسية بحدود (5 pC/psi). يمكن استخدام المجسات الكهروضغطية من أجل قياسات ضغط عالية جداً حتى (100,000 psi) ومن أجل قياسات ضغط عند درجات حرارة حتى (350 C°). ويمكن زيادة مجال درجة الحرارة إذا استعملنا ماء لحماية البلورة وعازلها.

إن للمجسات الكهروضغطية ممانعة خرج عالية جداً تعتمد على تردد الضغط المطبق. ويسبب ممانعة الخرج العالية هذه، يجب استخدام مكبر شحنة (Charge Amplifier) بين المجس وأي جهاز قياس جهد عادي. إن مكبر الشحنة يحول الشحنة إلى جهد، ثم يكبر الجهد، ويقدم ممانعة خرج محدود (100Ω)، وهذه قيمة مقبولة من أجل معظم أجهزة قياس الجهد.

4-6-6 مجس يعمل بتأثير هول: Holl effect-transducer

تعتمد مبدلة هول في مبدأ عملها على تفاعل الخواص الكهربائية لأنصاف النواقل التي يمر بها تيار كهربائي مع المجال المغناطيسي المؤثر عليها. فعندما يؤثر حقل مغناطيسي بشكل عامودي على مادة نصف ناقلة يمر عبرها تيار كهربائي مستمر يظهر فرق جهد كهربائي على الطرفين العرضيين لنصف الناقل (الشكل 4-56)، يمكن شرح هذه الظاهرة كما يلي:

عندما يؤثر مجال مغناطيسي على حاملات الشحنة المتحركة تنحرف هذه الحاملات بتأثير قوة لوريتز، فإذا كان نصف الناقل من النوع n مثلاً تنحرف الإلكترونات تحت تأثير المجال المغناطيسي باتجاه إحدى جوانب نصف الناقل (أي باتجاه الجانب الأسفل في الشكل 4-56 وذلك حسب قاعدة اليد اليمنى)، فيظهر على هذا الجانب شحنة سالبة، أما على الجانب المقابل الذي يحسر الإلكترونات فتظهر شحنة موجبة.

وينتج بين الجانبين فرق جهد كهربائي ومجال كهربائي يحاول منع انحراف الإلكترونات بتأثير قوة لوريتز، وعندما تتساوى قوة المجال الكهربائي F_2 مع قوة لوريتز F_1 يتوقف انفصال الشحنات الكهربائية ويحصل التوازن:

$$\begin{aligned}
 F_1 &= F_2 \\
 qB\vartheta &= qE \Rightarrow B\vartheta = E \\
 E &= \frac{V_H}{d} \Rightarrow V_H = dB\vartheta
 \end{aligned}
 \tag{4-37}$$

حيث:

- q - شحنة الإلكترون وتساوي 1.6×10^{-19} كولون.
- ϑ - سرعة حركة الإلكترونات. E - شدة المجال الكهربائي العرضي في نصف الناقل.
- B - كثافة الفيض المغناطيسي.

نحدد قيمة سرعة الإلكترونات ϑ بدلالة كثافة التيار J والكثافة الحجمية n .

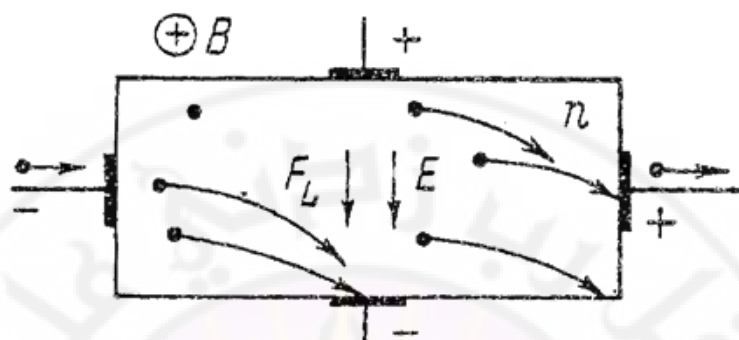
$$\begin{aligned}
 J &= \frac{I}{A} = nq\vartheta \\
 \vartheta &= \frac{J}{nq}
 \end{aligned}
 \tag{4-38}$$

نعوض في (4-37) مع الأخذ بالحسبان أن سطح مقطع نصف الناقل A ، الذي يمر من خلاله التيار يساوي لجداء عرض نصف الناقل d بسماكته h :

$$V_H = \frac{I}{nqh} B = K_H IB
 \tag{4-39}$$

حيث:

$$K_H = \frac{1}{nqh} - \text{ثابت هول.}$$



الشكل 4-56. عكس هول

واضح أن علاقة الربط (4-39) بين الجهد الناتج بتأثير ظاهرة هول وكثافة الفيض المغناطيسي هي علاقة خطية.

تقوم مبدلة هول حسب العلاقة (4-40) بعملية الضرب بين التيار والتحريض المغناطيسي مباشرة سواء للإشارات المستمرة أو المتناوبة.

تستخدم مبدلة هول لقياس كثافة الفيض المغناطيسي B . ونظراً لأن B يمكن أن تنشأ عن التيار الكهربائي وتناسب معه لذلك تصنع على أساس ظاهرة هول مقاييس أمبير، يمكن أن تقيس التيار دون قطع السلك المار به. كما تستخدم مبدلة هول لقياس الاستطاعة ولبعض القيم الكهربائية الأخرى.

أما من سلبيات مبدلة هول هي تأثرها بتغيرات درجة الحرارة.

الفصل الخامس

الجبر البولياني والبوابات المنطقية

Boolean Algebra and Logic Gates

5-1- النظام الثنائي [15,13,11,10,7] :

لنعتبر الدارة المبينة في الشكل 5-1 الذي يظهر فيها المبدّل أو المفتاح (S) الذي يمكن أن يأخذ، فقط، إحدى حالتين ممكنتين: الحالة الأولى: (S $\equiv$ مفتوح)، والحالة الثانية: (S $\equiv$ مغلق).

فعندما يكون المبدّل (S) مفتوحاً، يكون جهد الخرج مساوياً إلى (+5 V)، وعندما يكون المبدّل مغلقاً يكون جهد الخرج مساوياً إلى (0 V). ونلاحظ أنه لا يأخذ جهد الخرج أية قيم أخرى ممكنة. ونقول إنه طالما يتواجد كل من المبدّل (S) وجهد الخرج (V_o) في إحدى حالتين، فإنهما يعملان بالطريقة الثنائية (Binary). تُستخدم مسميات عديدة للتعبير عن هاتين الحالتين المنطقيتين. نقول مثلاً إن هناك:

الحالة (حقيقي ، true) والحالة (خطأ أو غير حقيقي ، false, untrue)، أو:

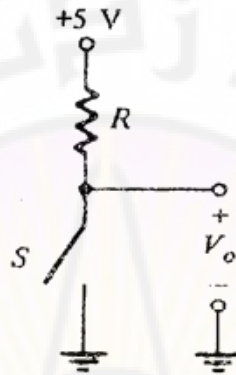
الحالة (نعم ، yes) والحالة (لا ، no)، أو:

الحالة (وصل ، on) والحالة (قطع ، off) في نظام إلكتروني. أو:

الحالة (عالي ، HI) والحالة (منخفض ، LO) بالنسبة لمستويات الجهود

والتيارات، في عنصر تبديل (Switching).

ونستخدم أيضاً عددين ثنائيين في نظام منطقي وهما 1 و 0. ونقول إن هناك:
الحالة (1) والحالة (0)، ونطلق التسميتين: $V(1)$ و $V(0)$ للدلالة على مستويين
من الجهد.



شكل 5-1- دائرة ثنائية الحالة

5-2- أسس المنطق الهندسي:

ذكرنا أن المفتاح S يمكن أن يكون في إحدى حالتين: إما مفتوحاً، أو مغلقاً.
إن هذا تعبير بسيط عن حقيقة منطقية، وهناك طريقة واحدة لاستنتاج الجواب هي
تقديم الحقائق هذه بشكل معادلة رمزية (Symbolic Equation). من الواضح
أن مصطلحات المنطق الرمزي (Symbolic Logic) أو ما يسمى الجبر
البولياني (Boolean Algebra)، نسبة إلى مخترعه (Boole)، يختلف في بعض
علاقاته عن الجبر التقليدي.

الجبر البولياني هو منطق رمزي (Symbolic Logic) ذو حالتين، أي ثنائي
الحالة (Binary)، حيث يفترض في متغير بولياني (A) أنه يأخذ إحدى قيمتين
منطقيتين مسموح بهما، وهما القيمة المنطقية 0 أو القيمة المنطقية 1. وهكذا، يمكن
أن يكون (A = 1) أو (A = 0). وإذا لم تكن (A) تساوي 1 فإنها يجب أن

تساوي 0. وهذا الجير يختلف، في بعض خصائصه، عن الجير التقليدي. نعرض فيما يلي نظرة عامة عن الموضوع.

نقول بشكل عام، إننا نطلب جواباً بسيطاً عن أي سؤال هندسي إنه "حقيقي، true" أو "غير حقيقي، untrue". فيمكن أن نفترض أن القيمة المنطقية 1 تخص الحالة "حقيقي"، وأن القيمة المنطقية 0 تخص الحالة "غير حقيقي". يمكن بواسطة هذه الوسيلة البسيطة أن نكشف، مثلاً، عن الحالة المنطقية لدارة إلكترونية منطقية، بكل بساطة، باستخدام جهاز قياس الجهد الكهربائي (فولتمتر) الذي يشير إلى مستوى الجهد عند نقطة في دائرة كهربائية. فإذا كان مستوى الجهد في الدارة هما: $(+5\text{ V})$ و (0 V) فإننا يمكن أن نحدد مستويين منطقيين كما يلي :

$$\text{logic}(1) = +5\text{ V}$$

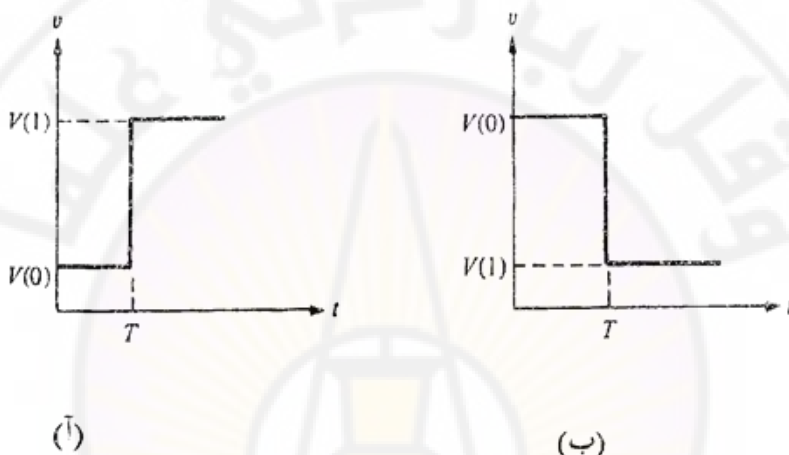
$$\text{logic}(0) = 0\text{ V}$$

نقول هنا إننا نعمل في المنطق الموجب، لأن القيمة الأعلى للجهد تمثل المنطق (1). وكما يبينه الشكل (5-2-أ)، يكون الجهد الأكثر إيجابية هو المستوى 1، والجهد الآخر هو المستوى 0، أي $[V(1) > V(0)]$. ونقول عن النظام هنا أنه يستخدم المنطق الموجب المستمر (dc positive logic).

ومن جهة أخرى يوجد، أيضاً، نظام منطق سالب مستمر كما يبينه الشكل (5-2-ب) حيث يبدو أن الجهد الأكثر سلبية هو المستوى 1 والجهد الأكثر إيجابية هو المستوى 0، أي $[V(0) > V(1)]$. يجب أن نؤكد بأن القيم المطلقة للجهد ليست بذات معنى في هذه التحديدات. وخصوصاً أن الحالة 0 لا تعني بالضرورة مستوى الجهد صفر، ومن الممكن أن تعني مستوى الجهد صفر في بعض الأنظمة.

وفي نظام ديناميكي، أو المنطق النبضي، تُسمى البتة (*binary digit* $\equiv$ *bit*) بوجود أو عدم وجود نبضة. فالحالة 1 تشير إلى وجود نبضة موجبة في نظام منطق

موجب ديناميكي. وتشير النبضة السالبة إلى 1 في نظام منطق سالب ديناميكي. وفي كلا النظامين، فإن الحالة 0، عند المدخل أو المخرج، وعند لحظة محددة من الزمن، تعني بأنه لا يوجد نبضة في تلك اللحظة المحددة.

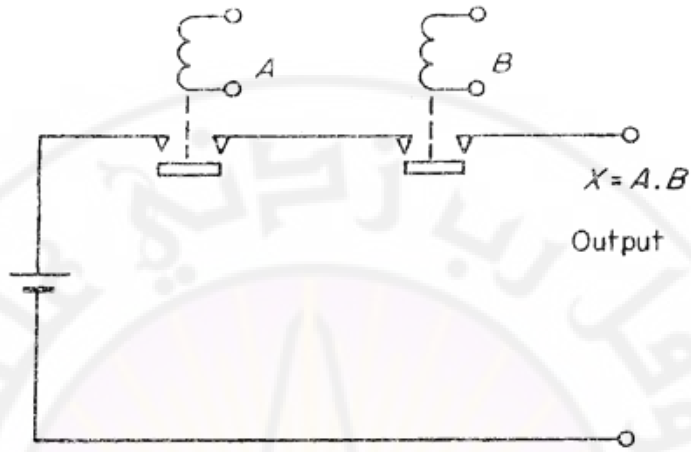


شكل 5-2- الجهود من أجل:
أ- منطق موجب، ب- منطق سالب

يتطلب الجبر البولياني الذي يتضمن عدة متغيرات، ثلاثة وظائف منطقية أساسية فقط هي: AND و OR و NOT. وإن ما يسمى بالبوابة المنطقية (Logic Gate) هي دائرة تستخدم لتحقيق وظيفة منطقية أساسية. ويفيد نظام من مجموعات بوابات منطقية في تنفيذ معادلات بوليانية معقدة. نبين فيما يلي دوائر تُستخدم لتعمل في المنطق الموجب وتحقق المتطلبات المنطقية لهذه الوظائف.

3-5- البوابة AND:

يمكن استخدام دائرة حاكمة (Relay) لتحقيق عمل دوائر منطقية، وتوصف هذه الدوائر كبوابات (Gates)، ويبين الشكل 5-3 مثلاً على ذلك.



شكل 3-5- دائرة ذات حاكمتين تحقق وظيفة دائرة AND

تحت ظروف العمل العادية، إما أن يكون ملفا الحاكمتين A و B واقعين تحت تأثير جهد تشغيل كامل، أو لا يكون هناك جهد مطبق عليهما. نقول، بالنسبة للحالة الأولى، أن الإشارة ذات قيمة منطقية في المستوى 1، أي (جهد كامل). وفي الحالة الأخيرة، تكون ذات قيمة منطقية في المستوى 0، أي (جهد يساوي صفراً).

إن أيّاً من الملفين يمكن أن ينفذ لواء واحد من المستويين المنطقيين، وهكذا يوجد أربعة حالات ممكنة تخضع لها الحاكمتان. نبين في الشكل 4-5 ما يسمى بجدول الحقيقة (Truth Table) الذي يتضمن في عمودي المدخلين A و B جميع الوقائع الممكنة لحالات هذين المدخلين.

إن التسمية "جدول الحقيقة" مأخوذة من حقيقة أن إشارة المنطق (1) تمثل حالة "موجود" أو الحالة التي تكون "حقيقية true"، بينما يمثل المنطق (0) حالة "غير موجود" أو الحالة التي تكون "غير حقيقية untrue".

Truth table

Inputs		Output
A	B	$X (= A \cdot B)$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

شكل 5-4- جدول الحقيقة للبوابه AND

عندما لا يكون هناك أي جهد كهربائي مطبق على أحد ملفي الحاكمتين أو على كليهما، فإن ثماسات الحاكمة تبقى مفتوحة ويكون جهد الخرج صفراً. وهذا ما يطابق الصفوف الثلاثة الأولى من جدول الحقيقة. وفقط، عندما يطبق جهد كهربائي على كلا الملفين A و B بنفس الوقت، فإنه سيكون هناك جهد خرج، وهذا ما يتوافق مع الصف الرابع من جدول الحقيقة.

وهكذا، نقول عن البوابة أنها تكون مغلقة عندما تكون قيمة أي من A و B صفراً، وتكون البوابة مفتوحة. فقط عندما يكون: $(A = B = 1)$. ومراجعة صفوف جدول الحقيقة للبوابه AND نرى أن القيمة العددية في عمود الخرج لها نفس القيمة كجدااء حسابي للرقمين في عمودي المدخل. وبموجب ذلك، فإن التعبير المنطقي للخرج X يعطى كما يلي:

$$X = A \cdot B$$

ملاحظة:

تضع بعض المراجع النقطة (.) بين الأحرف لتمثل وظيفة AND المنطقية، وقد تضع بعض المراجع الأخرى الرمز (x) وقد لا تضع مراجع أخرى أي رمز. ويمكن كتابة العلاقة AND بإحدى الصيغ التالية:

$$X = A.B = AB = A \times B$$

ومع أن تابع الجداء المنطقي له نفس قيمة تابع الجداء الحسابي، إلا أنه يجب الانتباه عند استعمال هذه العلاقة، لأن التابعين لا يعينان نفس الشيء. وكذلك، فإن إشارة المساواة في المعادلة المنطقية تعني مساواة منطقية، وهي ليست بالضرورة نفس الشيء كالمساواة الحسابية.

وبصورة عامة، يكون لبوابة AND مدخلان أو أكثر ومخرج واحد وتعمل بموجب التحديد التالي:

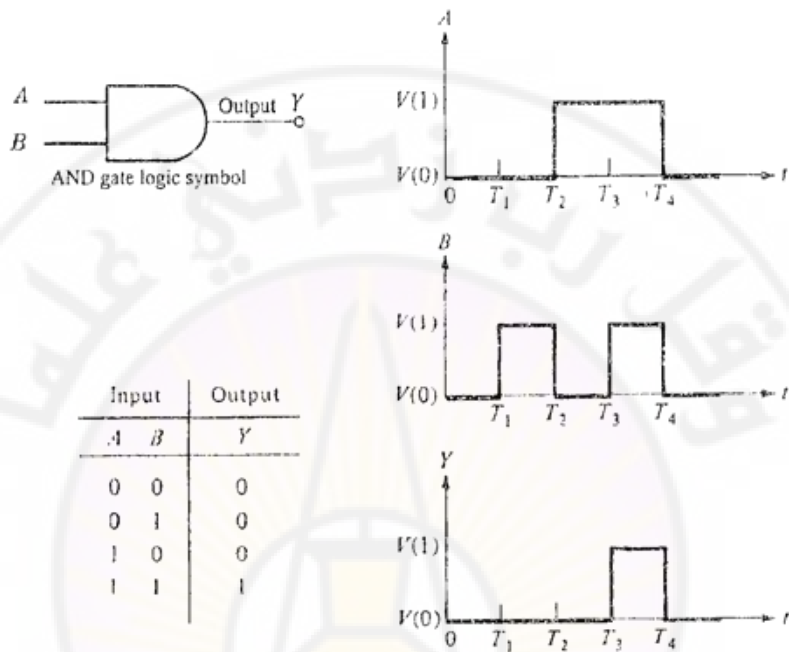
يصبح خرج البوابة AND في الحالة 1 إذا، فقط إذا، أصبحت جميع المداخل في الحالة 1.

ونبين في الشكل 5-5 رمز بوابة AND وإشارتي دخل (منطق موجب) تظهران في المواقع المحددة، حيث تتغير الإشارتان بين الحالتين 1 و 0 في هذه المواقع، ويظهر جهد الخرج، أيضاً، في الموقع المحدد حسب ما يتطابق مع جدول الحقيقة. يمكن، أيضاً، تمثيل بوابة AND ذات مدخلين بالدارة المبينة في الشكل 5-6 حيث يوجد مفتاحان (مبدّلان) A و B، على التسلسل مع بعضهما، في الخط بين منبع الإشارة v_s والحمل. ويظهر الجهد v_s على الحمل فقط إذا كان كلا المفتاحين A و B مغلقان.

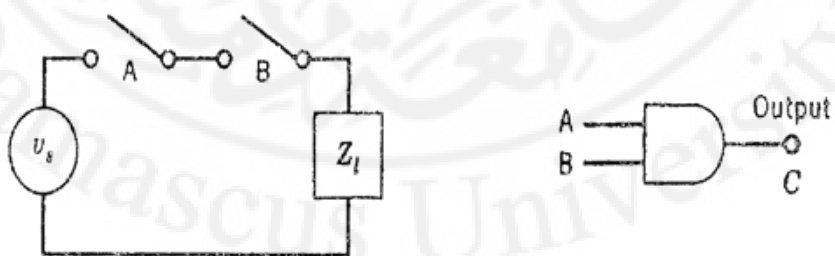
وعندما يكون للبوابة AND عدد N مدخل، يعبر عن الخرج بالشكل المنطقي التالي:

$$X = A.B.C.D.....N$$

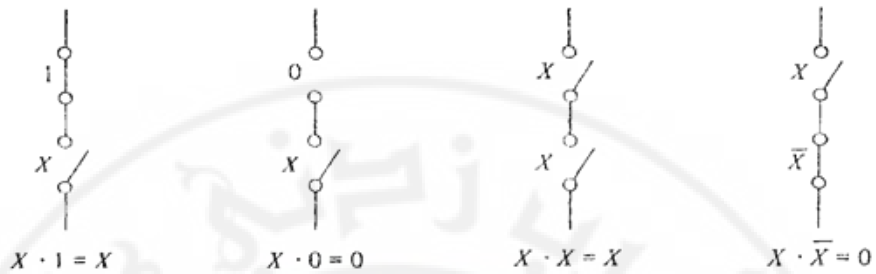
ويمكن تلخيص ما أوردناه عن دائرة AND وشروط عملها وذلك بالرجوع إلى الشكل 5-7 حيث يقدم مخططات الدارة التي تبين قوانين تأسيس معادلاتها المنطقية.



شكل 5-5- رمز بوابة AND ذات مدخلين وجدول الحقيقة لها
وأشكال الجهود من أجل متعلقين متتابعين



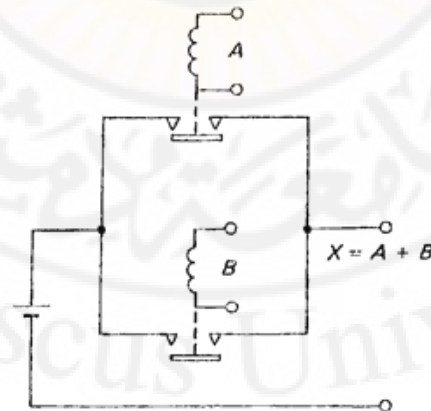
شكل 5-6- دائرة AND بمفتاحين



شكل 5-7- مخططات دائرة AND تبين قوانين تأسيس معادلاتها المنطقية

4-5- البوابة OR:

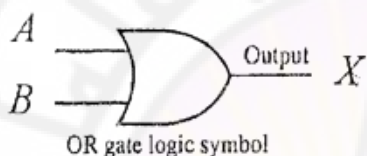
يبين الشكل 5-8 بوابة OR تستخدم الحاكمتين، وتتألف من حاكمتين موصلتين على التوازي. فعندما تكون كلتا الحاكمتين، بنفس الوقت، ليستا بحالة عمل (أي لا يوجد جهد كهربائي مطبق على ملفيهما)، أي ($A = B = 0$)، يكون الخرج صفراً. وعندما تكون أي من الحاكمتين، أو كلتاها بحالة عمل، فإن جهد الخرج يصبح مساوياً إلى ($+E$) أو المنطق 1.



شكل 5-8- بوابة OR ذات حاكمتين

ويبين الشكل 5-9 رمز بوابة OR بمدخلين وجدول الحقيقة لها، وتبين الصفوف الثلاثة الأولى من الجدول تحقق العلاقة الحسابية التالية:

$$X = A + B$$



Inputs		Output
A	B	$X (A + B)$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

شكل 5-9-- رمز بوابة OR ذات مدخلين وجدول الحقيقة لها

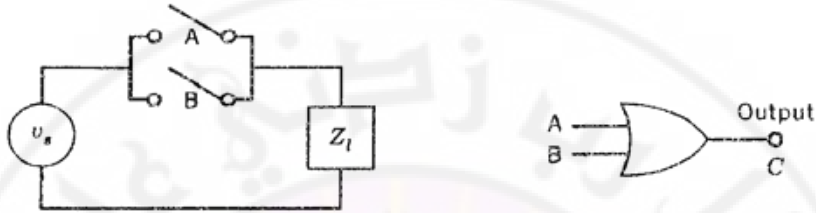
لذلك، من أجل هذا السبب استخدمت الإشارة (+) لتمثل وظيفة OR المنطقية لأن استعمال هذه الإشارة يتوافق مع المعطيات الواردة في الصفوف الثلاثة الأولى من الجدول. ومن خلال التمعن في الصف الرابع فقط من جدول الحقيقة نرى الفرق بين مفهوم معادلة الجمع الحسابية ومعادلة الجمع المنطقية حيث نلاحظ، في هذه الحالة، أن:

$$(1 + 1 = 1 !!)$$

لذلك، سنعتمد الإشارة (+) في التعبير عن العلاقة المنطقية OR، ويجب الانتباه عند التعامل مع قيم حسابية في معادلة OR منطقية.

ويمكن، أيضاً، تمثيل البوابة OR بالدارة المبينة في الشكل 5-10 حيث يوجد مفتاحان (مبدّلان) A و B على التوازي مع بعضهما، في الخط بين منبع الإشارة

(V_S) وإخمل. ويظهر الجهد (V_S) على الحمل إذا كان أحد المفتاحين A و B بحالة إغلاق.



شكل 5-10- بوابة OR بمفتاحين

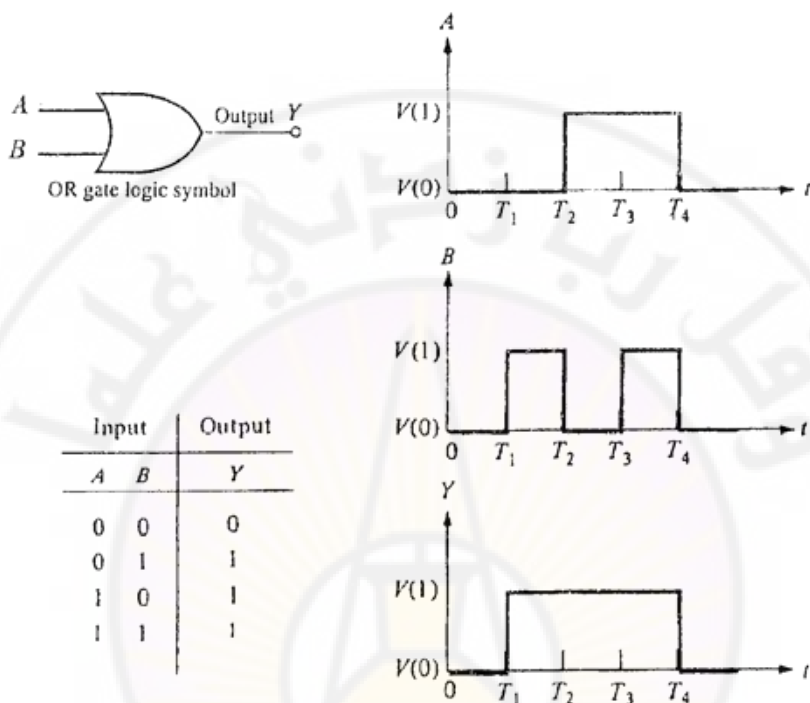
وبصورة عامة، يكون لبوابة OR مدخلان أو أكثر ومخرج واحد وتعمل بموجب التحديد التالي:

يصبح خرج البوابة OR في الحالة 1 ، إذا أصبح أحد المدخل فقط في الحالة 1.

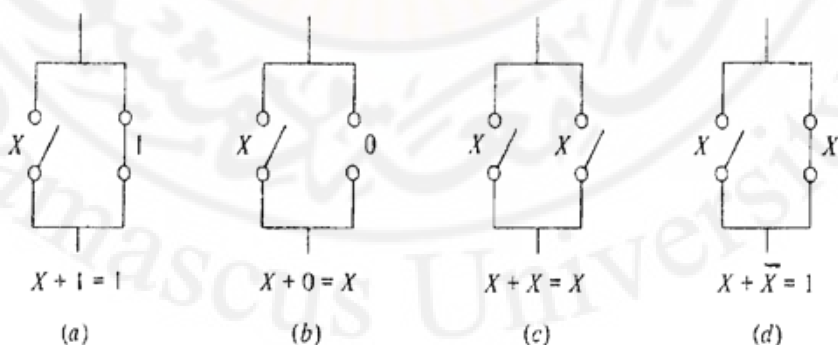
ونبين في الشكل 5-11 رمز بوابة OR وإشارتي دخل (منطق موجب) تظهران في المواقع المحددة، حيث تتغير الإشارتان بين الحالتين 1 و 0 في هذه المواقع، ويظهر جهد الخرج، أيضاً، في الموقع المحدد حسب ما يتطابق مع جدول الحقيقة. وعندما يكون لبوابة عدد N مدخل كما يبينه الشكل a-11-5، يعبر عن الخرج بالشكل المنطقي التالي:

$$Y = A + B + C + \dots + N$$

ويمكن تلخيص ما أوردناه عن دائرة OR وشروط عملها وذلك بالرجوع إلى الشكل 5-12 حيث يقدم مخططات الدارة التي تبين قوانين تأسيس معادلاتها المنطقية.



شكل 5-11- بوابة OR ذات مداخلين وجدول الحقيقة لها وأشكال الجهود من أجل منطق موجب



شكل 5-12- مخططات دائرة OR تبين قوانين تأسيس معادلاتها المنطقية

5-5- البوابة NOT أو INVERTER:

تعطي البوابة NOT المتمم المنطقي لإشارة الدخل. ونقول عنها إنها تنفي أو تعكس إشارة الدخل. بمعنى أنه يكون الخرج في الحالة 1 إذا لم يكن الدخل في الحالة 1 أي إذا كان الدخل في الحالة 0. وحيث إنه، في نظام ثنائي، يوجد فقط مستويان ممكنان للإشارة، المستوى $V(0)$ والمستوى $V(1)$ ، فعندما يكون الدخل في المستوى $V(0)$ يكون الخرج في المستوى $V(1)$ والعكس صحيح. ويمكن اعتبار العلاقتين التاليتين صحيحتين:

$$0 = \text{NOT } 1 = \bar{1}$$

$$1 = \text{NOT } 0 = \bar{0}$$

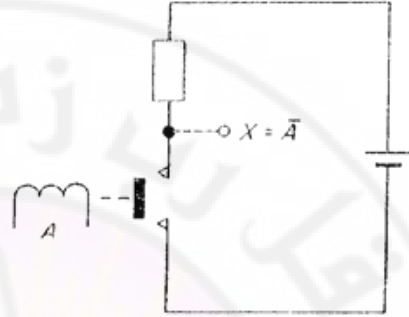
ويُمثل المتغير المتمم برمز يتضمن خطأ فوق الحرف أو الرقم.

يبين الشكل 5-13 بوابة NOT ذات حاكمة من النوع ذي التماسات المفتوحة عادة (Normally Open, N/O). وكذلك جدول الحقيقة لها. وعندما تكون الحاكمة غير مفعلة (أي لا يوجد جهد كهربائي مطبق عليها)، وهذا يناسب الحالة: $(A = 0)$ ، تكون إشارة الخرج في المنطق (1)، أي $(X = 1)$ ، وعندما تُفعل الحاكمة، أي عندما يصبح $(A = 1)$ تغلق التماسات ويهبط جهد الخرج إلى المنطق (0)، أي يصبح $(X = 0)$. ويمكن اعتماد النتيجة التالية وهي: $(X = \bar{A})$.

ويبين الشكل 5-14 بوابة NOT ذات ترانزستور. ويبدو أنه عندما يكون الدخل عند مستوى الأرض (المستوى 0) أي $(A = 0)$ ، فإن المقاومتين (R_2, R_1) تتعلان وصلة القاعدة-الباعث منحازة عكسياً، وهذا يقود الترانزستور إلى حالة القطع، ويصبح تيار المجمّع صفراً، ويصبح جهد الخرج عند المستوى الأعلى أي:

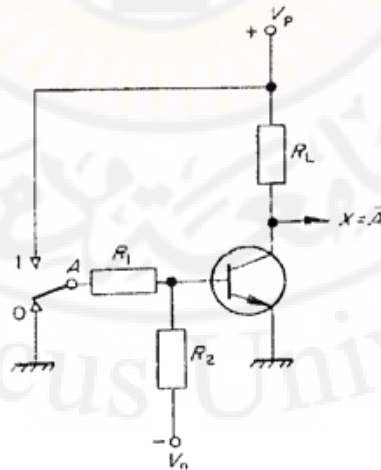
$$(X = 1 = \bar{A})$$

A	$X (= \bar{A})$
0	1
1	0



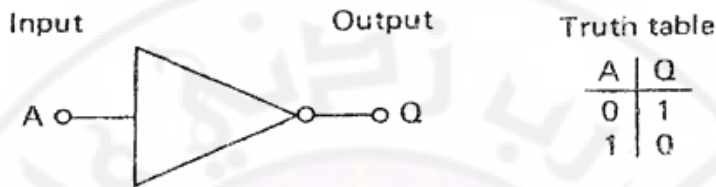
شكل 5-13 • بوابة NOT ذات سماكة وجدول حقيقة لها

إن جهد الخرج يعتمد على التيار المار في مقاومة الحمل. فعندما تنتقل A إلى المستوى 1، يمكن أن يصبح جهد القاعدة-الباعث كبيراً بما يكفي ليصبح الترانزستور بحالة إشباع • يهبط جهد الخرج إلى المستوى 0، أي يصبح: $(X = 0 = \bar{A})$.



شكل 5-14 - بوابة NOT ترانزستورية

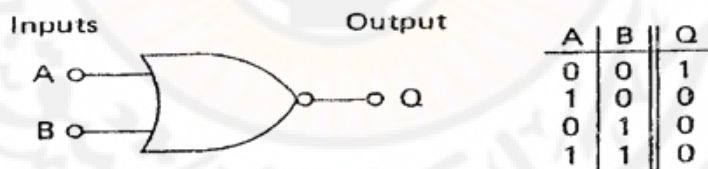
يبين الشكل 5-15 رمز بوابة NOT وتقرأ العلاقة بين الدخول والخرج كما يلي: الخرج هو نفي الدخول أو هو متمم للدخول.



شكل 5-15 - رمز بوابة NOT وجدول الحقيقة لها

5-6 - البوابة NOR:

تكافئ البوابة NOR بوابة OR متبوعة ببوابة نفي أو عاكس NOT. يبين الشكل 5-16 رمز هذه البوابة وجدول الحقيقة لها. ترمز الدائرة الصغيرة عند الخرج إلى حالة النفي.



شكل 5-16 - رمز بوابة NOR ذات مدخلين وجدول الحقيقة لها

5-7 - البوابة NAND:

تكافئ البوابة NAND بوابة AND متبوعة ببوابة نفي أو عاكس NOT. يبين الشكل 5-17 رمز هذه البوابة وجدول الحقيقة لها. ترمز الدائرة الصغيرة عند الخرج إلى حالة النفي.

Inputs

Output



A	B	Q
0	0	1
1	0	1
0	1	1
1	1	0

شكل 5-17- رمز بوابة NAND ذات مدخلين وجدول الحقيقة لها

الفصل السادس

التحكم المنطقي القابل للبرمجة Programmable Logic Control

مقدمة [8,9, 21-24,35].

استعملت المتحكمات المنطقية القابلة للبرمجة PLC في الصناعة منذ عام 1969 وتعتبر الوسائل الأكثر انتشاراً للتحكم في عمل الآلات وفي عمليات التصنيع. وبحلول العام 1974 استخدمت المعالجات الميكروية لتحديد أداء الـ PLC.

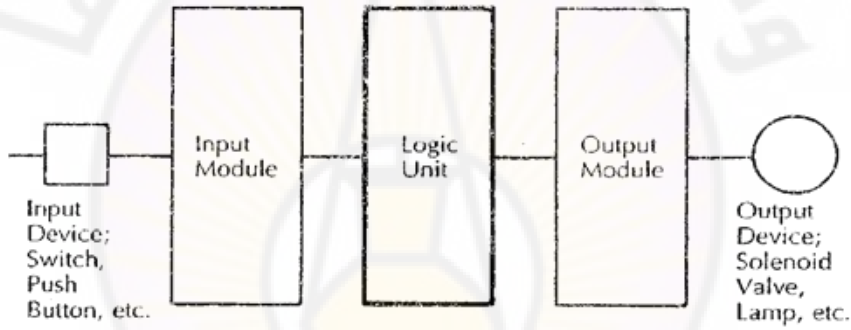
المتحكم المنطقي PLC - هو جهاز إلكتروني رقمي مبني على المعالج الصغير (microprocessor)، يستخدم ذاكرة قابلة للبرمجة تقوم بتخزين التعليمات من أجل تنفيذ وظائف متنوعة مثل العمليات المنطقية (logical functions) والتوقيت (timing) والمتابعة (tracing) والعد (counting) والعمليات الحسابية (arithmetics) وذلك للتحكم بالآلات والمعالجات المختلفة.

يبين الشكل 1-6 مخططاً صندوقياً حيث تظهر العناصر الأساسية للـ PLC وما هي مكوناته بأبسط أشكاله. يتألف نظام PLC مما يلي:

- منبع تغذية.
- عنصر مدخل مثل مفتاح أو حساس ...إلخ.
- وحدة مدخل حيث تشكل جزءاً من الـ PLC.
- وحدة منطقية وتشكل الدماغ داخل الـ PLC.
- وحدة مخرج وتشكل جزءاً من الـ PLC أيضاً.

- عنصر مخرج مثل حاكمة أو مصباح أو مقلع محرك... إلخ.

إن منظومة PLC هي في الواقع جهاز صمم خصيصاً لاستقبال إشارات دخل ولإصدار إشارات خرج وفق منطق البرنامج. وهي ذات أحجام وأشكال مختلفة بدءاً من وحدات صغيرة مستقلة ذات إمكانيات محدودة من ساعات الدخل والخرج إلى وحدات كبيرة تشكل جزءاً من منظومات عمل تتمتع بوجود مئات أو حتى آلاف من المدخل والمخرج. يبين الشكل 2-6 شكلاً من منظومات PLC.



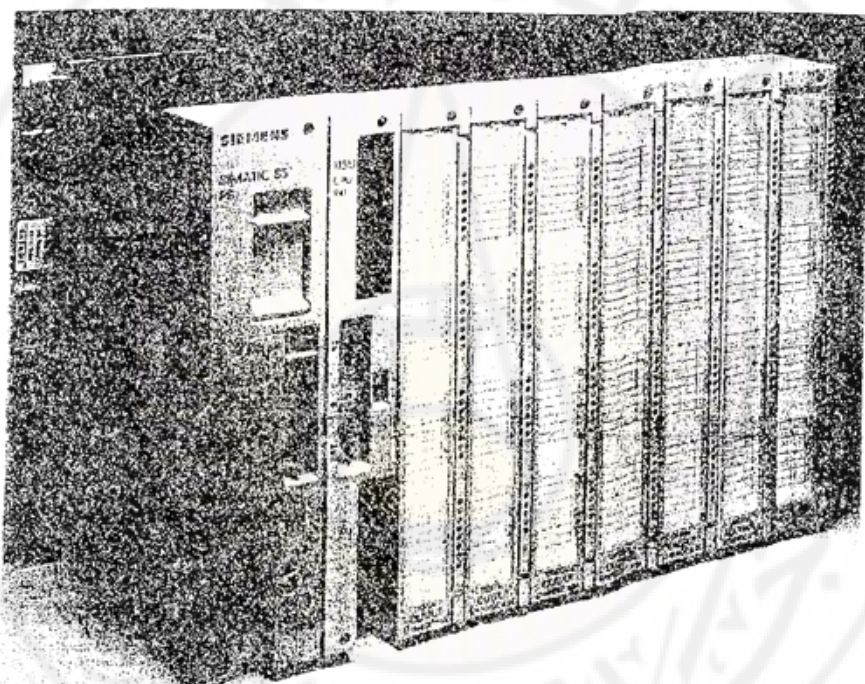
شكل 1-6 العناصر الأساسية لنظام PLC

قبل التعرف على الـ PLC استخدمت معظم تطبيقات التحكم في الآلات أدوات ميكانيكية للتحكم مثل المفاتيح أو المبدلات (Switches) وحاكمات (Relays). من الضروري أن نفهم العمل الأساسي للحاكمات ونظم التحكم بالحاكمة قبل أن نركز على موضوع الـ PLC.

1-6 - الحاكمات واستخدامها:

الحاكمات هي مفاتيح (مبدلات) تُشغّل كهربائياً وتتمتع بعدة استخدامات كبيرة حيث تستعمل كأجهزة "منطقية" أو من أجل التحكم بالقدرة (عندما تسمى

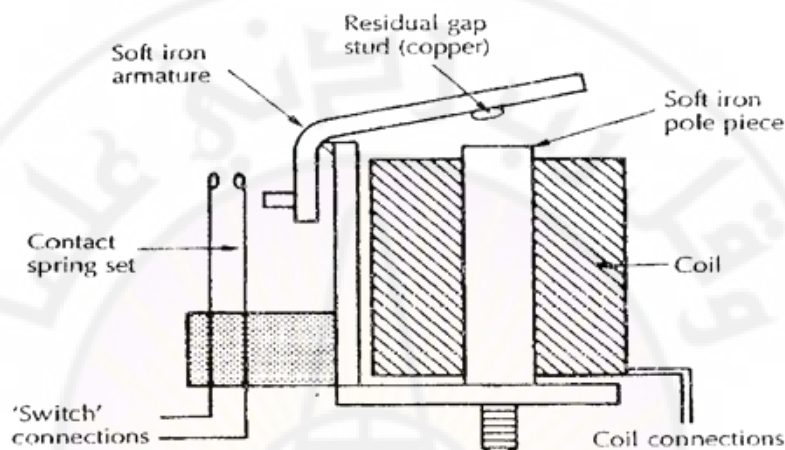
غالباً باسم Contactors). يبين الشكل 3-6 بنية حاكمة كهرومغناطيسية. تتألف الحاكمة من ملف، وعندما يمر فيه تيار كهربائي في الملف يظهر مجال مغناطيسي يجذب إليه ذراعاً. يسبب هذا حركة ميكانيكية تشغل مفتاحاً (مبدلاً) أو مجموعة مبدلات.



شكل 2-6- Siemens 115 PLC

يوجد العديد من الأنواع المختلفة من الحاكمات ولها جميعها نفس المبادئ الأساسية من البنية والتشغيل. إلا أنها قد تختلف في الحجم والشكل بحسب قيمة القدرة الكهربائية التي تتعامل معها وكذلك عدد ونوع التماسات.

إن الحاكمة في الشكل 3-6 هي ذات تماسات مفتوحة ويسمى هذا النوع من الحاكمت بالنوع المفتوح عادة (Normally Open ، N/O) وتغلق فيها التماسات



شكل 3-6- البنية الأساسية لحاكمة.

إذا طبق على الحاكمة جهد كهربائي مناسب. وهناك نوع آخر من الحاكمت شائع تفتح فيها التماسات إذا طبق على الحاكمة جهد كهربائي مناسب ويعرف هذا النوع بالنوع المغلق عادة (Normally Closed، N/C). يعبر عن الحاكمة في معظم منططات نظم التحكم برموز خاصة. وبين الشكل 4-6 بعضاً منها.

1-1-6 معيارية الحاكمة:

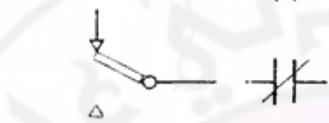
إن التيار الضروري لتشغيل ملف الحاكمة هو تيار صغير نسبياً عند مقارنته مع التيار الذي يمكن أن تتعامل به تماسات الحاكمة. على سبيل المثال، يكون تيار ملف بقيمة (0.25 A) كافياً تماماً لتمرير (20 A) خلال تماسات الحاكمة.



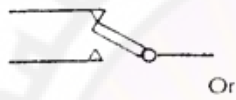
Relay, 250 Ohm coil, 7 contact set



Relay, normally open. Make when operated contacts

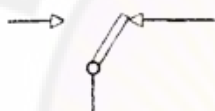


Relay, normally closed. Break when operated contacts



Or

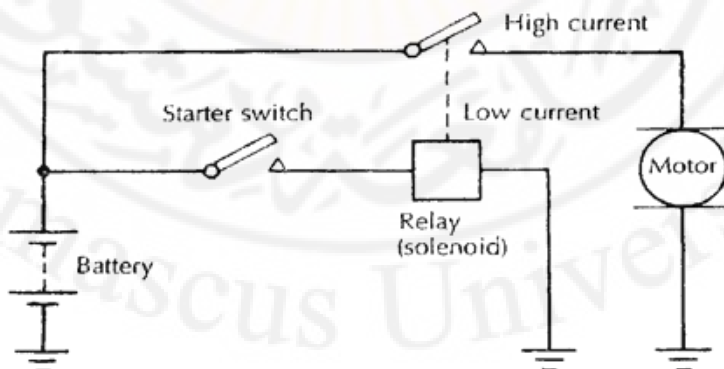
Relay, changeover contacts



is shown as



شكل 4-6- رموز نموذجية لحاكمة



شكل 5-6- دائرة إقلاع محرك

يبين الشكل 5-6 مثلاً عن دائرة مألوفة جداً وهي دائرة نظام إقلاع لمحرك. إن الحاكمة المستعمنة هنا هي من النوع المفتوح عادة (N/O). وتسمى في السوق اصطلاحاً باسم (Solenoid).

2-1-6- حالة المنطق:

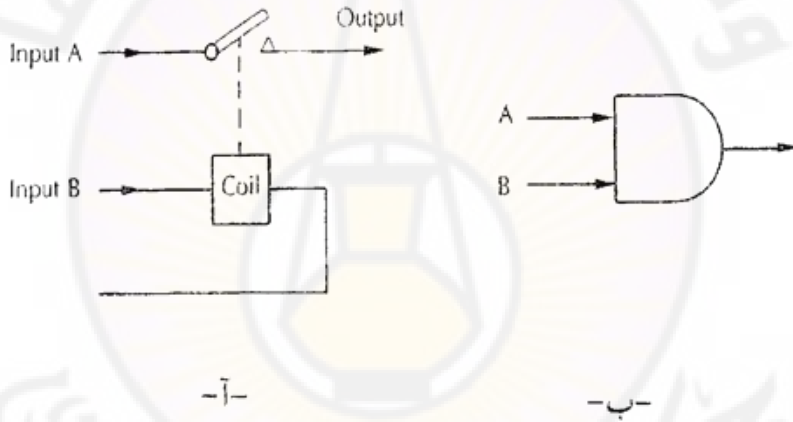
إن مفهوم "المنطق" كما هو مطبق في أنظمة التحكم قد طرحناه سابقاً عندما كنا نرغب أن نشغل كلاً من المبدّل والمصباح بطرق مختلفة. إن منطق نظم التحكم يتعامل مع السبب والنتيجة وفيما إذا كانت الأشياء حقيقية أو غير حقيقية.

دعنا نستعرض مثلاً بسيطاً جداً. يبين الشكل 6-6-أ جزءاً من دائرة حاكمة حيث يوجد هنا مدخلان، A و B . فمن أجل أن نحصل على خرج، يجب أن يكون كل من A و B موجودين (حتى يُشغّل الملف ويُغلق التماسان). يمكن أن نبين هذا برمز الدارة المنطقي في الشكل 6-6-ب. يمكن أن تكون الإشارة المقدمة إلى المدخل A أو B هي $+12\text{ V}$ مثلاً. عندما تكون هذه الإشارة موجودة يمكن أن نقول إنه يطبق المنطق (1)، وإذا لم يكن هناك أي جهد مطبق نقول إنه يطبق المنطق (0).

يمكن أن نضع في الجدول المبين التشكيلات الممكنة لهذه الإشارات لما نسميه بـ بوابة (AND) ذات مدخلين. تفيد هذه التسمية بأنه يكون هناك جهد خرج إذا تواجد كل من المدخلين A و B .

A	B	Output
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

يعرف هذا الجدول باسم جدول الحقيقة "Truth Table"، الذي نلاحظ فيه أننا نحصل على خرج عندما يكون كل من A و B موجودين معاً. مثلاً، إذا طبق جهد مقداره 12 V على المدخل B فإن الحاكمة سَتُسَّعَلُ وسيغلق التماسان، إلا أنه بسبب عدم تطبيق أي جهد على المدخل A فإنه لن يكون هناك أي خرج. إن هذه الحالة مبينة في الصف الثالث من الجدول.



شكل 6-6- جزء من دائرة حاكمة ورمزها المنطقي

3-1-6-- دائرة الإمساك (الإقفال) The Latch Circuit:

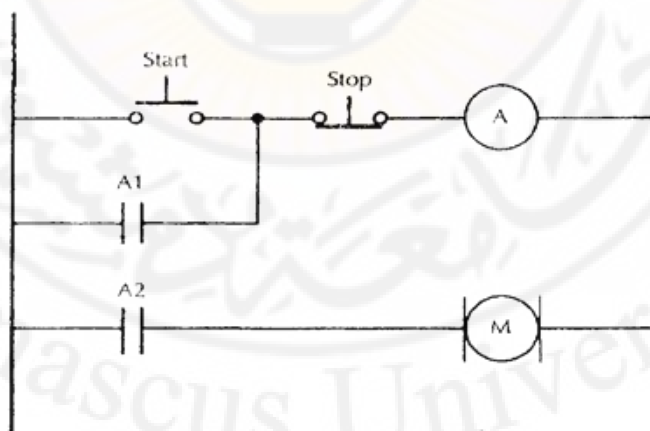
إن هذه الدارة هي دائرة "ذاكرة" وتستعمل بشكل واسع للتحكم بالقدرة المقدمة للآلات. يبين الشكل 7-6 دائرة تعمل وفق الترتيب التالي: عند الضغط على زر الإقلاع فإن المحرك M سيقف ويستمر في العمل حتى بعد تحرير زر الإقلاع.

إن السبب الرئيسي لاستعمال هذه الدارة هو لداعي السلامة. لنفرض أنه قد حدث انقطاع للقدرة الكهربائية فسيوقف عمل دائرة الإمساك، وعند رجوع القدرة

الكهربائية فإنه يتوجب إعادة الإقلاع من جديد بالضغط على زر الإقلاع ثانية. إن زر التوقف (stop) يقوم بنفس الوظيفة التي تحدث عند انقطاع القدرة الكهربائية.

إن طريقة عمل الدارة المبينة تتم وفق ما يلي:

- اضغط على زر الإقلاع.
- يمر التيار في الملف A فيغلق التماسان A1 و A2 وهما من النوع المفتوح عادة (N/O).
- يقدم التماس A2 التيار إلى المحرك M.
- يحافظ التماس الآخر A1، الذي هو تماس الإمساك، على تمرير التيار في الملف حتى وإن أصبح زر الإقلاع بحالة فصل (off).
- عندما يُضغط على زر التوقف أو عندما تنقطع القدرة الكهربائية يُقطع تيار الإمساك وينتهي تشغيل الحاكمة فيتوقف المحرك.



شكل 6-7- دائرة الإمساك

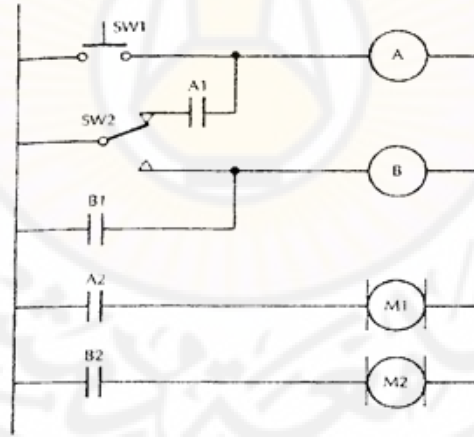
مثال 6-1:

يبين الشكل 6-8 دائرة ذات محركين M1 و M2 وحاكمتين - الحاكمة A ذات تماسين A1 و A2، والحاكمة B ذات تماسين B1 و B2. المطلوب كتابة طريقة التشغيل بتطبيق نفس التعليل الموصوف في دائرة الإمساك. ولنفرض ما يلي:

- أولاً، نشغل الزر SW1.
- ثانياً، نشغل الزر SW2.
- ثالثاً نشغل الزر SW1 ونحرره.

كيف سيعمل المحركان؟

الحل:



شكل 6-8 - دائرة المثال 6-1

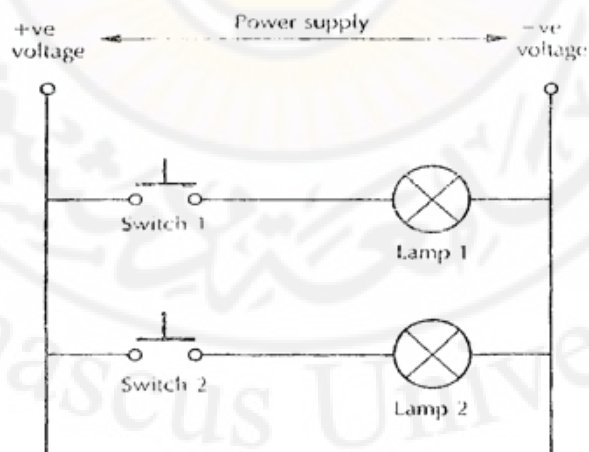
نشل SW1 - تعمل الحاكمة A، يغلق التماسان A1 و A2. تكون الحاكمة A الآن بحالة إمساك بواسطة التماس A1، يعمل المحرك M1.

نشغل SW2- تفصل دائرة الحاكمة A، يتوقف اخرك M1، تعمل الحاكمة B، وتدخل حالة الإمساك عن طريق التماس B1. يقدم التماس B2 القدرة إلى اخرك M2 الذي يستمر في الدوران.

نشغل SW1- تعمل الحاكمة A من جديد وتدخل حالة الإمساك، يعمل اخرك M1. يستمر كلا اخركين M1 و M2 في الدوران.

مثال 6-2:

يبين الشكل 9-6 مثالاً بسيطاً جداً لدائرة يمكن أن تستخدم في المترل مثلاً. تحتوي هذه الدارة البسيطة على "منطق" واضح جداً بمعنى أنه عندما يكون المبدّل بحالة وصل "ON" يكون المصباح بحالة وصل وعندما يكون المبدّل بحالة فصل "OFF" يكون المصباح بحالة فصل. يكون خطا المبدلين وكذلك خطا المصباحين مستقلين في العمل عن بعضهما البعض. وحيث إنهما موصلان على التوازي فإنه لا يؤثر أحدهما على الآخر.



شكل 9-6

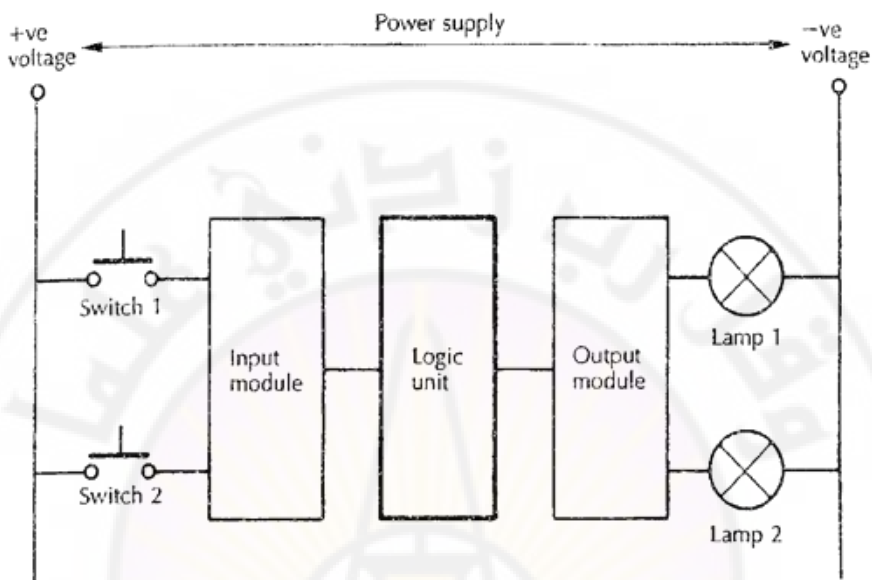
إذا رغبنا الآن أن ندخل منطقاً أكثر تعقيداً إلى درجة ما، وليكن مثلاً أن نفصل المصباح (1) عندما يكون المصباح (2) بحالة وصل فإننا يجب أن نعيد التصميم والتوصيل السلكي للدارة.

وإذا رغبنا أن نغير المنطق وليكن مثلاً أننا سنسمح للمصباح (2) أن يصبح فقط بحالة وصل إذا أصبح كلا المبدلين بحالة وصل. وأن نسمح للمصباح (1) أن يصبح بحالة وصل إذا جعلنا أيّاً من المبدلين بحالة وصل فإننا علينا أن نعيد التصميم والتوصيل السلكي للدارة من جديد. إن أنظمة التحكم في الآلات هي أكثر تعقيداً بكثير من هذا المثال البسيط.

يتألف نظام تحكم ما عادة من مئات من الحاكومات موصلة بآلاف الكيلومترات من الأسلاك وموضوعة في خزائن تحكم ضخمة. ولابد من وجود مئات من نقاط التوصيل والوصلات.

بالإضافة إلى استخدام الحاكومات كعناصر في خطوط القدرة لدارة كهربائية فإن معظم الحاكومات في خزانة تحكم نموذجية استخدمت كأدوات منطقية لتتبعاً من قوانين العمليات والتحكم. لقد أمكن استخدام منظومات الـ PLC القيام بجميع الوظائف المنطقية التي كانت تقوم بها الحاكومات واستبدال مئات الحاكومات بوحدة إلكترونية أكثر تماسكاً.

يبين الشكل 6-10 كيف يمكن أن نستخدم الـ PLC في المثال البسيط المبين. يمكن من المخطط تمييز عدة اختلافات، أولاً، إن المبدلات ليست متصلة مباشرة مع المصابيح. بدلاً عن ذلك توصل المبدلات إلى وحدات الدخل (Input Modules)، وتوصل المصابيح إلى وحدات الخرج (Output Modules). ثانياً، لا تتصل وحدات الدخل مع وحدات الخرج مباشرة مع بعضهما.



شكل 10-6 - نظام متحكم به بواسطة PLC

توصل وحدات الدخل والخرج عن طريق الوحدة المنطقية أو المعالج عندما تتحقق شروط البرنامج. فيما يخص الشكل 10-6 يتم برمجة الوحدة المنطقية لتوصل المبدل (1) إلى المصباح (1) ، و / أو المبدل (2) إلى المصباح (2). يتم برمجة الوحدة بكتابة البرنامج في المعالج من لوحة مفاتيح. يبدو البرنامج تماماً مثل مخطط سُلّمي كهربائي (Electrical Ladder Diagram).

في النظام المبين في الشكل 9-6 يتدفق التيار الكهربائي من منبع الجهد، خلال المبدل ومنه إلى المصباح المقصود. تتبع القدرة الكهربائية ببساطة الموصلات السلكية إلى المصباح، وعندما يفصل المبدل تنقطع القدرة الكهربائية عن المصباح.

في النظام المتحكم به بواسطة الـ PLC تأتي القدرة الكهربائية من منبع الجهد إلى وحدة الدخل خلال المبدل. تتحسس وحدة الدخل بوجود هذا الجهد، وترسل

بدورها، جهد إشارة صغير إلى الوحدة المنطقية أو المعالج. يُعزَل الجهد من المبدل عن إشارة الجهد التي ترسلها وحدة الدخل إلى الوحدة المنطقية. إن هذا العزل ضروري لأن شريحة المعالج الضعيفة تعمل عند مستويات من التيار والجهد منخفضين جداً. يتم العزل عموماً بواسطة مركبة إلكتروني تعرف بالمقارن البصري (Opto Coupler) الذي يحمي شريحة المعالج.

في المثال المبين في الشكل 6-10 يستلم المعالج إشارة من وحدة الدخل عندما يغلق المبدل (1)، ويرسل إشارة إلى وحدة الخرج كما يوجّه بذلك البرنامج. يوجه البرنامج الإشارة إلى طرف الخرج المناسب من أجل المصباح (1) عندما يستقبل إشارة من طرف وحدة الدخل الموصلة إلى المفتاح (1). إن جميع هذه الأمور تستغرق تقريباً بحدود من 5 إلى 10 ميلي ثانية.

عندما يُفَعَّل المفتاح (2) يتم إجراء عمل مماثل بواسطة المعالج، إلا أن الإشارة توجه إلى طرف وحدة الخرج من أجل المصباح (2).

في النظام المتحكم به بواسطة PLC يكون من السهل تغيير منطق الدارة، أي جعل المبدلات تشغّل المصابيح بترتيب أو تتابع مختلف دون الحاجة إلى إعادة تصميم أو توصيل الدارة.

في البدء، ونتيجة للكلفة العالية نسبياً لمنظومات الـ PLC فقد تحدد تطبيقاتها في أنظمة التحكم الضخمة حيث يكون عدد الحاكّمات التي يمكن أن تحل الـ PLC مكانها يغطي كلفتها الأولية. أما في السنوات الأخيرة فقد انخفضت كلفة الـ PLC كثيراً وقد أصبح استخدامها مفيداً جداً في الكثير من تطبيقات التحكم.

6-2- مزايا التحكم باستخدام الـ PLC:

مع أن الحاكمة هي جهاز موثوق به إلا أن استخدام مجموعة عمل تتضمن مئات الحاكّمات لنظام تحكم موضوع في خزانة تحكم يؤدي إلى المشاكل التالية:

- الحجم البيئي للخزانة.
- كلفة شراء الحاكمت والتركيب والتسليك (التوصيل السللكي) ها.
- مورتقية النظام كاملاً.
- تعقيد النظام وخصوصاً عند محاولة إيجاد الخطأ.

وبالإضافة إلى هذا، إن أي تغييرات في المنشأة أو منطق أو تتابع تشغيل الآلات سيفرض إعادة التوزيع البيئي والتسليك للحاكمات. وإن تشخيص الأخطاء وكشف المشاكل يكون صعباً على وجه الخصوص عندما نواجه أعداداً كبيرة من الحاكمات والأسلاك والتوصيلات في نظام تحكم نموذجي. إن نظام PLC يمكن أن يحل مكان جميع الحاكمات التي تستخدم لتتاسم منطق تحكم. ويمكن أن يقدم وسائل أفضل بكثير مما تقدمه الأجهزة الكهروميكانيكية للتحكم بمنشأة أو بالآلات.

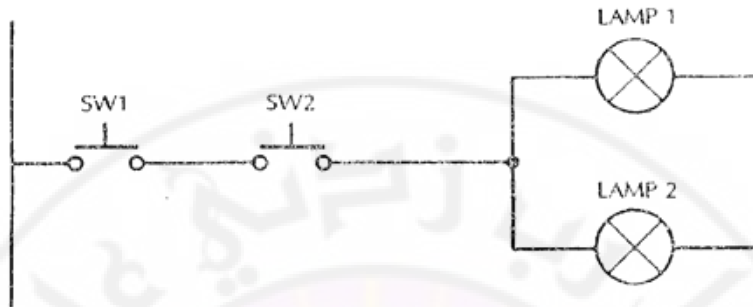
مثال 6-3:

أعد رسم الدارة المبينة في الشكل 6-9 لتعطي منطق التحكم التالي:

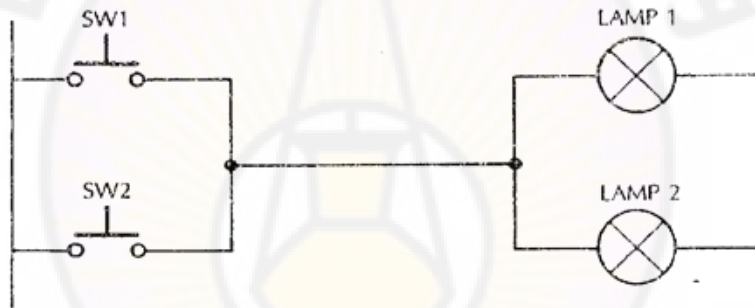
- آ- يجب ضغط كلا المفتاحين (المبدلين) (1) و (2) لتشغيل المصباحين (1) و (2) في نفس الوقت. إن ضغط مبدل واحد فقط لن يضيء أي مصباح ولا يمكن أن يعمل المصباحان كل منهما مستقلاً عن الآخر.
- ب- أي من المبدلين (1) أو (2) سيشتغل كلا المصباحين (1) و (2). لا يمكن أن يعمل المصباحان كل منهما مستقلاً عن الآخر.

الحل:

يبين الشكل 6-11 الحل للطلب (آ) ويبين الشكل 6-12 الحل للطلب (ب).



شكل 11-6



شكل 12-6

3-6 - أسس الـ PLC:

يمكن أن نقدم تشبيهاً جيداً لاستخدام نظم الـ PLC في التحكم وهو عمل الدماغ البشري في التحكم في جسم الإنسان. يماثل الـ PLC الدماغ، بينما تماثل العناصر الغازية والهيكلية والكهروميكانيكية العضلات.

لنعتبر، مثلاً، عملية إزاحة صندوق من موقع إلى آخر. أولاً، يجب أن نعلم إلى أين ننوي أن نحرك الصندوق ومتى نفعل ذلك. إن هذا هو "برنامج" أي توصيف لما نريد أن نفعله. إن الاعتبار الثاني هو من أجل الشخص الذي عليه أن يحرك

الصندوق ليحدد موقعه الأولي. من الواضح أنه يستخدم عيناه ليفعل ذلك مع أنه يمكن أن يستخدم النمس (لن يكون هذا بنفس فاعلية النظر ما لم تكن الغرفة مظلمة).

إن هذه الرسائل من حواسنا هي المدخل (Inputs) إلى الدماغ (PLC). حينئذ، يقوم الدماغ المتحكم به بواسطة البرنامج بإصدار تعليمات إلى الأذرع لتصل إلى الصندوق وتمسكه وإلى القدمين لتتحنيا من أجل رفع الصندوق. هذه هي المخارج (Outputs) من الدماغ الذي يطلب تسيير القدرة (والطاقة) إلى العضلات المناسبة (Actuators). يوجه البرنامج، من خلال الدماغ، تعليمات إلى مجموعات عضلات أخرى في تتابع منسق ليحرك الصندوق إلى الموقع الجديد. ويتركه.

إن هذه المهمة التي نفترضها بسيطة على ما يبدو تتضمن عدة حلقات تحكم دخل/خرج متداخلة فيما بينها، وغالباً ما تعمل على التوازي وهي معقدة.

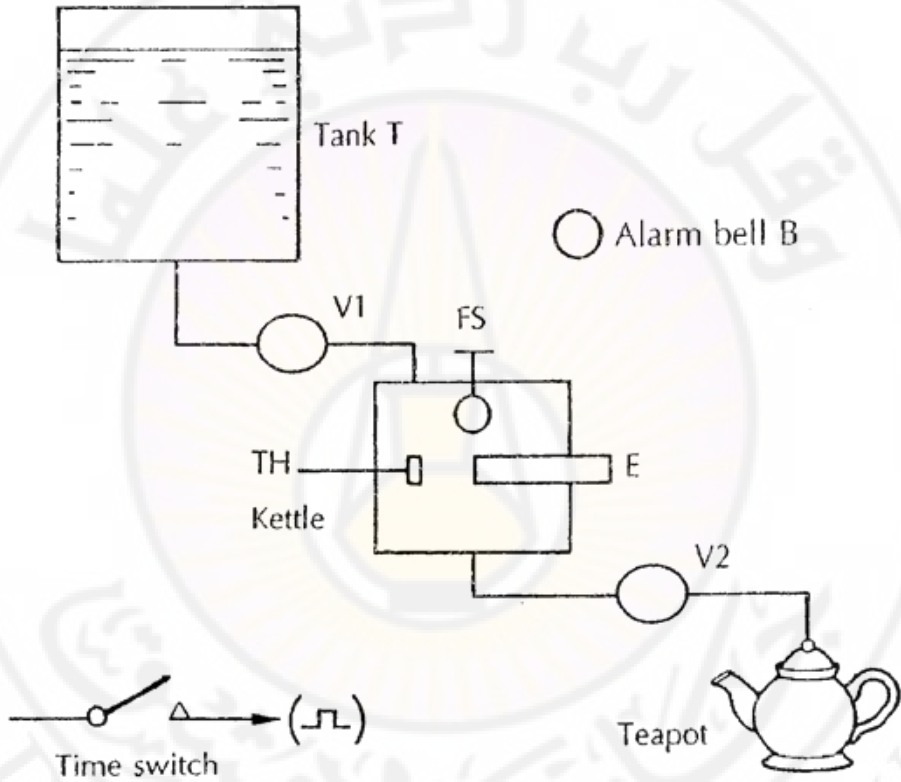
من المثال السابق يمكن أن نرى الـ PLC أنه "الدماغ" المتحكم لنظام تحكم يتطلب مدخل ومخارج وقائمة من التعليمات تدعى "البرنامج" من أجل التحكم بآلة خاصة. ومن أجل أن نقدم مفهوم تحكم PLC بنظام بسيط، نعطي فيما يلي مثلاً متداولاً عند الناس وهو نظام تحضير الشاي آلياً كل صباح ولمدة أسبوع من خزان ماء يملأ مرة كل أسبوع.

6-3-1- مثال عن نظام تحضير الشاي The 7-day teamaker example:

يبين الشكل 6-13 النظام الذي يتألف من:

- خزان ماء.
- غلاية (جهازية بعنصر تسخين).
- صمامان ماء V1 و V2.
- حساسات تتضمن مفتاح عوامة (FS) وترموستات (TH).
- أنابيب توصيل.

- مبدّل (مفتاح) توقيت وجرس تنبيه.
- إبريق الشاي.



شكل 6-13- مخطط لعملية تحضير الشاي لمدة سبعة أيام

علينا أن نحدد الآن ماذا نريد من النظام أن يفعل- يصنع شايًا كل صباح ولمدة أسبوع مع عملية إملاء واحدة لخزان الماء مرة كل أسبوع.

1- عمل مُحَضَّر الشاي:

إن العمل المطلوب من مُحَضَّر الشاي من أجل تحقيق المتطلبات السابقة هي كما يلي:

- يفتح الصمام V1 ويملأ الماء الغلاية K ويستمر هكذا إلى أن يعمل مفتاح العوامة FS.
- يؤدي هذا إلى فصل الصمام V1 وتوصيل عنصر التسخين E.
- يغلي الماء في الغلاية ويعمل التيرموستات TH.
- يؤدي هذا إلى فصل عنصر التسخين E وتوصيل الصمام V2.
- يتدفق الماء الساخن في إبريق ويجب على الصمام V2 أن يغلق عندما يمتلئ الإبريق.
- يرن جرس التنبيه لإعلام المستخدم بأن الشاي أصبح جاهزاً.
- يعتمد النظام على المستخدم ليستبدل الإبريق، الممتلئ بالشاي، كل يوم وليمنى إلخزان كل أسبوع. إن تتابع الأحداث هو "توصيف البرنامج".

2- المداخل والمخارج:

يجب استخدام PLC للتحكم بهذا النظام ويجب تعريف المداخل والمخارج لنظام الـ PLC قبل تصميم البرنامج.

في مثال مُحَضَّر الشاي، ما هي المداخل؟

المدخل: هي الإشارات والمعلومات من احساسات التي تبلغ الـ PLC ماذا يحدث لنظام موضوع التحكم. تقوم المداخل بإعلام الـ PLC بما يجري. إن المبدلات (Switches) والتيرموستات والمحسّات (Transducers) ... إلخ، هي أجهزة دخل.

المخارج: هي الأوامر الصادرة عن الـ PLC من أجل تنفيذ مهمة ما. يجب إعلام تجهيزات الخرج (محركات، منافذ لصمامات، مضاييح، إلخ...) متى تبدأ عملها. نعود الآن إلى مثالنا (محضّر الشاي) حيث يمكن أن نعرّف كل عنصر كجهاز دخل أو خرج ونخصص له رقم تعريف واحد كما يبدو على الجدول 1-6.

الجدول 1-6 - تخصيص أرقام التعريف

Device		Letter	Identification No.
Inputs	Time Switch	TS	1
	Float Switch	FS	2
	Thermostat	TH	3
Outputs	Valve	V1	1
	Element	E	2
	Valve	V2	3
	Alarm Bell	B	4

3- الخطوات المتضمنة في استخدام جهاز PLC:

من مثالنا السابق عن محضّر الشاي، قمنا بتعريف ما يلي:

1- البرنامج - وكيف سيعمل النظام.

2- المداخل والمخارج - قمنا بتخصيص رقم لكل منها.

نحتاج الآن أن ننجز أربعة خطوات أخرى من أجل أن نكمل تصميم نظام تحكم ذي PLC.

3- تصميم المخطط السُّلمي. يستخدم هذا مفاهيم منطق الحاكمة التي تحدثنا عنها سابقاً.

4- برمجة الـ PLC بهذه المعلومات (ويشار إلى البرمجة بالترميز Coding). ويتضمن هذا استخدام وحدة برمجة ويكون الرمز المستخدم خاصاً بالـ PLC الذي يرمّج. تكون رموز معظم الـ PLC متماثلة فيما بينها ولا تتطلب برمجة الـ PLC الأمر سوى اتباع دورة تدريب قصيرة لتعلم طريقة البرمجة.

5- اختبار الـ PLC ببرنامجه للتحقق فيما إذا كان ينجز المهمات المطلوبة. يستحسن أن يتم هذا الاختبار دون توصيل الـ PLC إلى أي جهاز (محرك، مضباح، ملف، إلخ) فقد يتعطل هذا الجهاز إذا لم يكن البرنامج يعمل بشكل صحيح.

6- إدخال الـ PLC المختبر في نظام التحكم المخصص له وإجراء الاختبار من جديد للتأكد من التشغيل الصحيح.

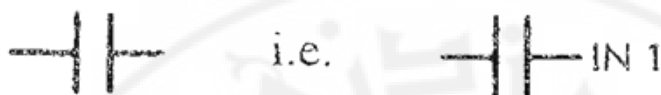
تعتبر الخطوات من 1 إلى 3 عامة حيث إن جميع أجهزة الـ PLC تحتاج إلى هذه الخطوات بغض النظر عن مراجع التعليمات الخاصة بالشركات المصنّعة للجهاز الـ PLC.

أما الخطوات من 4 إلى 6 فإنها خاصة بكل نوع من الـ PLC وذلك لأن لكل نوع له نظام تشغيل تميزه خاصان به من أجل إدخال البرنامج في الذاكرة، ومن أجل الاختبار والتركيب في الآلة المطلوب التحكم بها.

6-3-2- المخططات السُّلمية (Ladder Diagrams) والرموز المستخدمة:

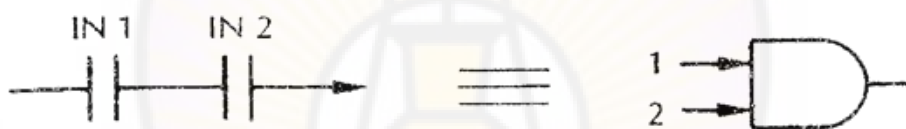
يتم الحصول على المخطط السُّلمي بتطبيق منطق الحاكمة ونتيجة لدرجة ما من الإبداع الشخصي. يمكن أن يكون هذا هو الجزء الأكثر صعوبة في تصميم النظام، لأنه، كما في جميع أعمال التصميم، يوجد عدد لا نهائي من الطرق لتحقيق مواصفات التشغيل المطلوبة.

إن الرموز المستخدمة هي التي استعرضناها سابقاً وهي رموز الحاكمة الكهرومغناطيسية. ويمكن تمثيل المداخل كما يلي:



وهذا مثلاً من النوع المفتوح عادة، وعندما تُرسل الإشارة إلى المدخل 1 يؤدي هذا إلى إغلاق التماسات.

إن تشكيل وظيفة منطق بسيط أمر سهل جداً، مثلاً، إذا كان المطلوب الحصول على بوابة "AND" ذات مدخلين 1 و 2 فإننا نضعهما على التسلسل:



وإذا كنا نريد الحصول على بوابة "OR" فإننا نضعهما على التوازي:



ويمكن تحقيق حالة "NOT" (أي لا يوجد إشارة)، وهذا بمائل حالة تماسات حاكمة موصلة عادة بحيث تفصل التماسات عندما تُشغّل الحاكمة. ويعبر عن هذا كما يلي:

تأخر الخارج إلى PLC أحياناً كما يلي:



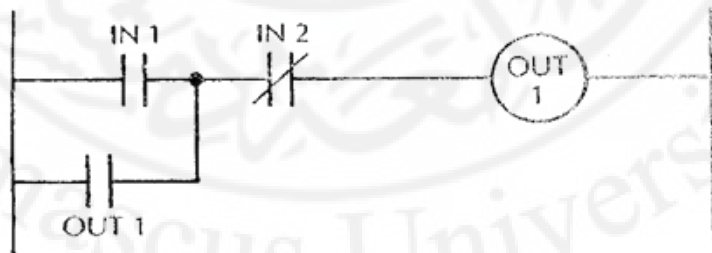
(relay coils)

6-3-3- تصميم الدارة:

مراجعة بعض دوائر التحكم التي مرت معنا سابقاً وسنرسمها على شكل سلّمى.

6-3-3-1- دائرة الإمساك:

يمكن إعادة رسم دائرة الحاكمة (دائرة الإمساك) المبينة في الشكل 6-7 وإدخالها إلى PLC كما يبينه الشكل 6-14. نلاحظ أن IN 1 هو مبدّل (مفتاح) الإقلاع (Start Switch)، وأن IN 2 هو مبدّل التوقف (Stop switch)، وأن OUT 1 هو تماس حاكمة تُنغلق عندما يزود ملف الحاكمة OUT 1 بالطاقة.



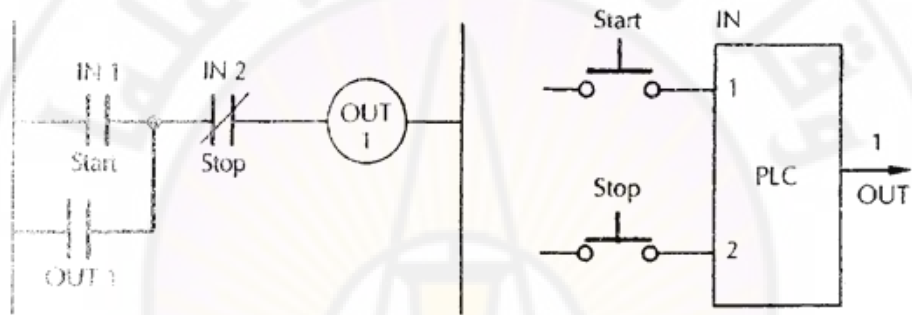
شكل 6-14- دائرة إمساك في نظام PLC

6-3-3-2- التصميم الآمن لدارات إقلاع/توقف (Start/Stop):

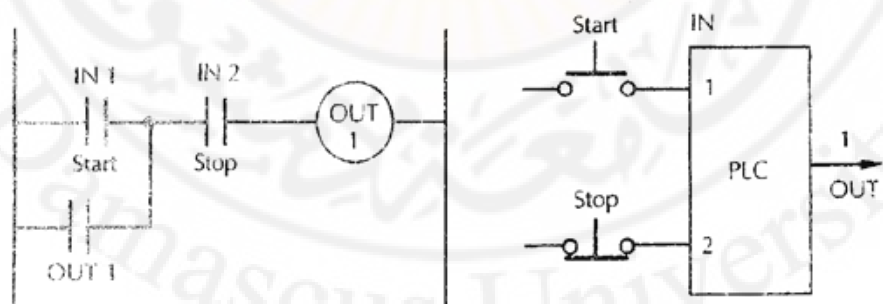
هناك طريقتان لإنتاج إشارة "توقف" من أجل دارات التحكم بالألة وذلك:

1- مفتاح "Stop" مغلق عادة كما يبينه الشكل 15-6.

2- مفتاح "Stop" مفتوح عادة كما يبينه الشكل 16-6.



شكل 15-6 - دائرة مفتوحة عادة



شكل 16-6 - دائرة مغلقة عادة

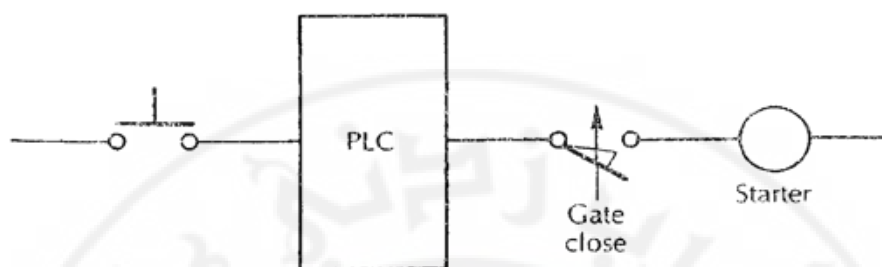
النظام 1 كما يبينه الشكل 6-15 هو نظام غير آمن بسبب أنه إذا كانت دائرة مفتاح التوقف من المفتاح إلى الـ PLC كانت دائرة مغلقة بسبب خطأ ما، فلن يكون هناك، حينئذ، إشارة توقف وستتابع الآلة عملها. ومن جهة أخرى، إذا استعمل النظام 2 كما يبينه الشكل 6-16، فإن دائرة مفتوحة سوف تؤدي إلى توقف الآلة بشكل آلي كما هو الحال فيما إذا فُعل مفتاح التوقف.

يجب أن تكون السلامة هي الاعتبار الأول عند تصميم المنطق من أجل نظم متحكم بها بواسطة الـ PLC.

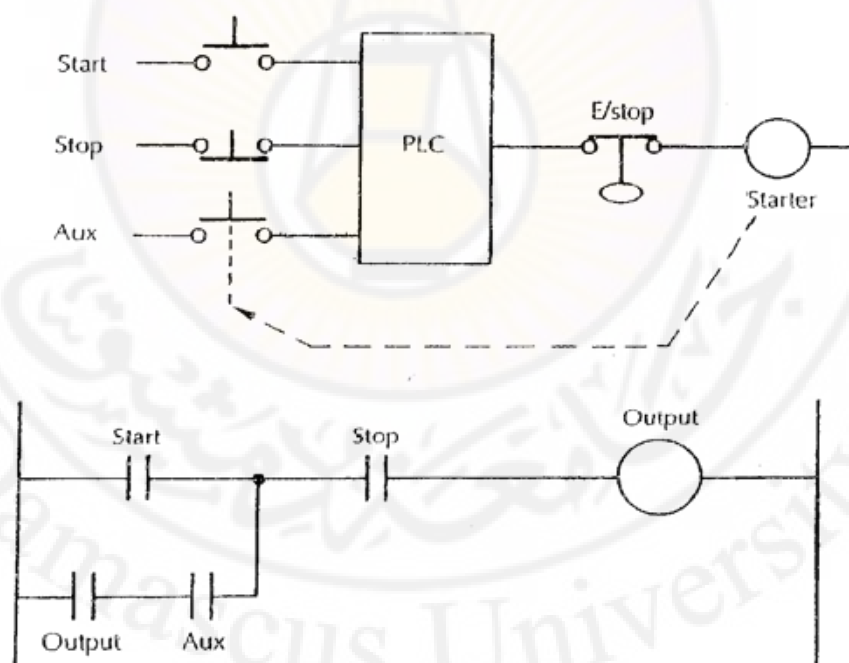
6-3-3-3- استخدام دائرة الإمساك للتحكم بالخرجات:

لكي نتلاءم مع توجهات السلامة من أجل تصميم النظم المتحكم بها بواسطة الـ PLC، يجب ألا تعتمد إشارات التوقف للطوارئ على كينونة البرمجيات ضمن الـ PLC. على سبيل المثال، يجب أن يكون مفتاح البوابة (Gate Switch) في الشكل 6-17 على التسلسل مع مخرج الـ PLC لكي يصد أي خطأ يقع في البنية المادية أو البرمجية لجهاز الـ PLC. وبطريقة ماثلة، يجب ألا تتداخل مفاتيح التوقف للطوارئ مع برنامج الـ PLC. يبين الشكل 6-18 ترتيب PLC معيارية من أجل التحكم بمحرك.

يتم إمساك الخرج عن طريق تماسات المقلع (Starter) المساعدة. إذا ضُغَط على مفتاح التوقف للطوارئ، أو كان هناك مشكلة في المحرك أو خطأ في التغذية، فإن التماسات المساعدة سيظل عملها وستعتمد الطاقة من الـ PLC (أي ينتهي الإمساك). في حال خطأ بنيوي في الـ PLC فإن مفتاح التوقف للطوارئ لا يزال يوقف عمل المحرك.



شكل 17-6 دائرة الأمان في الـ PLC

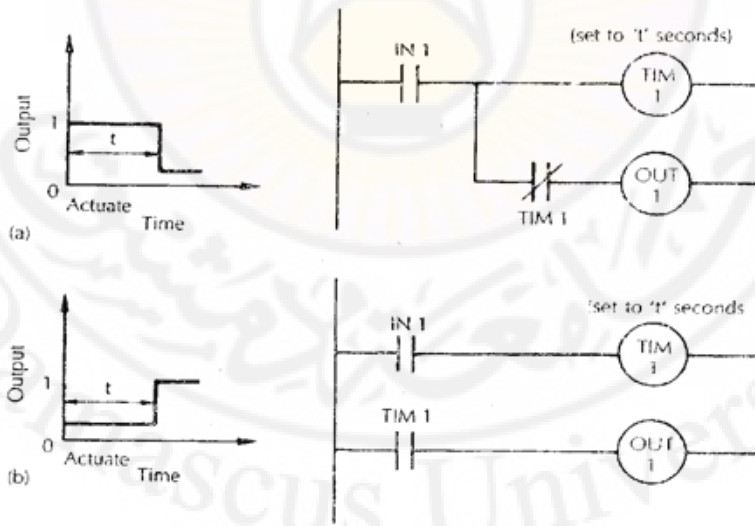


شكل 18-6 دائرة توقف معيارية للطوارئ في PLC

4-3-3-6- وظائف المؤقت (Timer Function):

تتطلب البرامج، غالباً، أن يكون هناك تأخير زمني قبل أن يظهر عمل بعض المخارج، أو عني العكس، أن تبقى المخارج منفعلة (بحالة عمل) لفترة زمنية محددة. يبين الشكل 19-6 هاتين الوظيفتين الزمنيتين.

على الجانب الأيسر من كل وظيفة يوجد مخطط توقيت يبين متى يُفعّل الخرج، ويبين الجانب الأيمن المخطط السُلّمي لكل حالة. يبين المخطط (a) فترة توقيت حيث يكون الخرج موجوداً لفترة زمنية "t" بعد ابتداء المؤقت بواسطة تشغيل (IN 1). ويبين المخطط (b) فترة تأخير حيث يكون الخرج موجوداً فقط بعد انقضاء فترة زمنية (t)، بعد تشغيل (IN 1).



شكل 19-6 - وظائف المؤقت

5-3-3-6- الحاكمت الداخلية Internal relays:

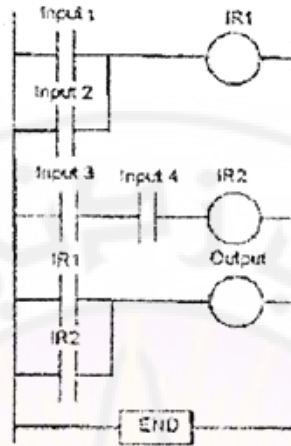
الحاكمات الداخلية عبارة عن حاكمات مساعدة (auxiliary relays) أو أعلام (flags) أو مؤشرات (markers) تتصرف كما الحاكمات العادية حيث تقوم بوصل أو فصل تماساتها على درجات السُّلم حسب البرنامج المطلوب ولكنها في الحقيقة ليست حاكمات حقيقية، أي أنها غير موجودة كأجهزة تبديل، بل تقوم بعمل الحاكمات في البرنامج الإلكتروني للـ PLC.

تحتوي بعض الحاكمات الداخلية على بطارية احتياطية تسمح لهذه الحاكمات الاحتفاظ بحالاتها الفعالة حتى لو فصلت التغذية عن المتحكم المنطقي.

إذا قطعت التغذية عن الـ PLC، أثناء تنفيذه لبرنامج معين، فإن جميع الحاكمات سوف تفصل. وعندما تعود التغذية يستأنف الـ PLC عمله عند نقطة مختلفة عن التسلسل المطلوب. لتجاوز هذه المشكلة تستخدم الحاكمات الداخلية ذوات البطارية الاحتياطية من أجل ضمان إيقاف آمن (safe shut down) للمصنع عند حدوث خلل في التغذية، واستئناف العمل بالتسلسل المطلوب.

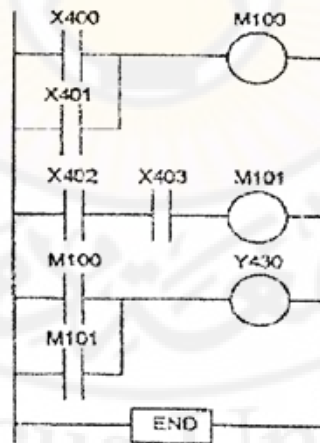
تستخدم الحاكمات الداخلية غالباً مع البرامج ذات الشروط المتعددة. يوضح الشكل 20-6 مخططاً سُلّمياً باستخدام حاكمتين داخليتين. فكي تعمل الحاكمة الداخلية الأولى IR_1 يجب إغلاق أحد المدخلين In_1 أو In_2 . وكفي تعمل IR_2 يجب إغلاق المدخلين In_3 و In_4 معاً. ويظهر الخرج Out إذا كانت إحدى الحاكمتين الداخليتين IR_1 أو IR_2 فعالة.

إذا كانت إحدى الحاكمتين الداخليتين مزودة ببطارية احتياطية فإن انقطاع التغذية لن يغير من وضعية تماس الحاكمة الداخلية في دائرة الخرج (إذا كان مغلقاً قبل انقطاع التغذية فسوف يبقى مغلقاً، وعند عودة التغذية يُشغل الخرج Out الآلة المربوطة معه مباشرة).



الشكل 20-6. مخطط سلبي يستخدم حاكمتين داخليتين

يبين الشكل 21-6 المخطط السلبي السابق بطريقة شركة Mitsubishi .



الشكل 21-6. المخطط السلبي حسب رموز شركة Mitsubishi

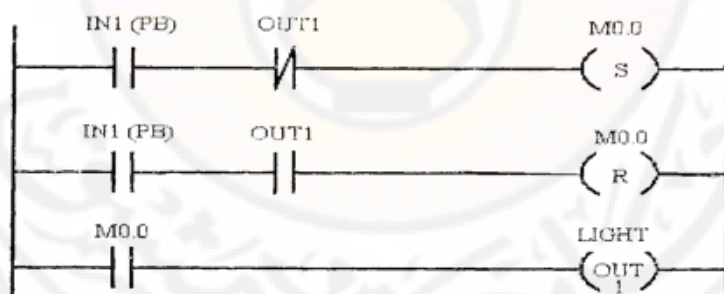
6-3-3-6- الوضع وإعادة الوضع (التعين والتصغير) Set & Reset:

إن عملية set , reset متوفرة في الكثير من أجهزة ال PLC وهي عبارة عن حاكمة داخلية أو ذاكرة.

تقوم تعليمة set بتشغيل الحاكمة وإبقائها في حالة التشغيل حتى تأتي تعليمة reset التي تقوم بتصغير الحاكمة.

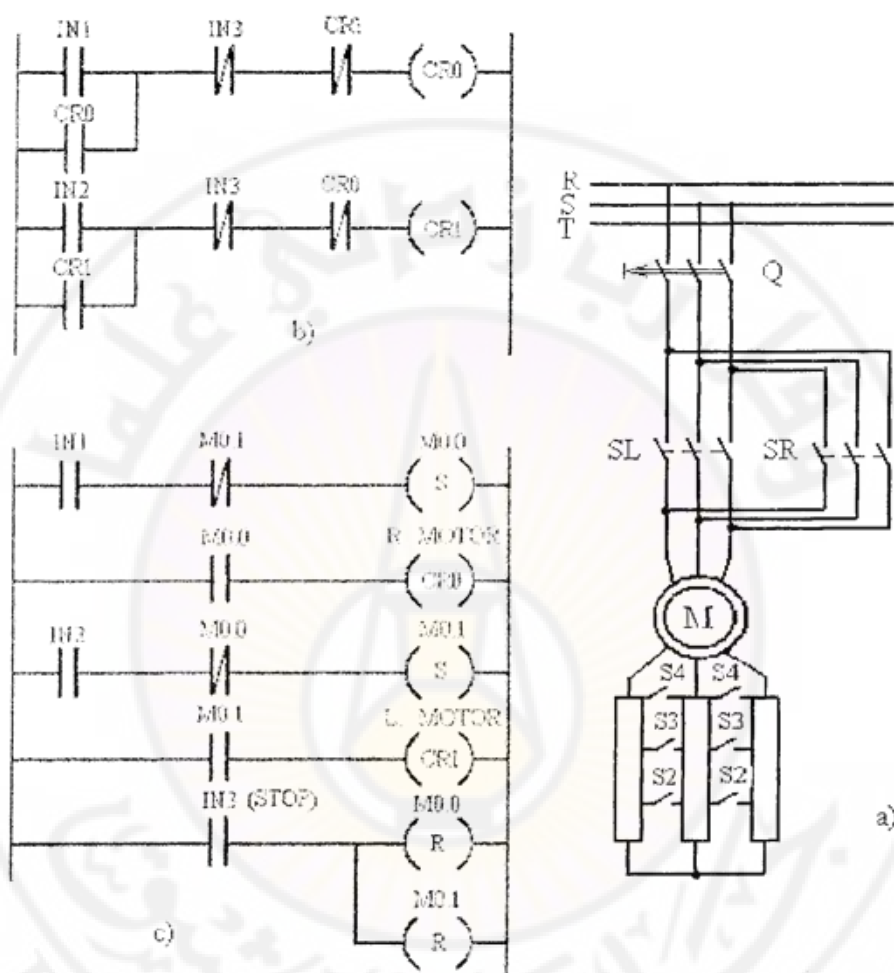
يبين الشكل 22-6 دائرة تشغيل وإطفاء مصباح من نفس الزر باستخدام التعليمتين السابقتين، فعند إعطاء إشارة على المدخل IN1 وذلك بالضغط على الضاغطة PB (Push Button) يُضاء المصباح ويبقى مضاءً حتى نضغط مرة ثانية على الضاغطة PB.

بما أن عملية الوضع وإعادة الوضع عبارة عن حاكمة داخلية أو ذاكرة لذلك تُستخدم عادةً تماسكها لتشغيل الحاكمتين الخارجيتين (OUT).



الشكل 22-6. المخطط السُلَّمي لإضاءة وإطفاء مصباح كهربائي من نفس الزر

يبين الشكل a-23-6 دائرة عكس حركة محرك ثلاثي الطور فتغير جهة دوران محرك ثلاثي الطور يجب تبديل خطين من خطوط التوتر الثلاثة الموصلة إليه كما هو مبين في الشكل a-23-6.



الشكل 23-6. دارة عكس حركة محرك ثلاثي الطور والمخططات السُّمِّيَّة لهذه الدارة

يبين الشكل 23-6-c المخطط السُّمِّي لبرنامج عكس دوران محرك ثلاثي الطور، حيث عند الضغط على الضاغطة (الزر) IN_1 تقوم الذاكرة M_{00} بإغلاق تماساتها في دارة الحاكمة CR_0 التي تشغل المحرك نحو اليمين (right) وتفصل تماسها

المغلق في دارة الذاكرة $M_{0.1}$ لمنع تشغيل المحرك باتجاه معاكس. لتشغيل المحرك نحو اليسار نقوم بضغط الضاغطة $IN3(Stop)$ لتصفير الذاكرات جميعها، فتفصل الحاكمة CR_0 ، ثم نضغط على $IN2$ فتعمل الذاكرة $M_{0.1}$ ويشغل تماسها المفتوح الحاكمة CR_1 التي تشغل المحرك نحو اليسار، ويمنع التماس المغلق لـ $M_{0.1}$ إمكانية تشغيل المحرك باتجاه معاكس قبل التصفير.

من أجل المقارنة نبين في الشكل b-23-6 دائرة عكس حركة تقليدية تعتمد على عملية الإمساك. فعند الضغط على $IN1$ تعمل حاكمة الخرج الأولى ويدور المحرك نحو اليمين مثلاً، ويقوم تماسها المفتوح بعملية الإمساك والتماس المغلق يمنع التشغيل باتجاه معاكس قبل الضغط على $IN3(Stop)$. بعد الضغط على $IN3(Stop)$ يمكن تشغيل المحرك باتجاه معاكس وذلك بالضغط على $IN2$.

مثال 4-6:

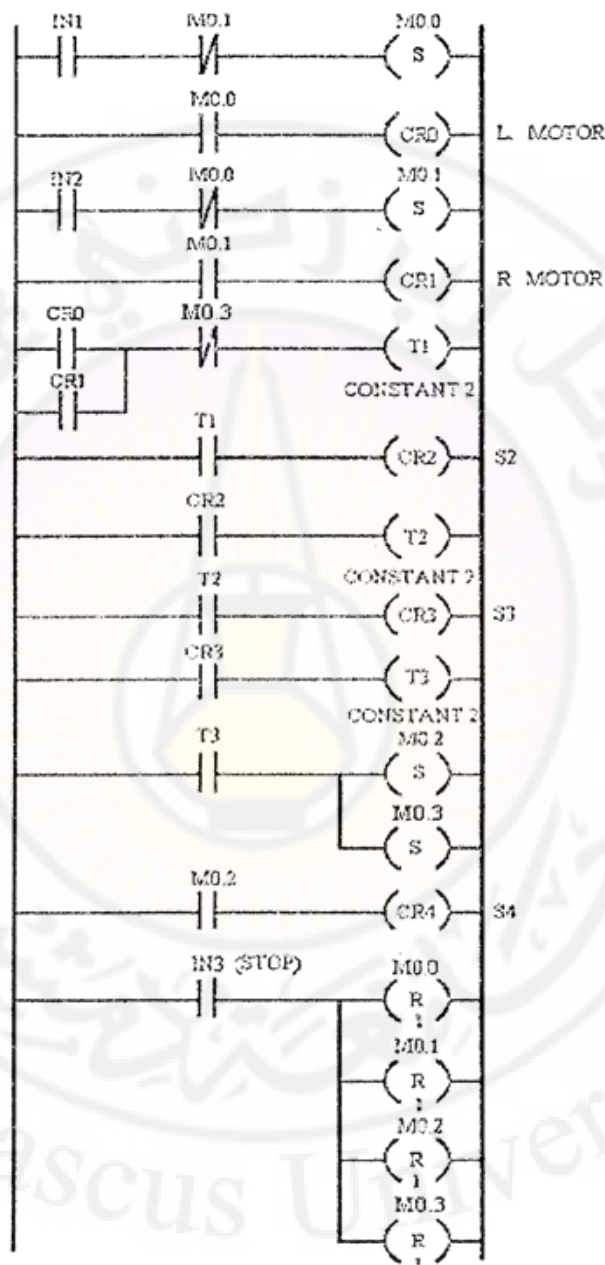
يستخدم PLC من أجل إقلاع محرك كهربائي ثلاثي الطور ذي دوائر ملفوف (الشكل 22-6) وعكس حركته ومانع التصادم:

برمجة المتحكم المنطقي بالطريقة السلمية بحيث يتحقق مايلي:

1- عند تطبيق إشارة على $IN1$ يدور المحرك نحو اليسار وذلك بواسطة الحاكمة CR_0 التي تغلق نقاط تماس القاطع SL ، ولا يمكن عندئذ دوران المحرك نحو اليمين.
2- عند تطبيق إشارة على $IN2$ يدور المحرك نحو اليمين وذلك بواسطة الحاكمة $CR1$ التي تغلق نقاط تماس القاطع SL ، ولا يمكن عندئذ دوران المحرك نحو اليسار إلا بعد إيقافه.

3- بعد فترة زمنية قدرها 2sec من لحظة تطبيق إشارة على $IN1$ أو على $IN2$ تغلق الحاكمة $CR2$ المفتاح $S2$.

4- بعد فترة زمنية 2sec أيضاً تغلق الحاكمة $CR3$ المفتاح $S3$.



الشكل 6-24. المخطط السلّمِي لإقلاع وعكس حركة محرك ثلاثي الطور ذي دائر ملفوف

5- وبعد فترة زمنية ماثلة، 2sec، تغلق الحاكمة CR4 المفتاح S4 السذي يقصر كامل مقاومة الإقلاع فيعمل المحرك عند سرعته الاسمية وتقوم الذاكرة (الحاكمة الداخلية) M0.3 بعد ذلك بفصل CR2 و CR3 وتبقى CR4 بحالة عمل.

6- عند الضغط على IN3 تفصل الدارة بالكامل وتعود جميع عناصر الدارة إلى حالتها الابتدائية.

الحل:

يبين الشكل 6-24 المخطط السلمي لإقلاع وعكس حركة المحرك. فالدرجات الأربعة الأولى مخصصة لعملية عكس الحركة، أما الدرجات من 5 وحتى 11 فتقوم بمهمة الإقلاع، وباقي الدرجات للإيقاف.

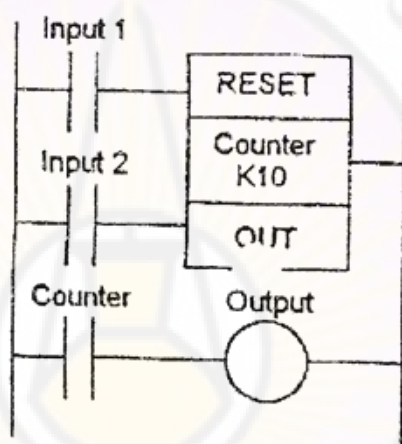
6-3-3- العدادات , Counters:

تُستخدم العدادات عندما يكون هنالك حاجة لعد رقم محدد من الحوادث المتمثلة بإشارات الدخل. كمثال على ذلك عند مرور المواد المُعبئة عبر سير متحرك ويجب إسقاط عدد محدد منها في صندوق التجميع الأول وعدد آخر ينحرف ليتجمع في صندوق آخر.

هناك نوعان من العدادات هما: العدادات التصاعدية (up counters) والعدادات التنازلية (down counters).

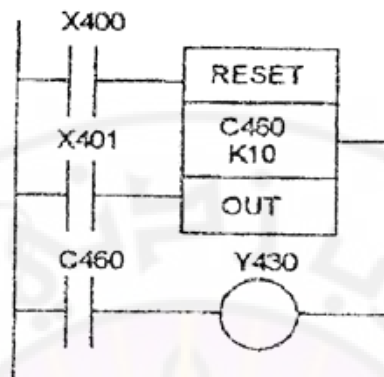
العدادات التنازلية تقوم بالعد من القيمة المضبوطة مسبقاً (preset value) حتى الصفر أي أن الحوادث تُطرح من القيمة المضبوطة مسبقاً. وعندما تصل القيمة إلى الصفر، تتغير حالة تماس العداد. أما العدادات التصاعدية فتعدّ من الصفر حتى القيمة المضبوطة مسبقاً. أي أن الحوادث المعدادة تُضاف حتى الوصول إلى القيمة المضبوطة مسبقاً، وعندما نصل إلى القيمة المضبوطة مسبقاً تتغير حالة تماس العداد.

يوضح الشكل 25-6 مخططاً سُلّمياً لبرنامج عد أساسي، فعند إعطاء إشارة دخل نبضية على المدخل Input1 يُصفر العداد (reset). فإذا وضع العداد ليعد عشر نبضات مثلاً، عندئذ سيحسب العداد عدد النبضات الناتجة عن فتح وإغلاق المدخل Input2 وعندما يصل العداد إلى القيمة المضبوطة مسبقاً (عشرة في هذه الحالة)، فلن تماس العداد Counter سيغلق ويشغل الخرج Output.

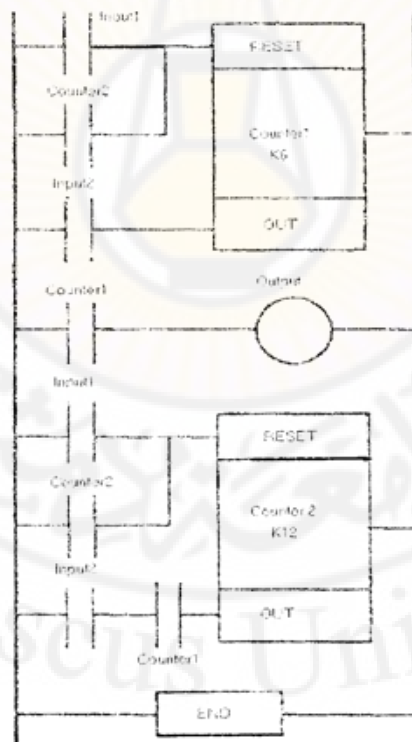


الشكل 25-6. المخطط السُلّمى لدارة عداد

عندما تُغلق تماسات المدخل Input1 في أي لحظة، يعاد تصفير العداد. يُبين الشكل 26-6 المخطط السُلّمى لدارة عداد حسب شركة Mitsubishi. كمثال على استخدام عداد، تأمل مسألة التحكم بآلية يُراد منها توجيه 6 علب غير أحد الممرات من أجل التخزين في صندوق وبعد ذلك توجه 12 علبة أخرى غير ممر آخر للتخزين في صندوق آخر.



الشكل 6-26. برنامج عداد شركة Mitsubishi

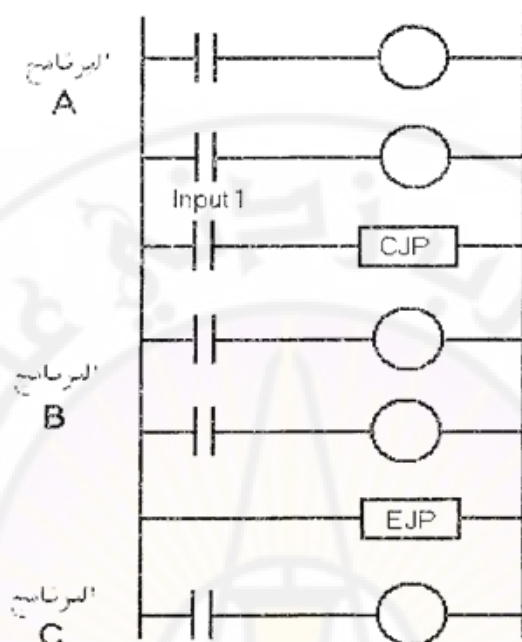


الشكل 6-27. المخطط السلمي لآلية عدّ وترجيح علب

يوضح الشكل 6-27 البرنامج الممكن استخدامه، المتضمن على عدادين اثنين، واحد منها تم ضبطه من أجل العد حتى 6 والآخر من أجل العد حتى 12. عند إعطاء نبضة على المدخل Input1 يتم تصفير كلا العدادين. بعد تصفير العدادين، يقوم العداد الأول بعد النبضات الناتجة عن إغلاق وفتح المدخل Input2، هذه النبضات قد تنتج عن مرور العلبة عبر زوج ضوئي. وبعد ورود ست نبضات يغلق العداد الأول تماسه الذي يُفعل الخرج Output، الذي قد يكون ملفاً لولبياً يُستخدم لتفعيل صفيحة حارفة تغلق ممر وتفتح آخر. يُغلق العداد الأول أيضاً تماسه في دائرة العداد الثاني فيبدأ بالعد. وعندما يعد العداد الثاني 12 نبضة (علبة) يقوم بتصفير كلا العدادين وفتح تماس العداد الأول في دائرة الخرج Output التي تسمح بإعادة الصفيحة الحارفة إلى وضعيتها الابتدائية وإعادة العملية من جديد.

8-3-3-6- القفز Jump:

يبين الشكل 6-28 عملية القفز الشرطي، فبعد تنفيذ درجات الجزء A من البرنامج يقوم الـ PLC بفحص المدخل Input1 فإذا كان مغلقاً تعمل حاكمة القفز (CJP) ويقفز البرنامج، متجاوزاً عدة درجات (درجات البرنامج B)، حتى يصل إلى درجة نهاية القفز (EJP) ثم يتابع تنفيذ درجات الجزء C من البرنامج، أما إذا كان Input1 مفصلاً فإن حاكمة القفز لن تعمل ويواصل البرنامج عمله مع درجات الجزء B من البرنامج.



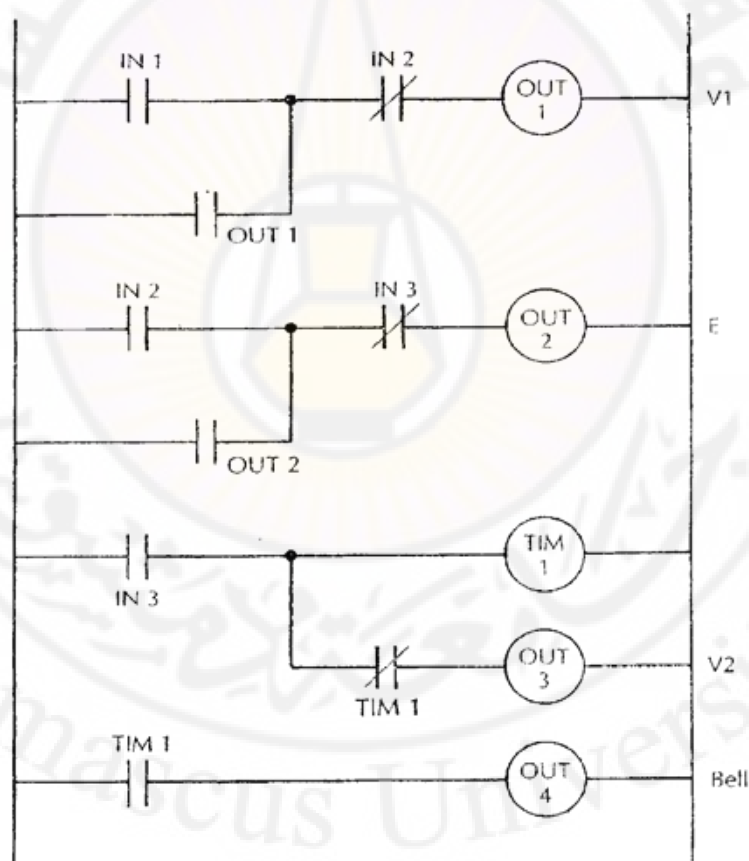
الشكل 6-28. القفر

6-3-4- المخطط السُّلَمي لمُحَضِّر الشاي لسبعة أيام:

لدينا الآن معرفة عن وظائف منطق كافية لإنشاء المخطط السُّلَمي لمُحَضِّر الشاي لسبعة أيام. بالرجوع إلى الشكل 6-13 وإلى تسلسل العمليات، يمكن إنشاء مخطط سُلَمي الآن. يمكن تفسير المخطط السُّلَمي في الشكل 6-29 كما يلي:

- يُفَعَّل [(Valve 1), Output 1] عندما يُقَدَّح المدخل 1 (مفتاح التوقيت) وليس المدخل 2 (مفتاح العوامة FS).
- يُفَعَّل Output 2 (عنصر التسخين) عندما يُقَدَّح المدخل 2 (مفتاح العوامة) وليس المدخل 3 (الثيرموستات).

- يُفَعَّلُ المؤقت 1 (Timer 1) عندما يُقَدَّح المدخل 3 (الثيرموستات) ليسمح بالزمن اللازم من أجل تعبئة إبريق الشاي.
- يُفَعَّلُ [(Valve 2) Output 3]، عندما يُقَدَّح المدخل 3 وليس المؤقت 1.
- يُفَعَّلُ Output 4 (جرس التنبيه) عندما يُسْتَقْبَل الدخول من المؤقت 1.



شكل 6-29- مخطط سُلَّمي خطَر الشاي لسعة أيام

من البرنامج السُّلمي الذي تم تصميمه، نقوم الآن بعملية إدخال البرنامج أو الترميز (Coding) في الـ PLC من خلال لوحة المفاتيح (Keyboard). إن تفاصيل كيفية تحقيق هذا وتفاصيل الترميز الخاصة هي واحدة لتشغيل الـ PLC الذي تم اختياره من أجل التطبيق. ويجب الرجوع إلى المراجع الخاصة بالجهة المصنّعة.

5-3-6- اختبار البرنامج:

إن هذا الاختبار ضروري بعد الترميز لأنه قد يكون هناك خطأ خلال عملية إدخال المعلومات في الـ PLC، وكذلك قد يكون هناك خطأ تصميمي (يدعى غالباً "bug") موجود لكن لم يُكتشف من قبل المصمم.

نحتاج من أجل هذا الاختبار أن نحاكي المداخل والمخارج من الـ PLC بحيث يعتقد الـ PLC بأنه موصل إلى النظام أو الآلة الحقيقية المطلوب التحكم بها. إن هذا أسلوب عملي أفضل بكثير جداً من استخدام الآلة ذاتها لاختبار برنامج غير موثوق به، وذلك لأنه إذا كانت هناك "علة" فإن الآلة قد تتعطل أو قد يحدث أذى للشخص المعني بالعمل.

من أجل المثال الخاص بمحضر الشاي تحتاج المبدلات أن تُشغّل يدوياً، كما يبينه الجدول 3-6 فتظهر استجابات الـ PLC الناتجة. يجب اختبار التابع الصحيح والتوقيت، للبرهان على صحة البرنامج في الـ PLC.

إذا كان لديك PLC فإنه يمكن عندئذ تنفيذ التمرين باستخدام ثلاثة مبدلات توصل إلى المداخل، وأربعة مصابيح توصل إلى المخارج بعد أن يكون المخطط السُّلمي قد تم برمجته، باستخدام ترميز الجهة المصنّعة.

إذا حدث أثناء الاختبار أن المخارج لم تظهر أبداً أو أنها تظهر إذا لم يكن مطلوباً منها أن تظهر، فلا بد عندئذ من العودة إلى المخطط السُّلمي وتحليل سبب لماذا لا ينجز التابع الذي وصفناه. قد نحتاج، أحياناً إلى إعادة تصميم البرنامج كاملاً.

جدول 6-3- جدول اختبار البرنامج

Input Switch (Operation)	Output LED (Displays)
SW1، 'on/off'	Out 1 ، 'on'
SW2، 'on/off'	Out 1 ، 'off'
	Out 2 ، 'on'
SW3، 'on'	Out 2 ، 'off'
	Out 3 ، 'on' for a short time then 'off'
(Wait for a delay)	Out 4 ، 'on' after delay
SW3، 'off'	Out 4، 'off'

الخلاصة:

يتضمن استخدام الـ PLC الخطوات التالية:

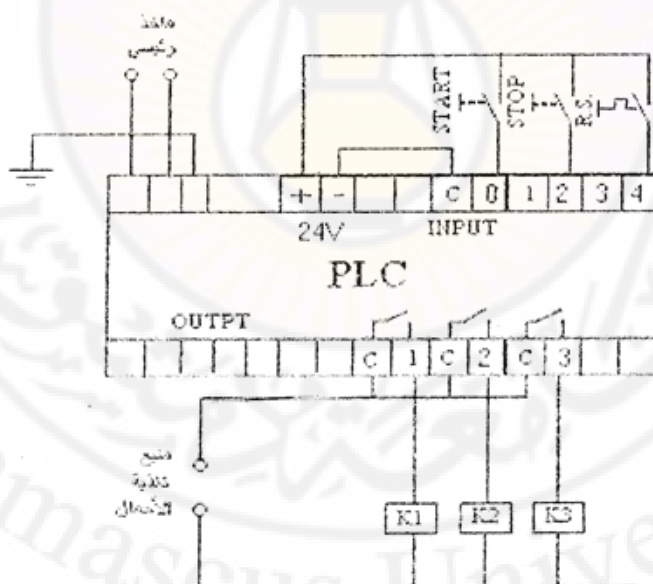
- 1- حدد مواصفات البرنامج.
- 2- حدد المدخل والمخرج وخصص رقماً لكل منها.
- 3- صمم البرنامج السليم.
- 4- أدخل البرنامج في ذاكرة الـ PLC باستخدام طرفية برمجة (Programming Terminal) ، والتي تسمى أيضاً طرفية ترميز (Coding).
- 5- اختبر برنامج الـ PLC بعد إبقائه بحالة فصل (off-line).

6- أدخل ال PLC بعد اختباره في نظام التحكم في الآلات وقم بالاختبار من أجل التأكد من العمل الصحيح.

إن الخطوات من 1 إلى 3 هي عامة لجميع أجهزة ال PLC بينما تعتبر الخطوات من 4 إلى 6 خاصة بكل PLC بحسب مصدره.

6-4- مآخذ وتوصيلات المتحكم المنطقي PLC:

تتنوع أجهزة التحكم المنطقية PLC تنوعاً كبيراً من حيث عدد مآخذها وقابليتها للتوصيل إما إلى مآخذ تغذية متناوبة أو مستمرة أو إلى الحساسات المختلفة، وبالتالي يستطيع المستثمر أن يختار النوع المناسب للتطبيق المناسب.



الشكل 6-30. مآخذ وتوصيلات المتحكم المنطقي PLC

يبين الشكل 6-30 مآخذ توصيل جهاز PLC نموذجي.

يُولد الجهد المستمر 24V داخلياً من المآخذ الرئيسي (mains) ويُوصل إلى جميع مدخل ال PLC. ويتم وصل المخارج وفصلها وفقاً للبرنامج والحالة المدخل. يمكن فصل أو وصل أحمال الخرج من تماسات: حاكمة (relay) أو ترانزستور أو ترياك موجود داخل المتحكم PLC.

عندما تكون الأحمال ذات تيارات عالية يجب استخدام جهاز فصل/وصل بسيط مثل الكونتاكتر (Contactor).

بالإضافة إلى هذه المآخذ تحتوي المتحكمات المنطقية PLC على مآخذ اتصال للتخاطب مع الحاسب، وذلك من أجل تثبيت البرنامج، ومع أجهزة ال PLC الأخرى.

6-5- البرمجة بطريقة GRAFCET:

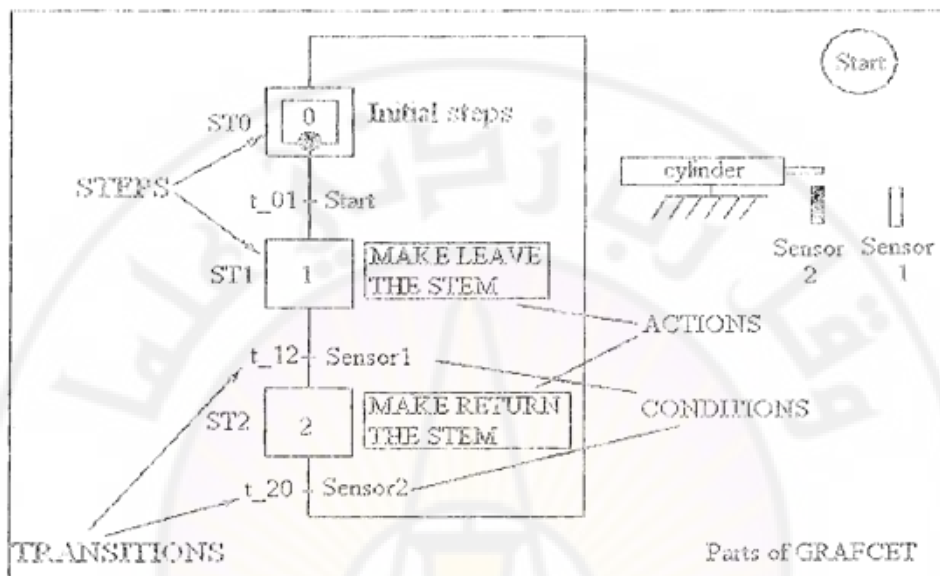
إن طريقة GRAFCET (Graphe Fonctionnel de Commande، Etapes et Transitions) هي طريقة فرنسية حديثة ومفيدة جداً للعمليات البرمجية الضخمة وبشكل خاص للعمليات الدورية المتكررة. تشبه هذه الطريقة إلى حد ما المخطط المسلكي في برمجيات الحاسوب. يتألف المخطط كما هو مبين في الشكل 6-31 من عنصرين هما: الخطوات (STEPS) والانتقالات (TRANSITIONS).

يتم ترقيم الخطوات بأرقام تُكتب داخل المربعات ويُحجز لكل خطوة ذاكرة

محددة (SET-RESET) فعلى سبيل المثال وحسب SIEMENS:

ST0	M0.0	الخطوة الابتدائية:
ST1	M0.1	الخطوة الأولى:
ST2	M0.2	الخطوة الثانية:

إلخ.....



الشكل 6-31. جزء من مخطط GRAFCET يظهر الخطوات والانتقالات

ونكتب جنب كل مربع العمليات المطلوب تنفيذها عند هذه الخطوة "إن وجدت" (تشغيل مروحة، إطفاء مصباح، تشغيل سخان..... وهكذا).

كل خطوة تتبع انتقال ومتبوعة بالانتقال.

نكتب على خطوط الانتقال رقم الانتقال (في الجانب الأيسر من الخط) ويُعجز لكل انتقال ذاكرة محددة (SET-RESET) فعلى سبيل المثال وحسب:

:SIEMENS

t_01	M1.0	الانتقال بين الخطوة الابتدائية والخطوة الأولى
t_12	M1.1	الانتقال بين الخطوة الأولى والخطوة الثانية
t_23	M1.2	الانتقال بين الخطوة الثانية والخطوة الثالثة

وفي الجانب الآخر من الخط (الجانب الأيمن) نكتب شرط أو شروط الانتقال وهي عبارة عن إشارات المدخل الناتجة من الحساسات أو الحاكمت الداخلية أو المؤقتات أو العدادات أو غير ذلك.

قواعد تنفيذ مخطط GRAFCET:

القاعدة الأولى - الوضع الأولي

تصف الخطوة الابتدائية الوضع الأولي وذلك كونها تحدد الحالة الفعالة لبدء العمل.

القاعدة الثانية - الانتقال

قد يكون الانتقال ممكناً أو غير ممكن. يكون الانتقال ممكناً عندما تكون جميع الخطوات السابقة المباشرة فعالة وشروط الانتقال محققة.

القاعدة الثالثة - تطور الخطوات الفعالة

عندما يحدث الانتقال، فإن الخطوة أو الخطوات التالية المباشرة تصبح فعالة والخطوات السابقة المباشرة تصبح غير فعالة آنياً.

القاعدة الرابعة - الانتقالات المتواقية

جميع الانتقالات الممكنة تحصل بشكل متوالت وخطي.

القاعدة الخامسة - تفعيل وعدم تفعيل الخطوة

إذا كانت الخطوة خلال تنفيذ العملية المبرمجة مُفعلة وغير مُفعلة آنياً، تكون الأفضلية للمُفعلة.

قبل أن نقوم بعرض بعض الأمثلة نقدم فكرة عن الجزء العملي.

يعتبر المتحكم المنطقي القابل للبرمجة PLC:

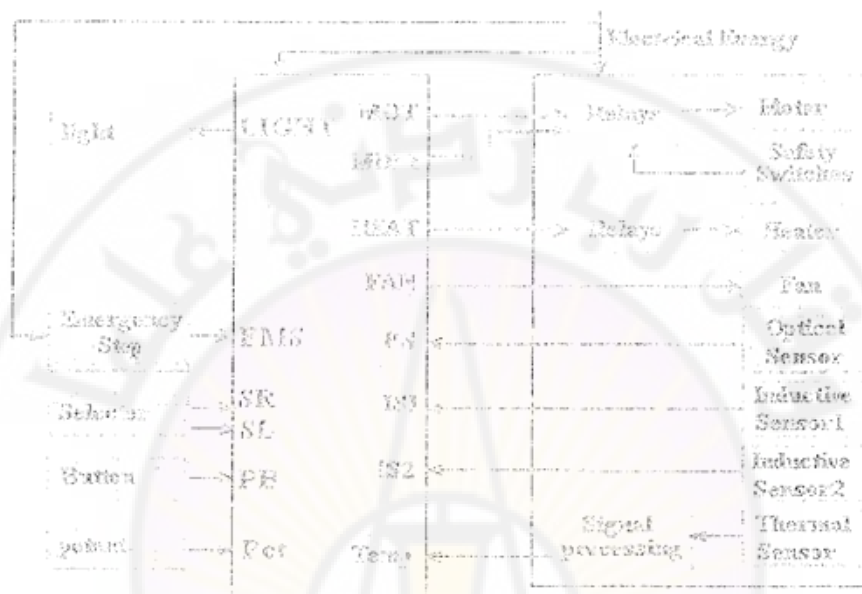
SIEMENS S7-226 PLC and STEP 7 Micro/WIN 32 software

من الأنواع الأكثر ملاءمة للبرمجة بطريقة GRAFCET.

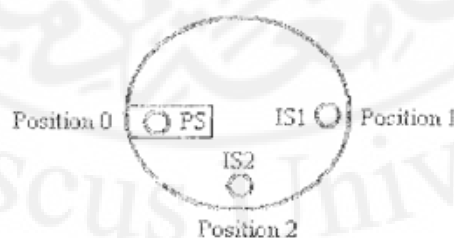
قبل البدء بكتابة البرنامج يجب تعريف المداخل والمخارج بما يتناسب مع الرموز المستعملة من قبل الشركة الصانعة SIEMENS وبنفس الوقت يصبح بإمكاننا استخدام الرموز التي نرغب بها. يبين الجدول 4-6 الرموز المستخدمة وما يعادلها من رموز الشركة:

الجدول 4-6

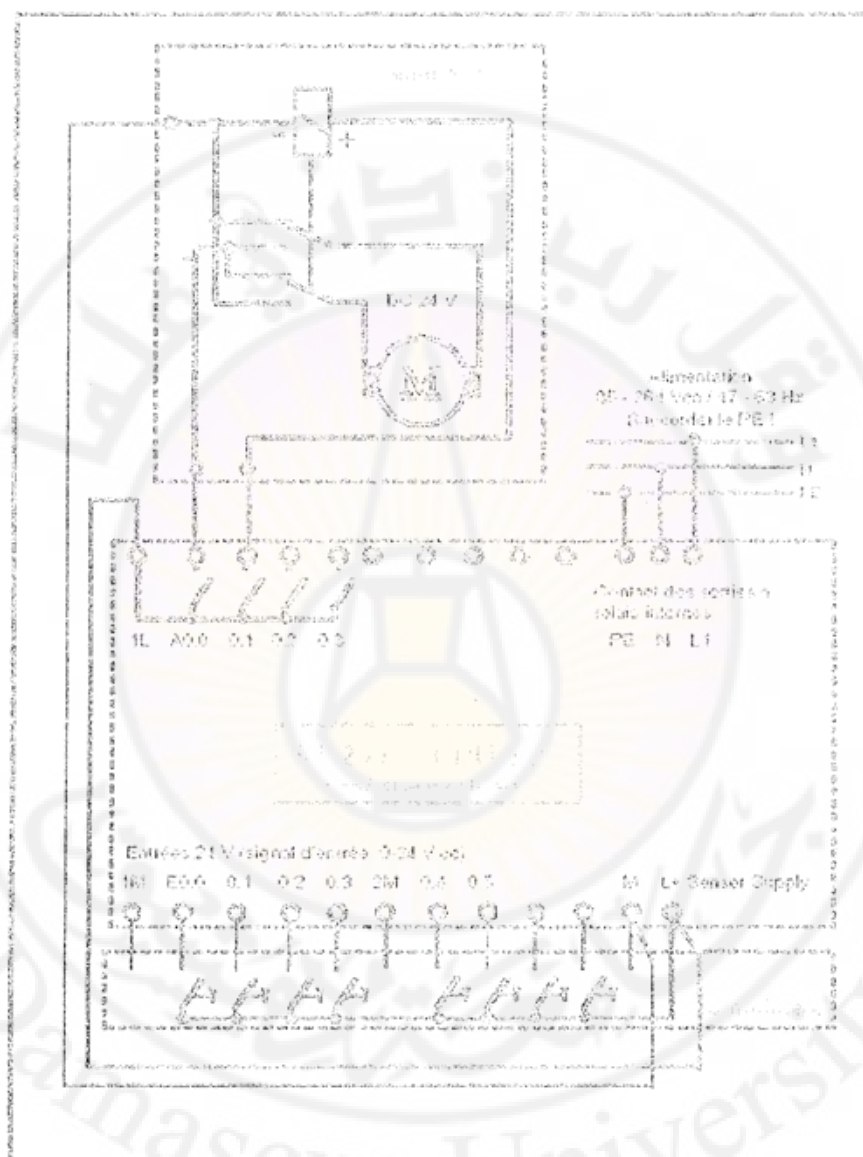
Symbol	Address	Comments
EMS	I1.0	Emergency Stop
PB	I1.1	Push Button
SL	I1.2	Selector Left position
SR	I1.3	Selector Right position
PS	I1.4	Photo Sensor
IS1	I1.5	Inductive Sensor 1
IS2	I1.6	Inductive Sensor 2
MOT	Q1.0	Motor ON
MDIR	Q1.1	Motor Direction
HEAT	Q1.2	Heater
FAN	Q1.3	Fan
LIGHT	Q1.4	Panel Light



الشكل 6-32. توصيلات ال PLC



الشكل 6-33. القرض الزجائي



يتم توصيل ان PLC مع الحساسات والأجهزة الخارجية المختلفة كما هو مبين في الشكل 6-32. ويتم تشغيل المحرك وعكس اتجاه دورانه حسب المخطط المبين في الشكل 6-34 .

يبين الشكل 6-33 قرص زجاجي يتم التحكم به حسب البرنامج المطلوب وهو مزود بالحساسات التالية:

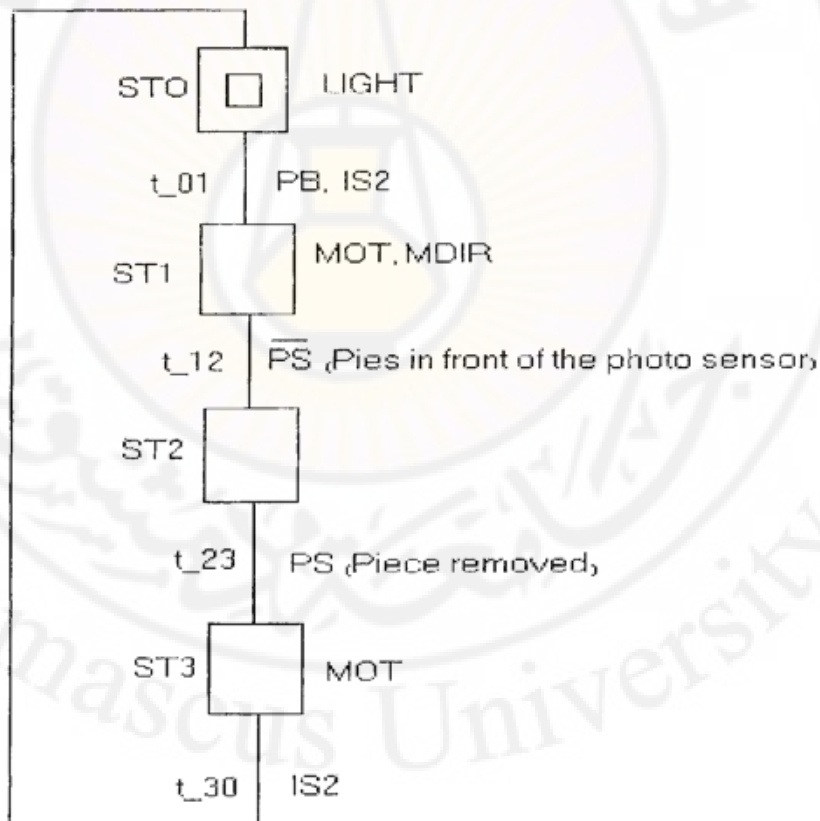
- 1- حساس كهروضوئي PS يكون وضعه الطبيعي عندما تكون القطعة المراد نقلها فوقه وعند تحرك القطعة أو نزاعها يصبح التماس المغلق مفتوحاً والمفتوح مغلقاً.
- 2- حساسان تحريضيان IS1 و IS2 يشيران عند الإغلاق إلى وضعية القرص الزجاجي. IS1 يشير إلى الوضعية 1، و IS2 يشير إلى الوضعية 2.

مثال 6-5:

- ارسم المخطط GRAFCET ثم المخطط السلّمى الذي يحقق التابع التالي:
- الحالة الابتدائية: القرص على الوضعية 2 (أي الحساس IS2 في حالة عمل)
 - إذا كانت الوضعية الابتدائية صحيحة يُضيء مصباح اللوحة.
 - يضع العامل القطعة على القرص ويضغط زر الإقلاع PB.
 - يدور المحرك بعكس عقارب الساعة حتى تستقر القطعة عند الوضعية 0 ويقف القرص.
 - يقوم العامل بترع القطعة عن القرص.
 - يدور المحرك باتجاه عقارب الساعة ويعود القرص إلى وضعيته الابتدائية.
 - خلال دوران القرص يكون مصباح اللوحة في حالة إطفاء.
 - تتكرر العملية إذا وضع العامل القطعة مكانها وضغط PB.
- الحل:

يبين الشكل 6-35 مخطط GRAFCET المطلوب حسب متطلبات المسألة 5.

ويبين الشكل 6-36 البرنامج السُّلمي المطابق للمخطط السابق. في هذا المخطط نجد أن الدرجات (الأربعة) الأولى تكون مخصصة لتوصيل عناصر الانتقال، في الدرجة التالية يقوم العنصر الضروري جداً SM0.1 وهو بمثابة Run بتشغيل الخطوة الابتدائية آلياً وفصل جميع الخطوات الباقية. وفي الخطوات من 6 حتى 9 تقوم تماسات عناصر الانتقال بتشغيل الخطوة التالية وفصل ما قبلها. أما في الخطوات المتبقية فتوصل تماسات الخطوات مع الأجهزة المطلوب تشغيلها حسب البرنامج.

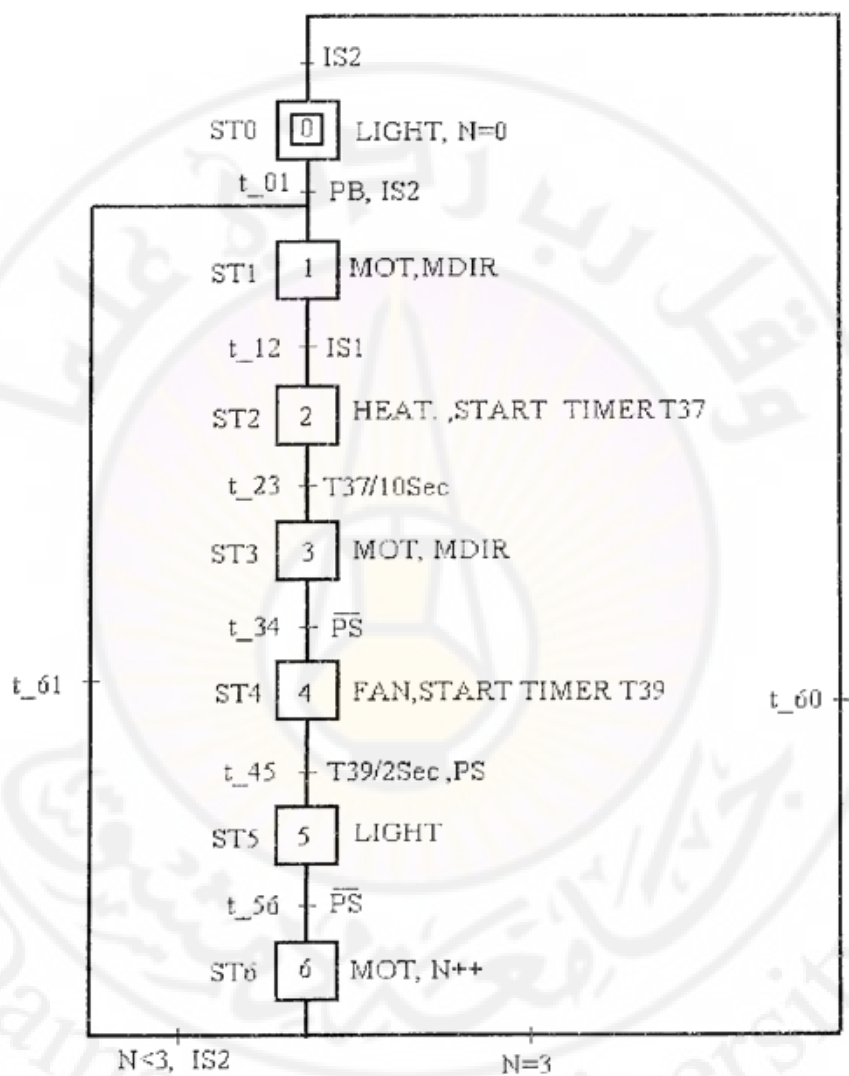


الشكل 6-35. مخطط GRAFCET حسب متطلبات المثال 5

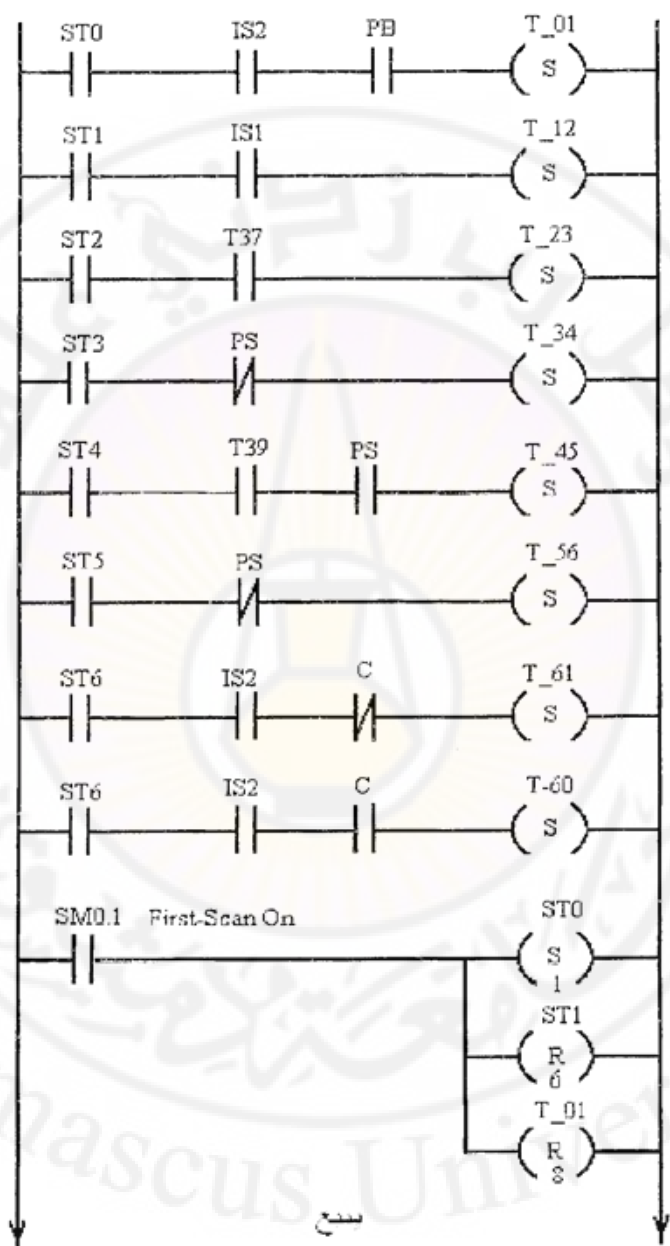
مثال 6-6:

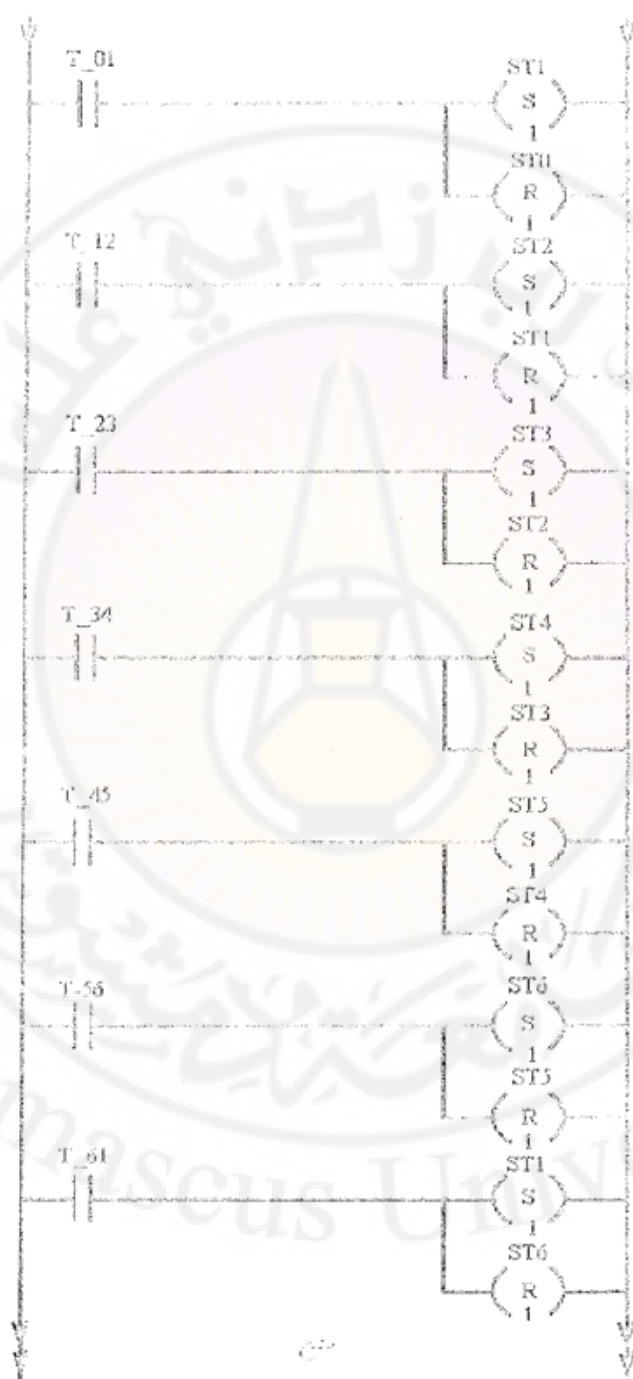
ارسم المخطط GRAFCET ثم المخطط السلّمى الذي يحقق التسامع التالي (انظر الشكل 6-33):

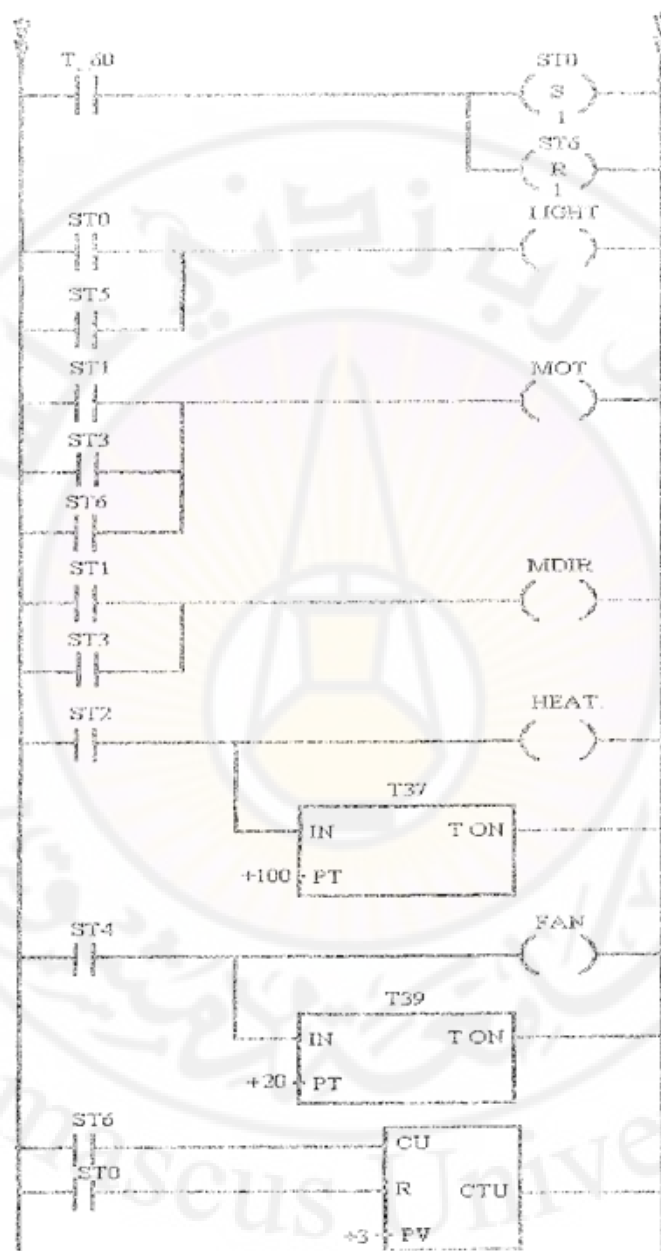
- الحالة الابتدائية: القرص على الوضعية 2.
 - إذا كانت الوضعية الابتدائية صحيحة يُضيء مصباح اللوحة.
 - يضع العامل القطعة على القرص ويضبط زر الإقلاع PB.
 - يدور المحرك بعكس عقارب الساعة حتى تستقر القطعة عند الوضعية 1 ويوقف القرص لمدة $t_1 = 10 \text{ sec}$. خلال فترة توقف القرص يعمل السخان HEATER.
 - بعد انتهاء الفاصل الزمني يُتابع القرص دورانه بعكس عقارب الساعة حتى الوضعية 0. ويتوقف لمدة 2 sec . خلال فترة التوقف، تعمل المروحة.
 - يقوم العامل بتزع القطعة عن القرص، فيضيء مصباح الإشارة (بعد انتهاء الفاصل الزمني السابق 2 sec).
 - ثم فور وضع القطعة مكانها يدور المحرك باتجاه عقارب الساعة حتى الوضعية 2. وبعد الحداد دورة أولى.
 - تتكرر ثلاث دورات للقرص دون الضبط على PB.
 - بعد انتهاء الدورات الثلاثة يتوقف القرص على وضعيته الابتدائية ويضيء المصباح.
 - تتكرر العملية إذا وضع العامل القطعة مكانها وضبط PB.
- الحل:
- يبين الشكل 6-37 مخطط GRAFCET المطلوب. حسب متطلبات المسألة 6-6. وبين الشكل 6-38 البرنامج السلّمى المطابق للمخطط السابق.



الشكل 6-37. مخطط GRAFCET حسب متطلبات المثال 6







الشكل 6-38. المخطط السلكي للمقال 6

الفصل السابع

التغذية الكهربائية المستمرة:

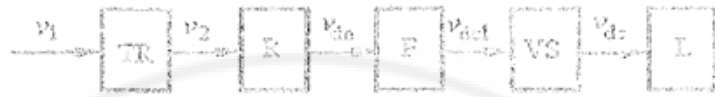
D.C. Power Supply

مقدمة [18، 19، 25، 26، 29، 31].

تُستخدم مصادر التيار الكهربائي المستمر لتأمين التغذية للدارات الكهربائية، حيث تعتبر مصادر التغذية هذه الجزء الأكثر أهمية في أية دائرة إلكترونية. ومن الناحية العملية، يحتاج أي نظام إلكتروني إلى منبع واحد أو أكثر من منابع التغذية الكهربائية. وغالباً ما تتم عملية تقويم للتيار المتناوب من أجل الحصول على تيار مستمر. تتضمن دارات تقويم التيار دارات إلكترونية تقوم بتوحيد اتجاه التيار وتسمى دارات التوحيد أو دارات تقويم، ودارات ترشيح من أجل الحصول على تيار مستمر. تتم عملية توحيد جهة التيار باتباع نظام توحيد من نوع توحيد نصف الموجة أو توحيد الموجة الكاملة.

7-1- دارات التقويم Rectifier Circuits

دارات التقويم - هي تجهيزات تقوم بتحويل التيار المتناوب إلى تيار مستمر. وتستخدم كمصادر لتغذية التجهيزات التي تعمل على التيار المستمر. يبين الشكل 7-1 المخطط الصندوقي لدارة تقويم، تشكل مصدر تغذية بالتيار المستمر.



الشكل 7-1. المخطط المنطقي لإدارة التحميل

حيث:

TR- محول لرفع أو خفض الجهد- ويقوم بعملية توافق جهد دائرة التحويل مع جهد الشبكة.

R- المقاومات.

F- مرشح يستخدم من أجل الحصول على جهد خرج ناعم (قليل التموج) وهو عبارة عن دائرة تتألف من مكثفات أو من مكثفات وملفات.

VS- مثبت للجهد المستمر المقوم، ويصنع عادة باستخدام ثنائي زينر أو ترانزستور مع تغذية خلفية.

L- الحمل.

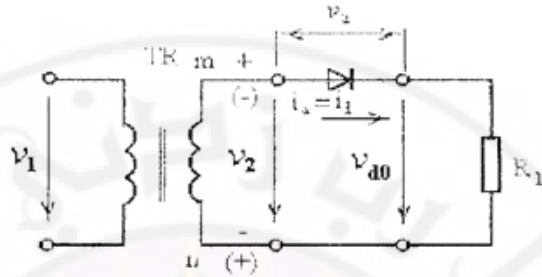
أثناء دراستنا التالية لدوائر التحويل وللمبدلات الثايرستورية سوف نختبر بشأن عناصر التحويل (الثنائيات أو الثايرستورات) مثالية (أي مقاومتها الأمامية تساوي الصفر والعكسية لا نهائية). والمحولات مثالية أيضاً (أي ضعاها مهملة). هذه التجاوزات تسهل الحسابات دون خطأ يذكر.

7-1-1-1- دوائر التحويل أحادية الطور Single Phase Rectifier:

7-1-1-1- تقويم نصف موجة The half-wave rectifier:

أ- عمل دائرة تقويم نصف موجة على حمل أومي صرف:

تبين الدارة في الشكل 7-2 دائرة تقويم نصف موجة.



الشكل 7-2. دائرة تقويم نصف موجة

لنعتبر بأن الجهد على طرفي الملف الثانوي للمحول جيبي، أي:
 $v_2 = V_{2\max} \sin \omega t$ (الشكل 7-3). فخلال نصف الموجه الموجب تكون النقطة m موجبة بالنسبة إلى n ويصبح الثنائي منحازاً أمامياً، فيمر خلال المقاومة R_L تيار i_d الذي يُنشئ على هذه المقاومة فرق جهد $v_{do} = i_d R_L$ أما في فترة نصف الموجه السالبة فتصبح n موجبة بالنسبة لـ m ويكون الثنائي منحازاً عكسياً وبالتالي يفصل ولا يمرر التيار وتصبح $v_{do} = 0$ بهذا الشكل يمر عبر الثنائي إلى الحمل تيار نبضي خلال نصف الموجات الموجبة فقط. ويكون اتجاه التيار في الحمل دائماً من جهة مهبط الثنائي إلى الطرف n للمحول. أي للتيار اتجاه واحد، لذلك فهو يعتبر تياراً مستمراً.

بما أن دائرة تقويم نصف الموجه هي دائرة تسلسلية، فإن تيار الثنائي هو نفسه تيار الحمل (الشكل 7-3-c) والجهد على الحمل v_{do} هو النصف الموجب للموجات الجيبية كما في الشكل 7-3-b.

إذا طرحنا من موجة جهد المنبع v_2 (الشكل 7-3-a) موجة الجهد على الحمل v_{do} (الشكل 7-3-b) نحصل على شكل الجهد على الثنائي (الشكل 7-3-d).

$$v_a = v_2 - v_{do}$$

إن هبوط الجهد على الثنائي يكون صغيراً في الاتجاه الأمامي ويمكن إهماله، لذلك في الاتجاه الأمامي يكون:

$$V_{2\max} \approx V_{do}$$

$$v_2 \approx v_{do}$$

الجهد العكسي: في فترة أنصاف الموجات السالبة لا يمر التيار عبر الثنائي ويكون الجهد اللحظي على الحمل يساوي الصفر $v_{d0} = 0$ ويكون جهد المنبع بالكامل مطبقاً على الثنائي (الشكل 7-3-د):

$$v_a = v_2$$

والجهد العكسي الأعظمي في حالة عدم التمرير يساوي:

$$V_{R\max} = V_{2\max} = \sqrt{2} \times V_2$$

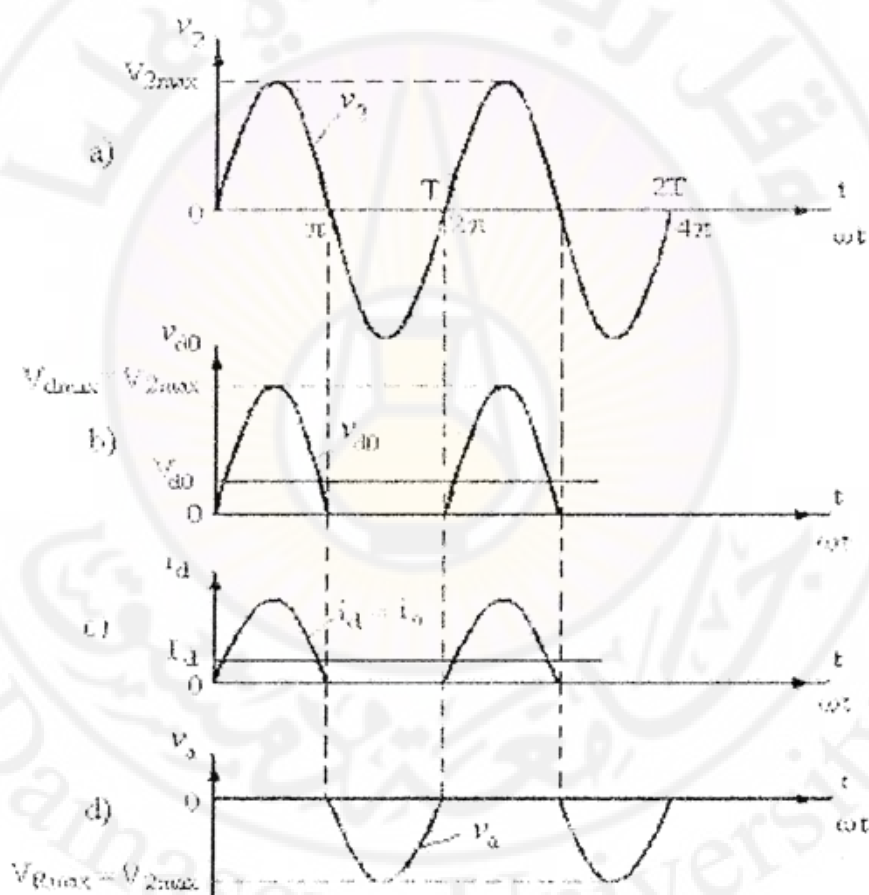
حيث: V_2 - القيمة الفعالة للجهد المتناوب.

القيمة المتوسطة لجهد الخرج V_{do} ولتيار I_d :

للجهد على الحمل شكل نبضي ولكنه ذو اتجاه واحد. فلو رسمنا مستطيلاً قاعدته تساوي دور جهد التغذية T وبارتفاع معين بحيث تكون مساحة هذا المستطيل تساوي المساحة المحصورة تحت منحنى $v_{do}(t)$ ، فيكون الارتفاع هو القيمة المتوسطة للجهد المستمر V_{do} .

لإيجاد القيمة المتوسطة لهذا الجهد نأخذ تكامل التابع $v_{do}(t)$ بدلالة الزمن t أو

الزاوية $\theta = \omega t$. ونحدد هذا التكامل بطول الموجه المستمرة فنحصل بذلك على المساحة تحت المنحني $v_{d0}(t)$ ولإيجاد المعدل المتوسط نقسم هذه المساحة على طول الدور T .



الشكل 3-7. المخططات الزمنية لدائرة تقويم نصف موجة

$$V_{do} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} v_{d0}(t) \cdot dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} v_{d0} \cdot d(\omega t) \quad \text{إذا:}$$

$$V_{do} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} V_{2\max} \sin \omega t \cdot d(\omega t) = -\frac{V_{2\max}}{2\pi} \cos \omega t \Big|_0^{\pi} = \frac{V_{2\max}}{\pi}$$

$$V_{do} = \frac{V_{2\max}}{\pi} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_2}{\pi} = 0.45 \cdot V_2$$

وتكون القيمة المتوسطة للتيار المقوم:

$$I_d = \frac{V_{do}}{R_L} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_2}{\pi \cdot R_L} = 0.45 \frac{V_2}{R_L}$$

تنتج القيمة المتوسطة للتيار I_d عزم الدوران في الآلات الكهربائية، أما للأحمال الحرارية فيجب حساب القيمة الفعالة للتيار المقوم، وهي القيمة المكافئة للتيار المستمر حرارياً ($Q = 0.24 R_L I^2 T = 0.24 R_L \int_0^T i^2(t) dt$) وتحسب كما يلي:

$$I_{drms} = I_{arms} = I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} (I_{2\max} \sin \omega t)^2 d(\omega t)} =$$

$$= \sqrt{\frac{I_{2\max}^2}{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} d(\omega t)} =$$

$$= \frac{I_{2\max}}{2} = \frac{V_{2\max}}{2R_L}$$

القدرة المستهلكة في الحمل:

$$P = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi v_d i_d d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi i_d^2 R_L d(\omega t) =$$

$$\frac{I_{2, \max}^2}{4} R_L = I^2 R_L$$

$$S = V_2 I_2$$

واستطاعة المحول تساوي:

عامل التموج (التعرج) Ripple Factor - على الرغم من أن جهد

الخرج لدائرة التقويم $v_{do}(t)$ وحيد الاتجاه إلا أنه متغير القيمة، فله تموجات. إن شكل الموجة المتناوبة غير جيبي وتتأرجح الموجة حول V_{do} كما في الشكل 4-7 ورغم أن طول النصف الموجب من الموجة لا يساوي طول النصف السالب، إلا أن مساحة الجزء الموجب من الموجة تساوي مساحة الجزء السالب منها لأن V_{do} قيمة متوسطة.

إن المركبة المتناوبة ضارة بالجهد المقوم وتتألف من عدة توافقيات يمكن تحديدها باستخدام سلسلة فورييه:

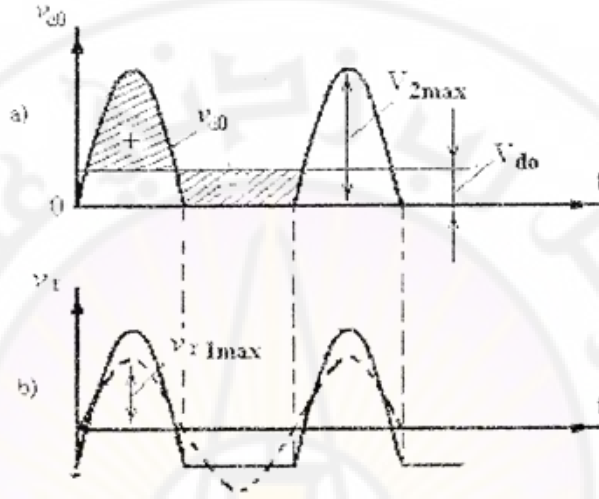
$$v_{do}(t) = V_{do} + v_r(t) =$$

$$= v_{r, \max} \left[\frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \sin \omega t - \frac{2}{\pi} \left(\frac{\cos 2\omega t}{1 \times 3} + \frac{\cos 4\omega t}{3 \times 5} + \frac{\cos 6\omega t}{5 \times 7} + \dots \right) \right]$$

من العلاقة الأخيرة يتبين بأن القيمة العظمى للتوافقية الأولى كبيرة جداً لدائرة

تقويم نصف الموجة:

$$v_{r, \max} = 0.5 v_{2, \max} = 1.57 V_{do}$$



الشكل 4-7. المركبات المستمرة والمتناوبة للجهد المقوم

للتخلص من تأثير التوافقيات تستخدم المرشحات.
يعتبر عامل التعرج k_R مقياساً لمدى جودة خرج دائرة التقويم ويساوي لنسبة القيمة الفعالة لمركبات التيار المتناوب I_{ac} إلى مركبة التيار المستمر I_d :

$$k_R = \frac{V_{ac}}{V_{do}} = \frac{I_{ac}}{I_d}$$

بما أن القدرة الكلية المبددة في الحمل هي عبارة عن مجموع القدرات المتبددة من مركبة التيار المستمر ومركبات التيار المتناوب لذلك فإن:

$$I^2 R_L = I_d^2 R_L + I_{ac}^2 R_L$$

$$I_{ac} = \sqrt{I^2 - I_d^2} \Rightarrow k_R = \sqrt{\left(\frac{I}{I_d}\right)^2 - 1} = \sqrt{\left(\frac{V_{2\max} / 2R_L}{V_{2\max} / \pi R_L}\right)^2 - 1} = 1.21$$

وهي قيمة عالية جداً لذا من الضروري استخدام المرشحات.

ب- عمل دائرة تقويم نصف موجة مع مرشح سعوي:

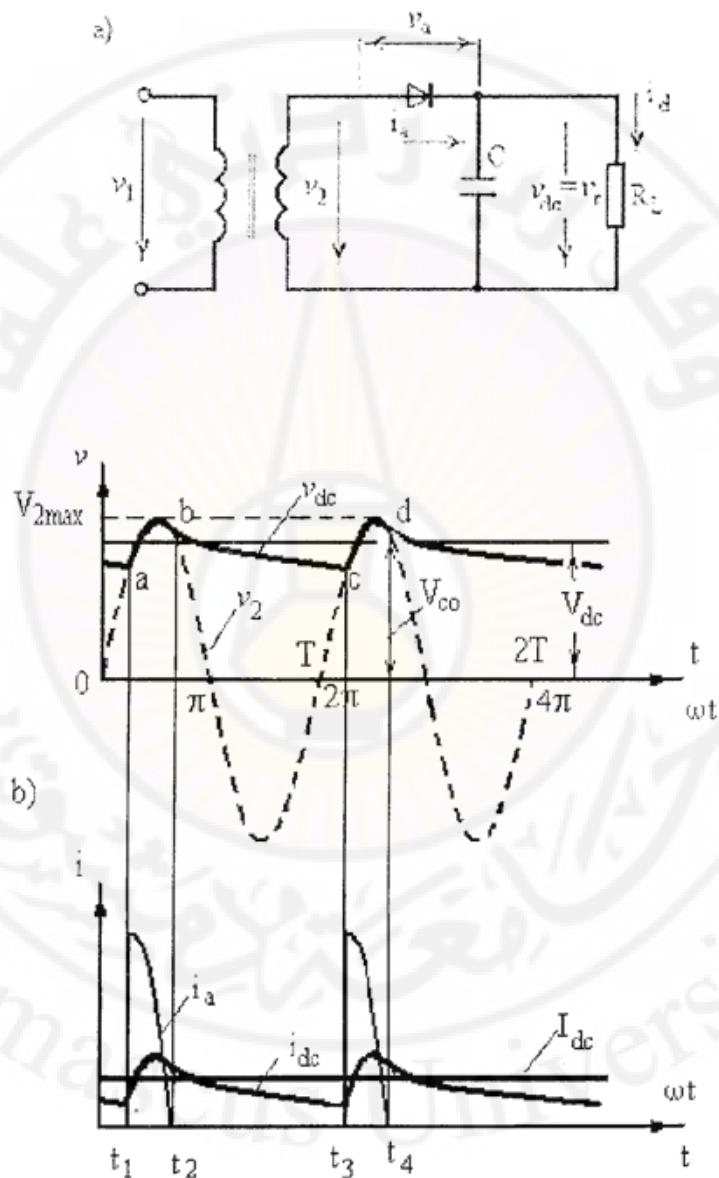
تستخدم المرشحات عادة لتحسين شكل جهد خرج دوائر التقويم، بحيث يصبح مستمراً وغالياً من انتعرجات الخادة.

يبين الشكل 5-7 دائرة تقويم نصف موجة مع مكثف ومخططاتها الزمنية.

يُشحن المكثف C خلال نصف الموجة الموجب في الفترة الزمنية $t_0 = t_2 - t_1$ إلى قيمة قريبة من $V_{2\max}$ وعندما تقبض الموجة المتناوبة لأقل من قيمة جهد المكثف (النقطة b في الشكل 5-7) يتوقف تيار الشحن عبر الثنائي ويستمر تيار الحمل بالسريان بفعل تفريغ المكثف (بين النقطتين b و c على الشكل 5-7) حسب العلاقة:

$$v_c = V_{co} e^{-R_L t / \tau}$$

في اللحظة التي يتساوى فيها جهد المنبع المتناقص مع جهد المكثف المتناقص (النقطة c) يبدأ المكثف بالشحن من جديد. في حالة اللامحل ($R_L = \infty$) ينشحن المكثف إلى القيمة $V_{co} = V_{2\max}$ ويحافظ المكثف على هذه القيمة لعدم وجود دائرة تفريغ.



الشكل 5-7. دائرة تقويم نصف موجة مع مرشح سعوي (a) ومخططاتها الزمنية (b)

إن الشحن السريع للمكثف عبر الثنائي ذي المقاومة الصغيرة والتفريغ البطيء له عبر الحمل ذي المقاومة العالية يجعل تعرجات جهد الخرج ليست عالية. مما سبق يتبين بأن المكثف يقوم بتخزين الطاقة الكهربائية أثناء فترة تمرير الثنائي ويعطي الطاقة المخزنة أثناء انقطاع الثنائي عن التمرير.

يمكن تشبيهه عمل دائرة التقويم كما يلي: لنفترض بأنه يجب إعطاء أحد المستهلكين تدفقاً ثابتاً من الغاز أو الماء ولكن الضاغط يعطي الغاز (أو الماء) على دفعات، لأنه يمتص الغاز خلال الشوط الأمامي ويدفعه خلال الشوط العكسي. وهذا يشبه عمل دائرة تقويم بدون مكثف، حيث يقوم الثنائي بدور الصمام. فلو وضعنا بين الضاغط والمستهلك خزاناً يضخ إليه الغاز. عندئذ يجري الغاز من إخزان إلى المستهلك بضغط ثابت تقريباً. إخزان هنا يشبه المكثف، فكلما كبرت سعته قلت التعرجات. يعتبر الترشيح جيداً إذا تحقق الشرط $R_f \ll \frac{1}{\omega C}$.

الحساب التقريبي لدائرة تقويم نصف موجه مع مرشح سعوي:

نفرض ما يلي: (انظر الشكلين 5-7 و 6-7)

١- الثابت الزمني $R_L C$ كبير لدرجة تجعل فترة الشحن t_0 صغيرة ومهملة بالمقارنة مع الدور T .

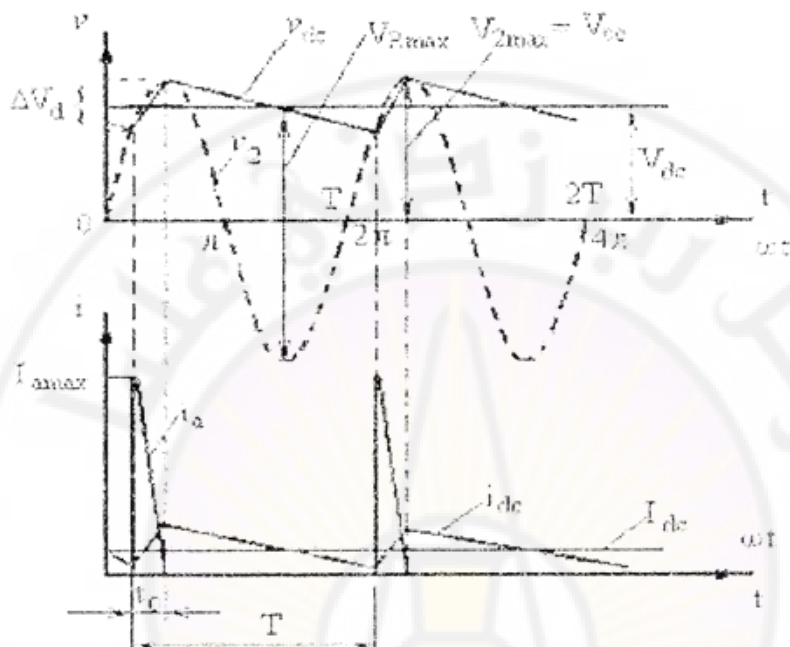
٢- تيار المقوم I_a يمكن تقريبه إلى نبضة مثلثية.

٣- يحدث التبديل عند ذروة الموجة الموجبة لجهد التغذية، لذا فإن $V_{co} = V_{2max}$.

٤- الجزء الجيبي والجزء الأسّي في منحنى v_{dc} يقربان إلى خطوط مستقيمة.

عندما تكون فترة الشحن صغيرة جداً، بحيث يمكن إهمالها، فإن الحمل يُغذى من

المكثف وكمية الشحنة التي تنقل هي:



الشكل 6-7. المخططات الزمنية المقربة لدائرة تقويم نصف موجة مع مكثف

$$Q = I_{dc} T \cong \Delta V_d C = \Delta V_d C \Rightarrow$$

$$\Delta V_d \cong \frac{I_{dc} T}{C} = \frac{I_{dc}}{fC}$$

من الشكل 6-7 نجد بأن القيمة العظمى لجهد المنبع تساوي:

$$V_{2max} = V_{dc} + \frac{\Delta V_d}{2} = V_{dc} + \frac{I_{dc}}{2fC}$$

وكذلك من الشكل 6-7 لدينا :

$$V_{2\max} - \Delta V_d = V_{2\max} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \omega t_o\right) =$$

$$V_{2\max} \cos \omega t_o \Rightarrow$$

زاوية التمرير وزمنه يساويان:

$$\lambda = \omega t_o = \arccos \frac{V_{2\max} - \Delta V_d}{V_{2\max}}$$

$$t_o = \frac{\lambda}{2\pi \cdot f}$$

الشحنة التي يأخذها الحمل تساوي الشحنة التي يتم توصيلها عن طريق المقوم خلال النبضة المثلثية، لذلك فإن:

$$I_{dc} T \cong \frac{1}{2} I_{a\max} t_o = \frac{1}{2} I_{a\max} \frac{\lambda}{2\pi} T \Rightarrow$$

$$I_{a\max} = I_{dc} \frac{4\pi}{\lambda}$$

يتكون جهد التمرج من موجة مثلثية ذات قيمة عظمى $\frac{\Delta V_d}{2}$ و قيمتها الفعالة

تساوي $V_{ac} = \frac{\Delta V_d}{2\sqrt{3}}$ ، لذا فإن عامل التمرج يساوي:

$$k_R = \frac{V_{ac}}{V_{dc}} = \frac{\Delta V_d}{2\sqrt{3} \cdot V_{dc}} = \frac{I_{dc}}{2\sqrt{3} \cdot f C V_{dc}} = \frac{1}{2\sqrt{3} \cdot f C R_L}$$

مثال:

حمل مقاومته $R_L = 4000\Omega$ يراد تغذيته بجهد 200V وتيار 50mA بحيث يكون عامل التموج أقل من 0,02 . صمم دائرة مكونة من مقوم ومرشح لتحقيق هذه المواصفات.

الحل:

على فرض أن تردد المنبع هو 50HZ نجد :

$$C = \frac{1}{2\sqrt{3} \cdot k_R R_L f} = 72\mu F$$

$$\Delta V_d \cong \frac{I_{dc}}{fC} = 13.88V$$

$$V_{2max} = V_{dc} + \frac{\Delta V_d}{2} = 207V$$

$$\lambda = \arccos \frac{V_{2max} - \Delta V_d}{V_{2max}} = 21^\circ$$

$$I_{a\max} = I_{dc} \frac{4\pi}{\lambda} = 1.7A$$

$$V_{R\max} \cong 2V_{2max} = 414V$$

لذلك فإنَّ من المناسب اختيار ثنائي تياره $I_{a\max} = 2A$ وجهده $V = 500V$.

2-1-1-7- تقويم الموجة الكاملة Full Wave Rectifier :

يوجد نوعان من دوائر تقويم الموجة الكاملة:

١- دائرة التقويم الجسرية (الشكل 7-7-a).

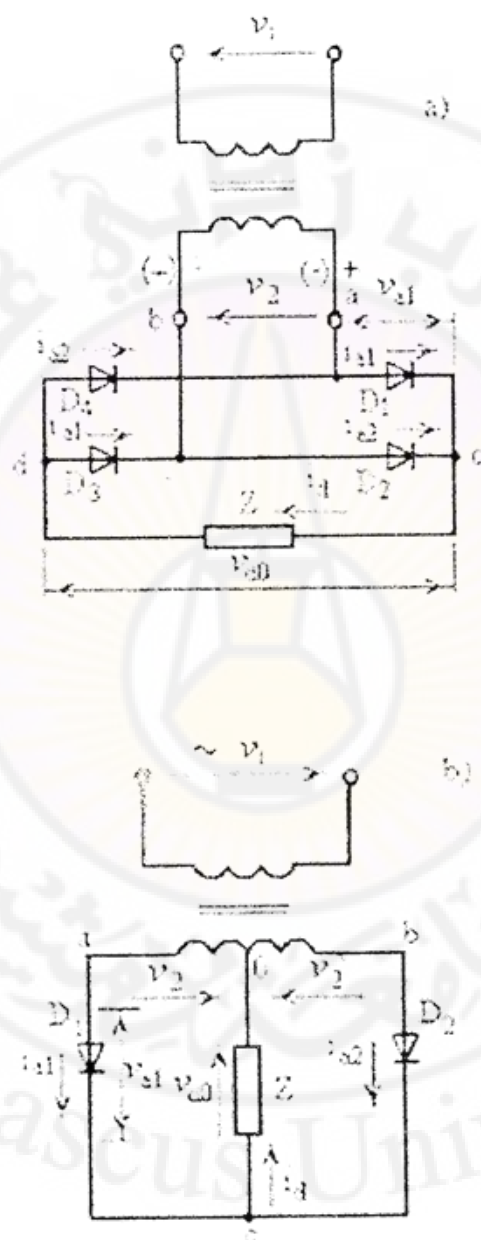
٢- دائرة التقويم ذات النقطة الوسطية للمحول (الشكل 7-7-b).

أ- عمل دارات تقويم الموجة الكاملة على حمل أومي صرف وعلى حمل أومي-تحريري:

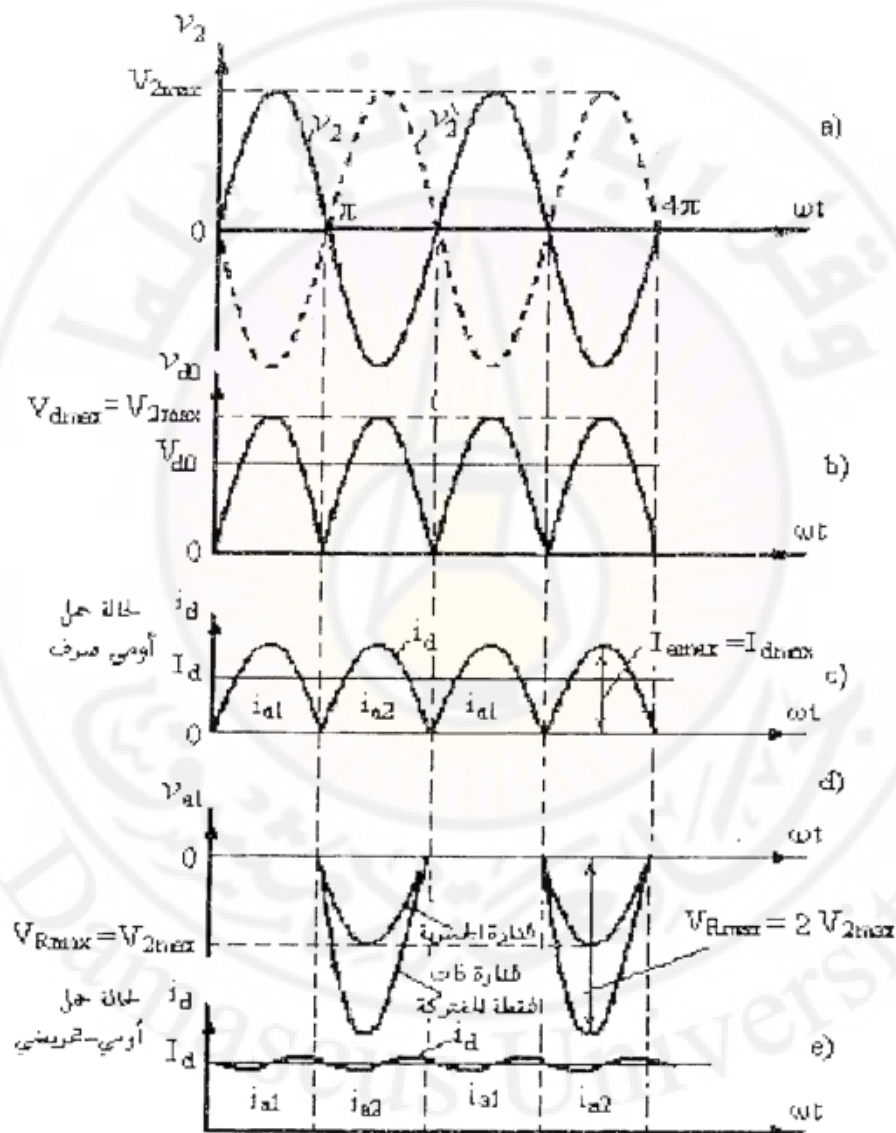
تقوم الشائيات في كلتا الدارتين بإمرار أنصاف الموجات السالبة من المنبع بالاتجاه الموجب إلى الحمل. أي بنفس اتجاه التيار الناتج عن أنصاف الموجات الموجبة. ففي الدارة الجسرية، يمر التيار الناتج عن نصف الموجة الموجب للجهد v_2 (الشكل 7-7-أ) من النقطة a عبر الشائ D₁ إلى الحمل، ثم عبر D₃ فالنهاية الثانية للمحول b. ويمر التيار خلال نصف الموجة السالبة من النقطة b عبر D₂ إلى الحمل، ثم عبر D₄ راجعاً إلى نهاية المحول a. أي أن تيار الحمل i_h يمر دائماً بنفس الاتجاه من c إلى d. (انظر الشكل 7-8-ج).

وفي دارة التقويم ذات النقطة الوسطية للمحول يكون الجهد بين النقطتين o و b (v_2) مساوياً للجهد بين o و a (v_2) ويعاكسه في الاتجاه، أي بين الجهدين إزاحة في الطور مقدارها 180° كما في الشكل (7-8-أ). فيمرر الشائ D₁ أنصاف الموجات الموجبة للجهد v_2 إلى الحمل ($a \rightarrow D_1 \rightarrow c \rightarrow R \rightarrow o$). ويمرر الشائ D₂ أنصاف الموجات الموجبة للجهد v_2 إلى الحمل ($b \rightarrow D_2 \rightarrow c \rightarrow R \rightarrow o$). فيكون اتجاه التيار في الحمل دائماً من c إلى o (الشكل 7-8-ج). عندما يكون الحمل أومياً صرفاً فإن التيار والجهد يتطابقان في الطور ويكون لهما نفس الشكل.

عندما يكون الحمل أومياً-تحريرياً (المحركات الكهربائية مثلاً)، فإن وجود الملف في دارات التقويم يقلل من قيمة التسموجات في منحنى التيار المقوم (الشكل 7-8-د) وكلما كبرت قيمة عامل التحريض I. تقل التعرجات ويصبح الترشيح أفضل، وذلك لأن الملف يعيق تغيرات التيار وبالتالي فالتيار يبقى متأسخراً ولا يستطيع اللحاق بالجهد V_{do} . أما منحنيات الجهد المقوم (الشكل 7-8-ب) والجهد العكسي (الشكل 7-8-د) فهي نفسها للحملين الأومي الصرف والأومي-التحريري.



الشكل 7-7. دارات تقويم الموجة الكاملة



الشكل 8-7. المخططات الزمنية لدارات تقويم موجة كاملة

يتم تحديد وسائط غالبية دارات التقويم بشكل مشابه لدارة تقويم نصف الموجه،
فلتحدد القيمة المتوسطة للجهد المقوم نأخذ التكامل الآتي:

$$V_{do} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_{2\max} \sin \omega t \cdot d(\omega t) = \frac{2V_{2\max}}{\pi} = 0.9V_2$$

تختلف القيمة العظمى للجهد العكسي على الثنائي من دارة لأخرى:
فلندارة الجسرية تساوي:

$$V_{R\max} = V_{2\max} = \frac{\pi}{2} V_{do}$$

أما للدارة ذات النقطة الوسطية للمحول فتساوي:

$$V_{R\max} = 2V_{2\max} = \pi \cdot V_{do}$$

والقيمة المتوسطة للتيار عبر الثنائي:

$$I_a = \frac{I_d}{2}$$

أما باقي القيم فتختلف من دارة لأخرى ونُستخرج كما ذكرنا بشكل مشابه لدارة
تقويم نصف الموجه، لذلك ندرج بعض أهم هذه القيم في الجدول 1-7.

الجدول 1-7

حمل أومي - تحريضي		حمل أومي صرف		
الدائرة ذات النقطة الوسطية للمحول	الدائرة الجسرية	الدائرة ذات النقطة الوسطية للمحول	الدائرة الجسرية	
$S_T = 1.34 I_d V_{d0}$	$S_T = 1.11 I_d V_{d0}$	$S_T = 1.48 I_d V_{d0}$	$S_T = 1.23 I_d V_{d0}$	استطاعة المحول
$I_2 = \frac{I_d}{\sqrt{2}}$ $I_{2m} = I_{dm} = I_{am} \cong I_d$	$I_2 = I_d$ $I_{2m} = I_{dm} = I_{am} \cong I_d$	$I_2 = \frac{I_{2m}}{2}$ $I_{2m} = I_{dm} = I_{am} = \frac{\pi}{2} I_d$	$I_2 = \frac{I_{2m}}{\sqrt{2}}$ $I_{2m} = I_{dm} = I_{am} = \frac{\pi}{2} I_d$	القيمتان الفعالة والعظمى لتيار الملف الثانوي
$I_{arms} = \frac{I_d}{\sqrt{2}}$	$I_{arms} = \frac{I_d}{\sqrt{2}}$	$I_{arms} = \frac{\pi}{4} I_d$	$I_{arms} = \frac{\pi}{4} I_d$	القيمة الفعالة لتيار الثنائي

ب- عمل دائرة تقويم موجة كاملة مع مرشح سعوي:

يستخدم المكثف لترشيح تموجات الجهد المقوم. يبين الشكل 7-9 نوعي دارات

التقويم. أما الشكل 7-10 فيبين المنحنيات الزمنية للجهود والتيارات هذه الدارة.

ففي الفترة الزمنية الواقعة بين O_1 و O_2 يمر التيار عبر الثنائي $(D_3)D_1$ إلى الحمل

والمكثف فيُشحن المكثف، ويكون التيار المار عبر الثنائي i_{a1} وكذلك تيار شحن المكثف

على شكل نبضات، كما في الشكل 10-7.

في اللحظة θ_2 يتساوى v_{dc} مع v_2 فتفصل الثنائيات جميعها بسبب الانحياز العكسي ويبدأ المكثف بالتفريغ عبر الحمل بمنحني أسي وتستمر هذه العملية حتى اللحظة θ_3 حيث يتساوى الجهد المقوم على ضربي المكثف مع الجهد على طرفي الملف الثانوي للمحول فيبدأ الثنائي $D_1(D_4)$ بالتمرير ويُشحن المكثف من جديد.

يمكن تحديد قيم وسائط هذه الدارة بشكل مشابه لدارة تقويم نصف موجة مع مرشح سعوي، ولكن مع الأخذ باحسبان بأن تردد الجهد المقوم لدارة تقويم موجة كاملة هو ضعف تردد المبع. ورغم أن التقريب في هذه الحالة كبير لكنه يكون باتجاه التنعيم الأفضل للجهد المقوم.

مثال:

صمم دائرة تقويم موجة كاملة مع مرشح سعوي أحادية الطور كي تغذي حملاً مقاومته 120Ω بجهد قدره $12V$ بحيث لا يتجاوز عامل التموج 0.024 ، مع العلم أن تردد المبع $50Hz$.

الحل:

$$C = \frac{1}{4\sqrt{3} \cdot k_p R_L f} = 1000 \mu F$$

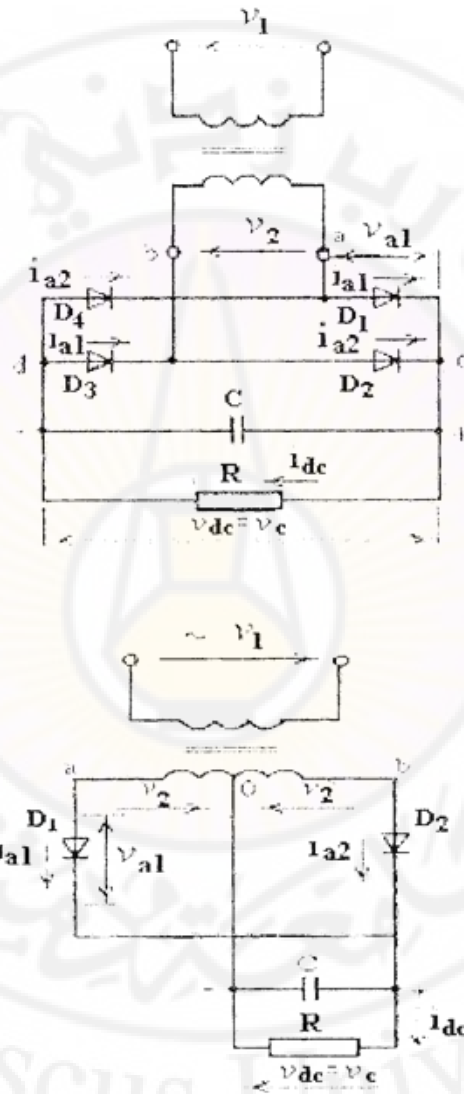
$$\Delta V_d \cong \frac{I_{dc}}{2fC} = 1V$$

$$V_{2max} = V_{dc} + \frac{\Delta V_d}{2} = 12.5V$$

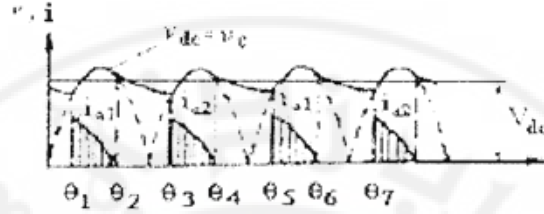
$$\lambda = \arccos \frac{V_{2max} - \Delta V_d}{V_{2max}} = 23^\circ$$

$$I_{dmax} = I_{dc} \frac{2\pi}{\lambda} = 1.565A$$

$$V_{Rmax} \cong 2V_{2max} = 25V$$

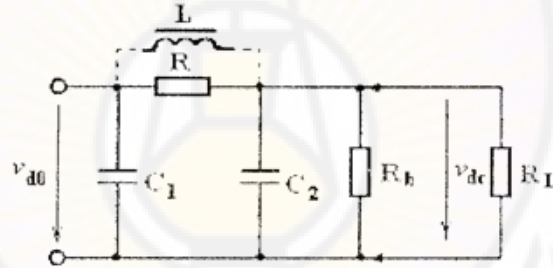


الشكل 9-7. دارتا تقويم موجة كاملة مع مكثف



الشكل 10-7. المخططات الزمنية لدائرة تقويم موجة كاملة مع مكثف

ج- المرشح نوع π :



الشكل 11-7. دائرة المرشح نوع π

يبين الشكل 11-7 دائرة هذا المرشح، وهو يستخدم من أجل الحصول على ترشيح جيد لجهد الخرج المقوم. فكما رأينا سابقاً يبقى الجهد والتيار الناتجان بعد المكثف C_1 يحملان بالإضافة للمركبة المستمرة مركبات متغيرة (تعرجات). يتم تحديد سعة المكثف C_2 بحيث يشكل ممانعة صغيرة جداً بالمقارنة مع مقاومة المرشح $(X_L)R$. فيجب أن تكون المفاعلة السعوية عند تردد الجهد المقوم 100HZ أقل من 10% من قيمة R . عندئذ يشكل C_2 دائرة قصر أمام التعرجات ويسهل

مرورها إلى الأرض ويتخلص تيار الحمل منها. أما مقاومة التمرير R_b فمهمتها تفريغ شحنة المكثفات في حالة اللاحمل. فبدون هذه المقاومة تبقى المكثفات مشحونة لفترة طويلة وتشكل خطراً إذا كان الجهد مرتفعاً.

مثال :

ما هي قيمة سعة المكثف C_2 للمرشح نوع π إذا كانت قيمة مقاومته 33Ω ؟

الحل:

$$X_C = 0.1 \times 33 = 3.3 \Omega$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 100 \cdot 3.3} = 482 \mu F$$

7-1-2- دارات التقويم ثلاثية الطور:

Three-phase rectifier circuits

تستخدم دارات التقويم ثلاثية الطور لتغذية الأجهزة والأحمال ذات القدرة الكبيرة والمتوسطة (الكبيرة $100KW < 100KW$. المتوسطة $1KW < 100KW$) . ومن أهم ما يمتاز به هذه الدارات عن نظيراتها أحادية الطور: ضالة التموجات في جهد الخرج، وتحقيق توزيعاً متساوياً للأحمال على أطوار الشبكة الثلاثة.

7-1-2-1- دارة التقويم ثلاثية الطور ذات النقطة المشتركة:

في هذه الدارة يكون دائماً أحد المقومات في حالة ترميز، إذ إنها تتناوب العمل فيما بينها كل ثلث دور للشبكة، فيمر التيار عبر الثنائي ذي الجهد الأعلى على مصعده، فيصبح جهد الخرج يساوي دائماً أكبر جهد دخل موجب لحالة الدارة ذات المجموعة المهبطية (الشكل 7-12-a) وأكبر جهد دخل سالب لحالة الدارة ذات المجموعة

هنا سوف نتناول المجموعة المهيبة فقط أي المجموعة التي تترايط مهابطها في نقطة واحدة مشتركة. ولا تختلف دائرة المجموعة المصعدية عنها في شيء سوى في اتجاه التيارات والجهود.

يبين الشكل 7-13 المخططات الزمنية لدائرة المجموعة المهيبة فابتداء من اللحظة θ_1 يكون الجهد v_a هو أعلى الجهود، لذلك يبدأ التيار بالمرور عبر المقوم الأول D_1 وفي اللحظة θ_2 يقلل المقوم D_1 ويوصل D_2 لكون الجهد v_b أصبح أكبر من v_a ويستمر D_2 بالتمرير حتى اللحظة θ_3 إذ عندها يصبح جهد مصعد المقوم D_3 هو الأكبر (v_c) فيقلل D_2 ويبدأ D_3 بالتمرير حتى اللحظة الزمنية θ_4 حيث عندها ينتقل التيار من حديد ليمر عبر D_1 وهكذا. تسمى نقاط تقاطع الجهود ($\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots$) بنقاط الإبدال الطبيعي للمقومات. لا يختلف شكل الجهد المقوم للحمل الأومي عن الأومي-التحريض وتحتسب قيمته المتوسطة من العلاقة:

$$V_{do} = \frac{1}{2\pi/3} \int_{\pi/3}^{\pi/3} V_{2\max} \cos \omega t \cdot d(\omega t) =$$

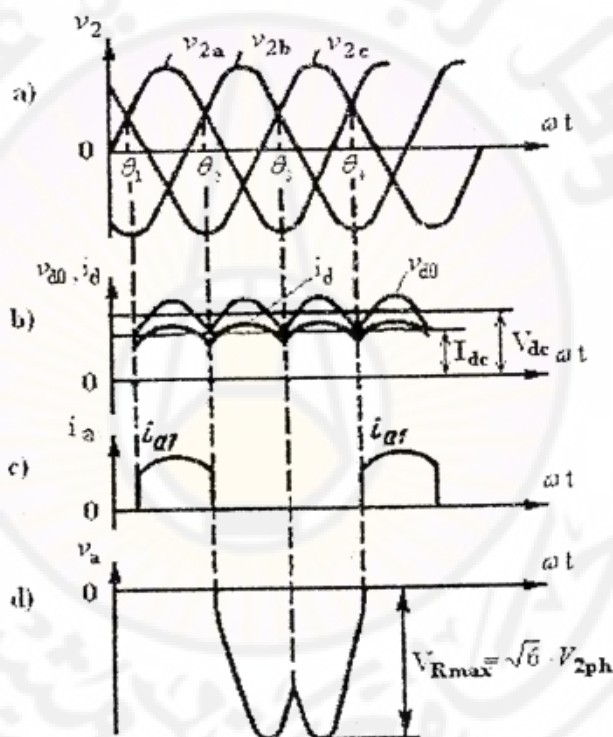
$$= \frac{3V_{2\max}}{\pi} \sin \frac{\pi}{3} = 0.827V_{2\max} = 1.17V_2$$

وبشكل عام إذا كان للدائرة m طور تقويم فإن:

$$V_{do} = \frac{mV_{2\max}}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} \quad (m>1)$$

حيث: m - عدد أدوار التقويم (عدد الذروات في الدور الواحد).

أما التيار المقوم فهو يتطابق في الشكل مع الجهد المقوم (الشكل 7-13، b) لحالة الحمل الأومي الصرف.



الشكل 7-13. المخططات الزمنية لدارة تقويم ثلاثية الطور ذات النقطة المشتركة

أما الحالة الحمل الأومي-التحريض فيمكن اعتبار التيار ثابت القيمة، عبارة عن خط مستقيم يتطابق مع I_{dc} . لهذه الحالة الأخيرة، أي للأحمال التحريضية تكون القيمة

المتوسطة للتيار المار عبر الثنائي تساوي:

$$I_a = \frac{I_{dc}}{3}$$

والقيمة الفعالة للتيار تساوي:

$$I_{a,rms} = \frac{I_{dc}}{\sqrt{3}}$$

إن عدد أطوار التقويم m لدارة التقويم ثلاثية الطور ذات النقطة المشتركة تساوي 3 ولثلاثية الطور الجسرية 6 أما لدارات تقويم الموجة الكاملة أحادية الطور فتساوي 2.

إن استطاعة المحوّل اللازم لدارة التقويم ثلاثية الطور ذات النقطة المشتركة تساوي:

$$S_T = 1.345 I_d V_{do}$$

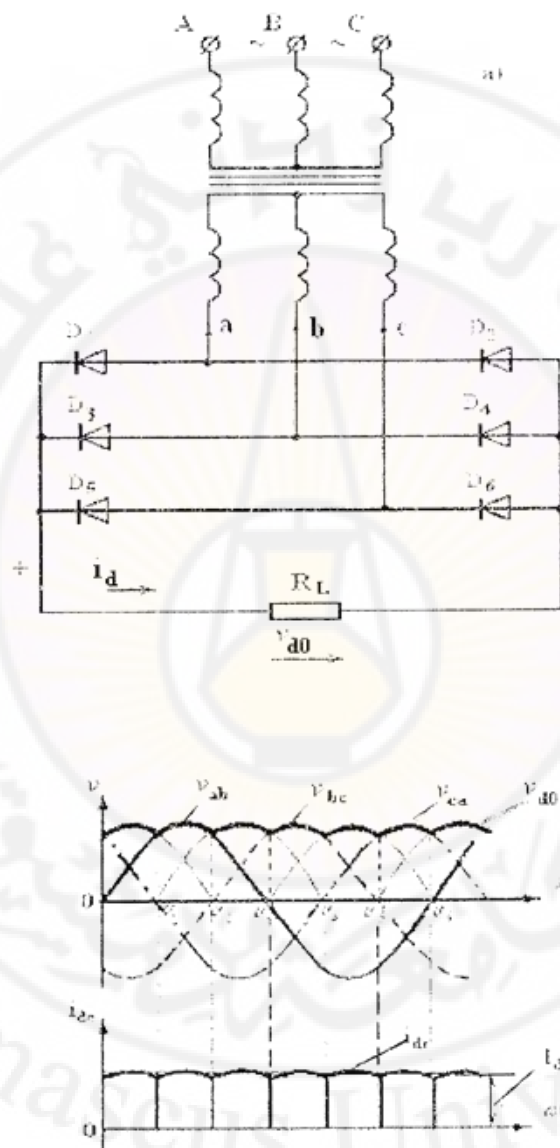
والقيمة العظمى للجهد العكسي على الثنائي الذي يكون في حالة فصل تساوي:

$$V_{R\max} = V_{2I,\max} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} V_{phi}$$

حيث: $V_{2I,\max} \cdot V_{2phi}$ - على الترتيب جهد طور وجهد خط الملف الثانوي للمحول.

7-1-2- دارة التقويم ثلاثية الطور الجسرية:

يبين الشكل 7-14 دارة التقويم الجسرية ومنحنيات جهودها.



الشكل 7-14. دائرة تقويم ثلاثية الطور جسرية (a) ومخططاتها الزمنية (b)

في هذه الدارة يمرر التيار إلى الحمل في كل لحظة- ثنائيان اثنان، أحدهما من المجموعة المهبطية والآخر من المجموعة المصعدية. عند ذلك تمرر التيار تلك الثنائيات التي يكون جهد الخط المسلط عليها هو الأكبر. ففي الفترة الزمنية الواقعة بين θ_1 و θ_2 يكون جهد الخط v_{a1} هو الأكبر فيمرر التيار عبر D_1 و D_4 ، وفي الفترة بين θ_2 و θ_3 يكون نصف الموجة السالبة لجهد الخط v_{a2} هو الأعلى فيمرر التيار من النقطة a عبر D_1 عائداً عبر D_6 إلى النقطة c، وفي الفترة بين θ_3 و θ_4 يصبح الجهد v_{a3} أعلى الجهد فيمرر التيار عبر D_3 و D_6 ... وهكذا. نحدد القيمة المتوسطة للجهد المقوم حسب العلاقة العامة:

$$V_{do} = \frac{mV_{2Lmax}}{\pi} \sin \frac{\pi}{m} = \frac{6V_{2Lmax}}{\pi} \sin 30 =$$

$$= \frac{6\sqrt{3}\sqrt{2}V_{2Ph}}{\pi} \times \frac{1}{2} = 2.34V_{2Ph}$$

حيث: V_{2Lmax} و V_{2Ph} - جهد الخط الأعظمي وجهد الفاعل الطور ثانوي المحول.
القيمة المتوسطة للتيار المار عبر الثنائي تساوي:

$$I_a = \frac{I_{dc}}{3}$$

والقيمة الفعالة للتيار تساوي:

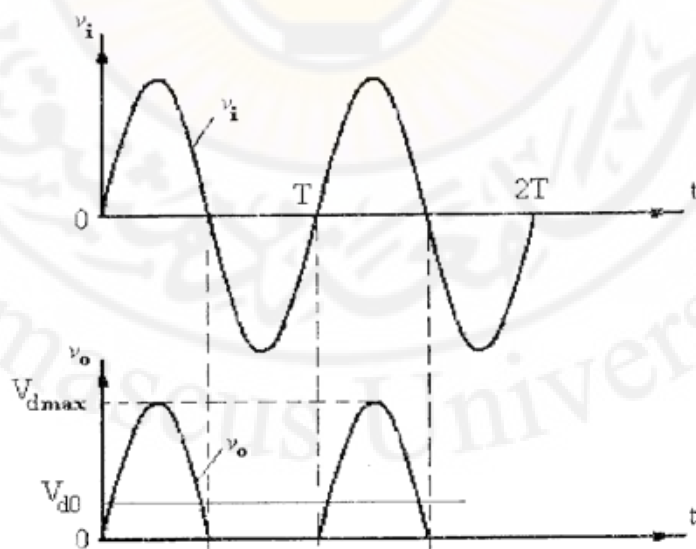
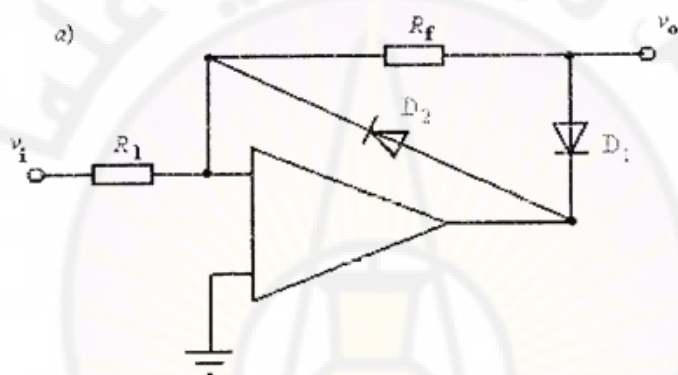
$$I_{a.rms} = \frac{I_{dc}}{\sqrt{3}}$$

3-1-7- تقويم نصف موجة باستخدام مضخمات العمليات:

إن لاهطية خواص الفولت-أمبير للثنائي تشوه إشارة الخرج الضعيفة في دارت التقويم العادية الآتية الذكر، بالإضافة لمبوط الجهد على الثنائيات. للتغلب على هذه العيوب تستخدم دائرة مضخم العمليات المبينة في الشكل 7-15-a وذلك بأخذ الخرج

قبل الثنائي. فعندما يكون جهد الدخل موجباً، أي خرج المضخم سالباً، يصبح الثنائي D_1 موصلاً، وبالتالي:

$$v_O = -\frac{R_f}{R_1} v_i$$



الشكل 7-15. دائرة تقويم نصف موجة مبنية على مضخم العمليات (a) ومنحياقتها (b)

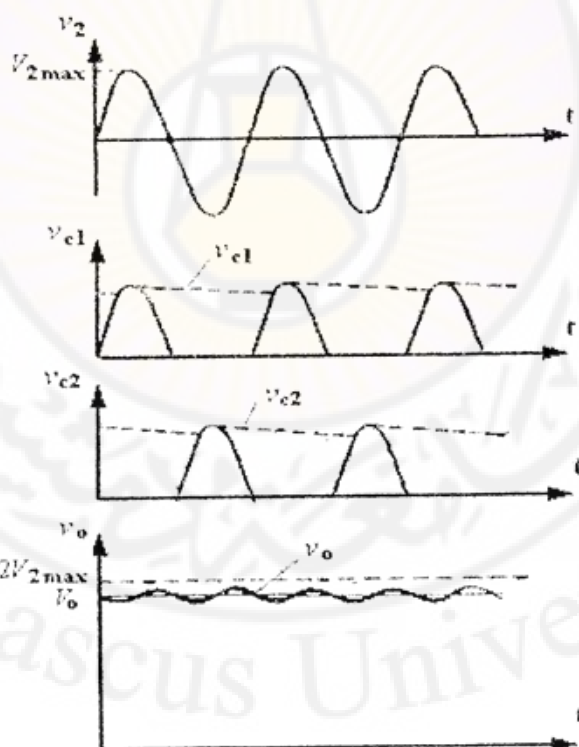
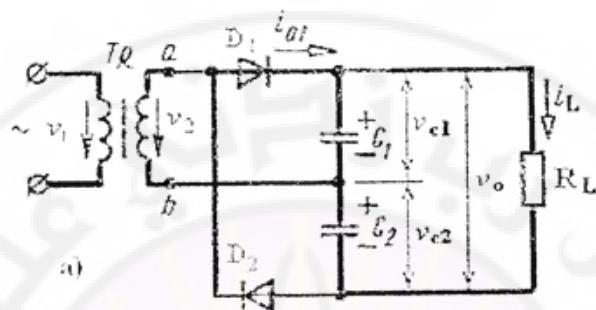
أما عندما يكون جهد الدخل سالباً، يصبح الثنائي D_1 فاصلاً، فلن يمر تيار في R_f و D_1 ، وبالتالي فإن جهد الخرج يساوي الصفر $v_o = 0$ (الشكل 7-15-b). عندئذ يكون الثنائي D_2 واصلًا ويقصر الخرج بالدخل، فيجعل بذلك مقاومة التغذية الخلفية صغيرة جداً، أي أن مهمة D_2 منع تأثير المقاومات العالية للثنائي D_1 ، المنحاز عكسياً، وللمضخم على دائرة التكوين.

7-2- مضاعفات الجهد:

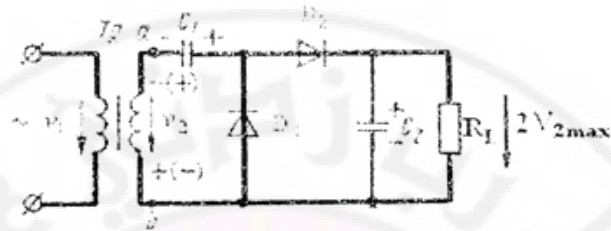
تعمل دوائر مضاعفات الجهد على مضاعفة جهد الدخل عدة مرات وتستخدم لتغذية الأحمال ذات المقاومات الأومية العالية. يبين الشكل 7-16-a مثلاً على دائرة مضاعف جهد تفرعي.

فعند نصف الموجة الموجب يشحن المكثف C_1 عبر D_1 حتى القيمة V_{2max} ويبقى D_2 فاصلاً. وخلال نصف الموجة السالب يشحن C_2 عبر D_2 حتى القيمة V_{2max} أيضاً ويصبح الجهد على الحمل مساوياً $2 V_{2max}$. وعندما تربط مقاومة الحمل R_L فإن عملية تفريغ المكثفات تحصل ببطء شديد بسبب القيمة الكبيرة للثوابت الزمنية $(R_L C)$ ، مما يجعل تغير جهد الخرج طفيفاً جداً، كما هو مبين في الشكل 7-16-b.

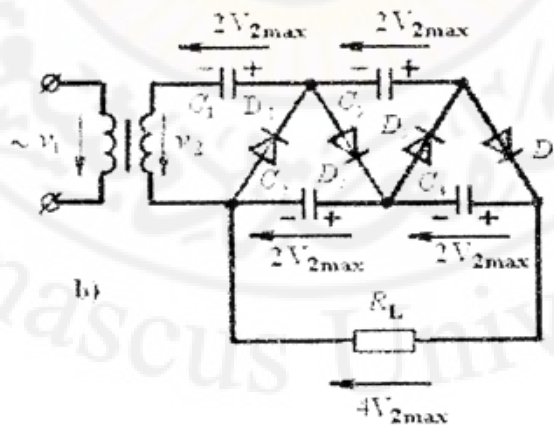
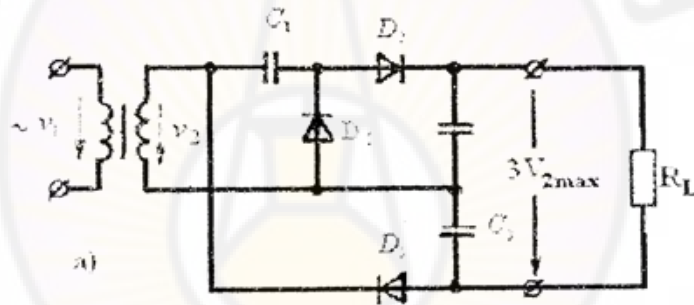
يبين الشكل 7-17 دائرة مضاعف جهد تسلسلي، وهو أكثر استقراراً وأقل تعرجاً من التفرعي. فعند نصف الموجة السالب (كمون النفطة b أكبر من كمون النقطة a) يمر التيار عبر الثنائي D_1 ويشحن المكثف C_1 حتى القيمة V_{2max} ، عندئذ يكون D_2 فاصلاً. وفي نصف الموجة الموجب يفصل D_1 ويمر التيار عبر D_2 فيُشحن المكثف C_2 بمجموع جهد الدخل والجهد على طرفي المكثف C_1 . نتيجة لذلك يصبح الجهد على طرفي C_2 (وعلى الحمل R_L) مساوياً تقريباً $2V_{2max}$.



الشكل 7-16. دائرة مضاعف جهد تفرعي (a) ومخططاته الزمنية (b)



الشكل 7-17. دائرة مضاعف جهد تسلسلي



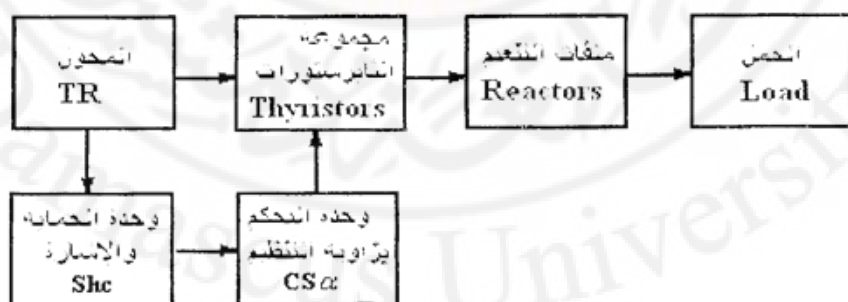
الشكل 7-18. مضاعف الجهد الثلاثي (a) والرباعي (b)

يتألف المضاعف الثلاثي لجهد الدخل (الشكل 7-18-a) من مضاعف تسلسلي ومقوم نصف موجة. أما المضاعف الرباعي (الشكل 7-18-b) فيتألف من مضاعفين تسلسليين موصولين على التوالي. يمكن الحصول على جهد أعلى من جهد الدخل بثمان مرات، وذلك بوصل مضاعفين رباعيين على التسلسل. وهكذا يمكن الحصول على أي جهد نريده بأرخص التكاليف.

3-7- المبدلات الثايرستورية

The Thyristor Phase-Controlled Converters

المبدلة الثايرستورية ($DC \leftarrow AC$) - هي جهاز يقوم بتحويل جهد الشبكة المتناوب إلى جهد مستمر منظم، وتتألف من الثايرستورات ونظام التحكم بالبوابات والمحول ومفاعلات التنعيم والتعادل ومن معدات إضافية كمعدات الفصل والوصل والحماية والإشارة والتبريد، كما هو مبين في الشكل 7-19.



الشكل 7-19. المخطط الصندوقي للمبدلة الثايرستورية

في حالات عدة يمكن تصميم المبدلات الثايرستورية دون محول، إلا أن للمحول في المبدلات الثايرستورية الوظائف والميزات التالية:

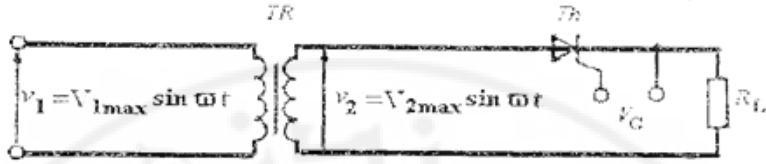
- 1- تحويل الجهد من أجل تحقيق توافق بين جهد الشبكة المتناوب والجهد المستمر المطلوب.
- 2- زيادة عدد الأطوار مما يزيد من نعومة الجهد المقوم.
- 3- الحصول على نقطة الحياد (الصفير) اللازمة لوصول المبدلات ذات النقطة المشتركة.
- 4- عزل شبكة التيار المتناوب عن دائرة التيار المستمر.
- 5- تحسين شكل التيار الابتدائي المسحوب من الشبكة.
- 6- تصميم المبدلات الثايرستورية المركبة.
- 7- الحد من تيار القصر.

لكن لاستخدام المحول مع المبدلات العيوب التي

- 1- زيادة حجم المبدلة وثمنها.
- 2- انخفاض المردود وعامل الاستطاعة.
- 3- انخفاض الجهد المقوم بسبب هبوط الجهد في المقاومة الأومية والتحريضية للمحول.

7-3-1- فكرة التحكم بالثايرستورات بطريقة إزاحة الطور:

إن خواص الثايرستور التي تتجلى بقدرته على حجز الجهد المسلط عليه إلى حين إعطاء نبضة القدح على بوابته حيث ينتقل إلى حالة التوصيل، إذا كان الجهد موجباً على مصعده، وكذلك الفصل التلقائي عند تسليط جهد سالب على مصعده - جعله مناسباً جداً لتقويم الجهد المتناوب والتحكم بهذا الجهد المقوم.



الشكل 7-20. دائرة مبدلة ثايرستورية أحادية الطور - نصف موجة

نوضح هذه الفكرة على دائرة مبدلة ثايرستورية أحادية الطور لتقوم نصف موجة والتحكم بها، وذلك عند عملها على حمل أومي صرف، (الشكل 7-20).
يتم التحكم بتدفق الطاقة من المنبع إلى الحمل بتغيير لحظة إعطاء نبضة القدح
 $v_G(1)$ على بوابة الثايرستور (الشكل 7-20). فإذا سلطت نبضة القدح على البوابة عند بداية نصف الموجة الموجب، فسيوصل الثايرستور خلال نصف الموجة بالكامل، أي من 0 إلى π ، وتكون عند ذلك زاوية القدح $\alpha = 0$ ، ويعود الثايرستور إلى حالة الفصل (الإطفاء) في لحظة الإبدال الطبيعي، (أي عندما يصبح الجهد على مصعده سالباً أو 0).
يمكن تأخير بداية فترة التوصيل بزاوية α وذلك بتأخير لحظة إعطاء نبضة القدح بالنسبة لجهد المنبع المتناوب، فيصبح الجهد المسلط على الحمل:
 $v_d = 0$ عندما $\omega t < \alpha$ و $v_d = V_{2m} \sin \omega t$ في الفترة بين $\alpha - \pi$.
نحدد القيمة المتوسطة للجهد على الحمل:

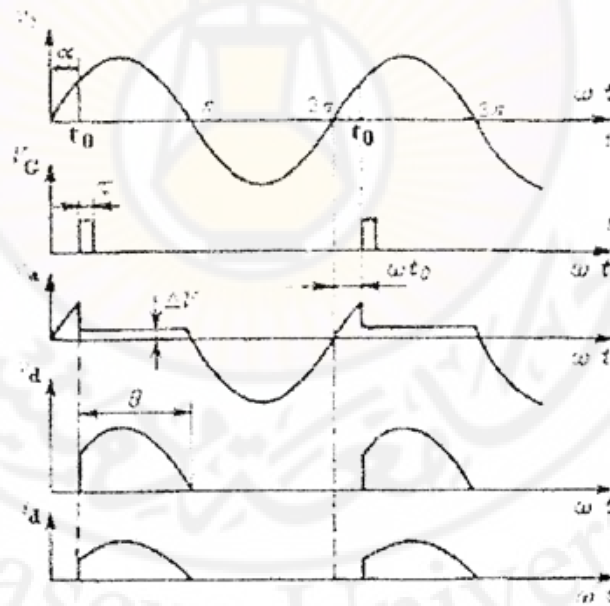
$$V_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} V_{2m} \sin \omega t d(\omega t) = \frac{V_{2m}}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} \sin \omega t d(\omega t)$$

$$V_d = \frac{V_{2m}}{\pi} \frac{(1 + \cos \alpha)}{2} \quad (7-1)$$

والقيمة المتوسطة للتيار المقوم هي:

$$I_d = \frac{V_{2m}}{\pi R} \frac{(1 + \cos \alpha)}{2} \quad (7-2)$$

من العلاقات الأخيرة يتبين أنه بتغيير لحظة إعطاء النبضة V_G تتغير الزاوية α من $0 \leftarrow \pi$ فتتغير القيمة المتوسطة للجهد والتيار المقوم من أكبر قيمة ($I_{d0} = \frac{V_{2m}}{\pi}, V_{d0} = \frac{V_{2m}}{\pi}$) إلى الصفر. هذه هي الفكرة الأساسية للتحكم بالمبدلات الثايرستورية بإزاحة الطور.



الشكل 7-21. المخططات الزمنية لدائرة مبدلة ثايرستورية أحادية الطور - نصف موجة

7-3-2- عمل المبدلات الثايرستورية أحادية الطور على حمل أومي-تحريري:

عندما يكون الحمل عبارة عن مقاومة أومية صرفة فإن مرور التيار في الحمل يتوقف أثناء النصف السالب للموجة (الشكل 7-21)، أما في حالة الحمل الأومي-تحريري (الشكل 7-22) يزداد عمل المبدلات صعوبة ويمكن أن نميز الحالتين التاليتين:

1- حالة التيار المتقطع.

2- حالة التيار المتواصل.

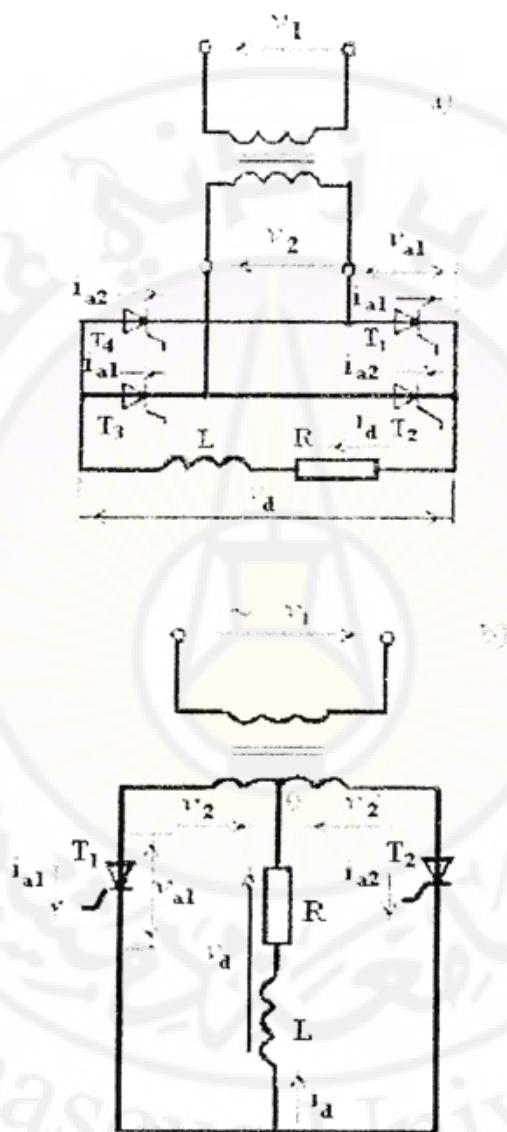
يبين الشكل 7-23 المخططات الزمنية لحالة التيار المتقطع. والشكل 7-24 يبين المخططات الزمنية لحالة التيار المتواصل. يتم قدح الثايرستورات بإعطاء نبضة على بوابة $T_1(T_3)$ في اللحظة α ونبضة على بوابة $T_2(T_4)$ في اللحظة $\alpha + \pi$.

نلاحظ بأن التيار يتزايد بشكل تدريجي بسبب الملف L ، وكذلك عندما يمر جهد المنبع من الصفر فإن التيار لا ينقطع وذلك بسبب القوة الحركية الكهربائية المحتثة في الملف ويستمر التيار في المرور بعض الوقت أثناء الجزء السالب من الموجة، ويطفئ الثايرستور T_1 في اللحظة β عندما يصل التيار عبره إلى الصفر.

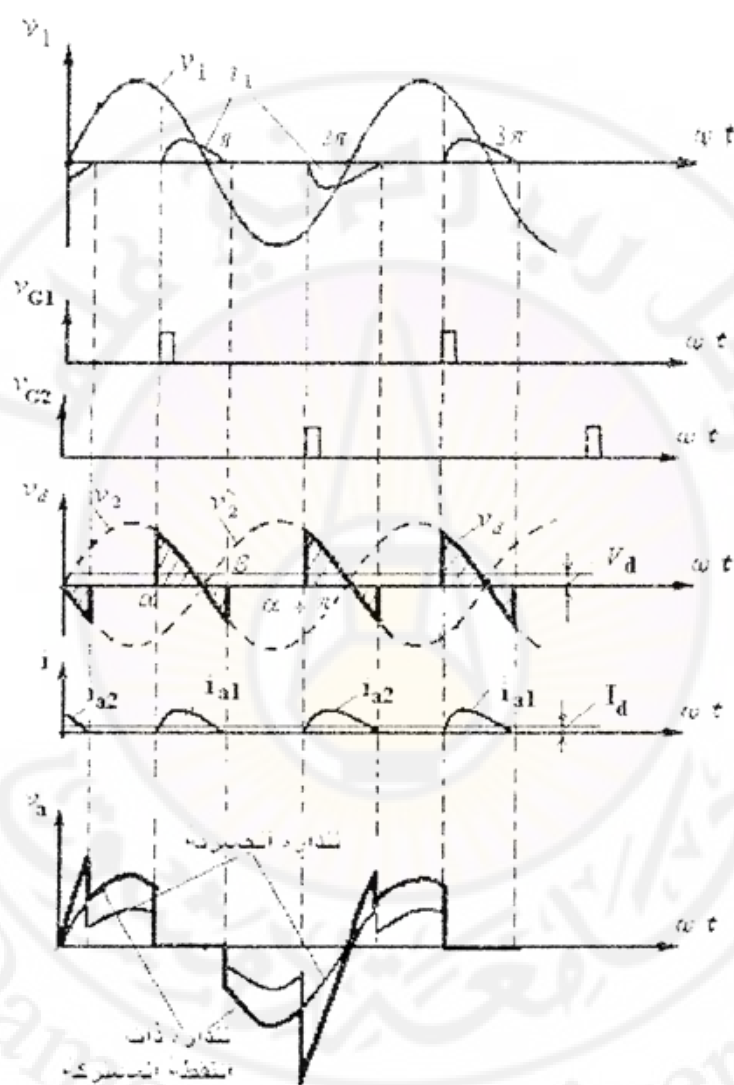
تظهر حالة التيار المتقطع عندما تكون قيمة L صغيرة وقيمة α كبيرة. فيصبح تيار الحمل اللحظي بين β و $\alpha + \pi$ يساوي الصفر. أما القيمة المتوسطة لنجهد في هذه الحالة فتحسب من العلاقة:

$$V_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\beta} V_{2m} \sin \omega t d(\omega t)$$

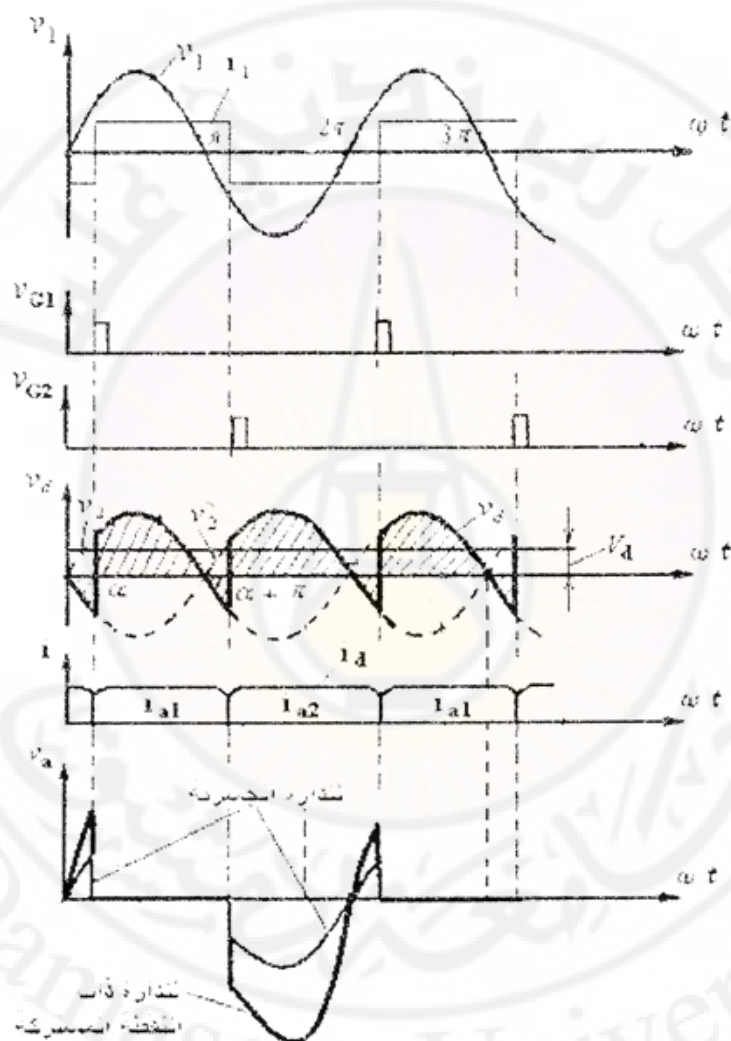
$$\therefore V_d = \frac{V_{2m}}{\pi} (\cos \alpha - \cos \beta)$$



الشكل 22-7. دارتا مبدلتين ثايرستوريين أحاديبي الطور - موجة كاملة



الشكل 7-23. المخططات الزمنية لحالة التيار المتقطع



الشكل 7-24. المخططات الزمنية لحالة التيار المتواصل

إن حالة التيار المتقطع هي حالة غير مرغوب بها لأن المركبة المتناوبة للتيار تزيد من حرارة المحركات الكهربائية، لذلك إذا كانت L ذات قيمة صغيرة يتم وصل ملف آخر (مفاعل) على التسلسل مع المحرك بهدف زيادة قيمة L .
تظهر حالة التيار المتواصل عندما تكون قيمة عامل التحريض الذاتي كبيرة ($L \rightarrow \infty$)، أما إذا كانت L ذات قيمة محدودة فإن نوع التيار يتعلق أيضاً بقيمة زاوية التنظيم α ، فكلما صغرت α يصبح التيار أكثر تواصلاً (انظر خواص التنظيم الموضحة في الشكل 7-25 والمخططات الزمنية في الشكل 7-24).

تُحسب القيمة المتوسطة للجهد في هذه الحالة من العلاقة:

$$V_d = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+180^\circ} V_{2m} \sin \omega t d(\omega t) \Rightarrow$$

$$V_d = \frac{2\sqrt{2}V_2}{\pi} \cos \alpha = 0.9V_2 \cos \alpha \quad (7-3)$$

$$\therefore V_d = V_{d0} \cos \alpha$$

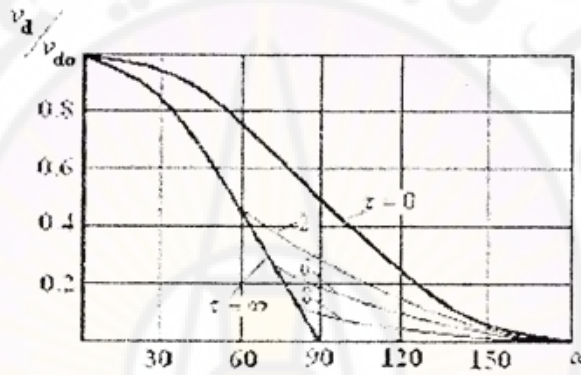
تتعلق القيمة العظمى للجهد الأمامي على الثايرستور $V_{F \max}$ بزاوية التنظيم α ، فهي للدائرة ذات النقطة المشتركة:

$$V_{F \max} = 2V_{2m} \sin \alpha$$

وللدائرة الجسرية:

$$V_{F \max} = V_{2m} \sin \alpha$$

يكون التيار متواصلاً إذا تغيرت α ضمن المجال: $0 < \alpha < \alpha_{cr}$ ، حيث الزاوية الحدية α_{cr} تتبع ثابت الزمن $\tau = \frac{\omega L}{R}$ (انظر خواص التنظيم المبينة في الشكل 25-7). فعندما $\tau \rightarrow \infty$ و $\alpha_{cr} \rightarrow 90^\circ$ أي عندما تكون L كبيرة يمكن تنظيم الجهد ضمن المجال $0 < \alpha < 90^\circ$.



الشكل 25-7. خواص التنظيم

7-3-3- المبدلة الثايرستورية ثلاثية الطور ذات النقطة المشتركة:

يبين الشكل 26-7 دائرة مبدلة ثايرستورية ثلاثية الطور ذات النقطة المشتركة. من أهم مميزات المبدلات ثلاثية الطور جعل الحمل متوازناً على الشبكة و تقليل تعرجات الجهد المقوم.

نفرض أن عامل التحريض L كبير لدرجة كافية يؤمن حالة العمل المتواصل. عند $\alpha = 0$ يتطابق عمل المبدلة مع دائرة التقويم المماثلة، عندئذ يكون الثايرستور من حيث المبدأ قادراً على تمرير نصف الموجة الموجب بالكامل $0 < \omega t < 180^\circ$. إلا أن الثايرستور T_1 ، في المجال $0 - 30^\circ$ ، يكون فاصلاً وذلك بفعل تأثير الجهد v_c ، الذي يكون أكبر من v_d ومسلطاً على T_1 بشكل عكسي عن طريق

T_3 . وفي المجال $150^\circ - 180^\circ$ ، يكون T_1 منحازاً عكسياً أيضاً وذلك لأن الجهد v_B يكون مسطواً بشكل عكسي على T_1 عن طريق T_2 . فيكون مجال تمرير الثايرستور T_1 من 30° حتى 150° (انظر الشكل 7-27-a).

يتم التحكم بلحظة إعطاء النبضات على بوابات الثايرستورات ابتداءً من الزاوية 30° التي تتوافق $\alpha = 0$ ، وبتغيير α يتم التحكم بالقيمة المتوسطة للجهد على الحمل. تُحسب قيمة هذا الجهد لحالة التيار المتواصل كما يلي:

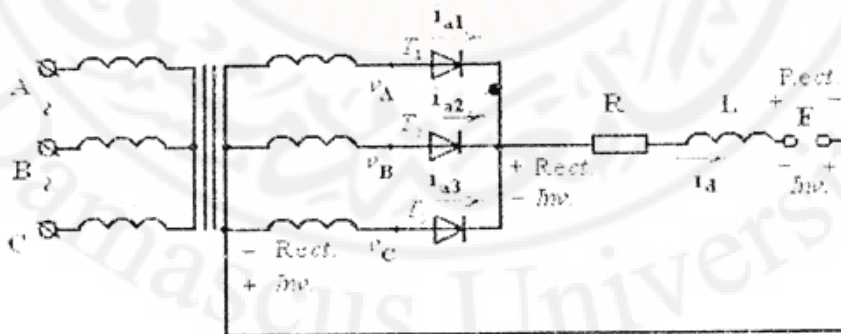
$$V_d = \frac{3}{2\pi} \int_{30^\circ + \alpha}^{150^\circ + \alpha} V_{2m} \sin \omega t d(\omega t) \Rightarrow$$

$$V_d = \frac{3\sqrt{3}\sqrt{2}V_2}{2\pi} \cos \alpha = 1.17 \cdot V_2 \cos \alpha$$

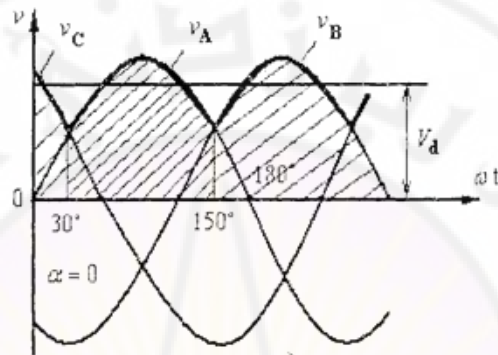
(7-4)

$$\therefore V_d = V_{do} \cos \alpha$$

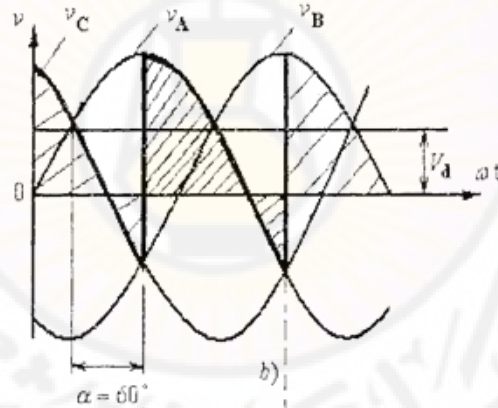
$$V_{do} = 1.17 \cdot V_2$$



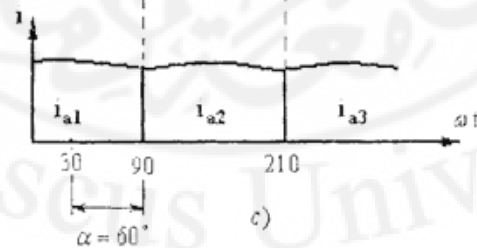
الشكل 7-26. دائرة مبدئية ثايرستورية ثلاثية الطور ذات نقطة مشتركة



a)

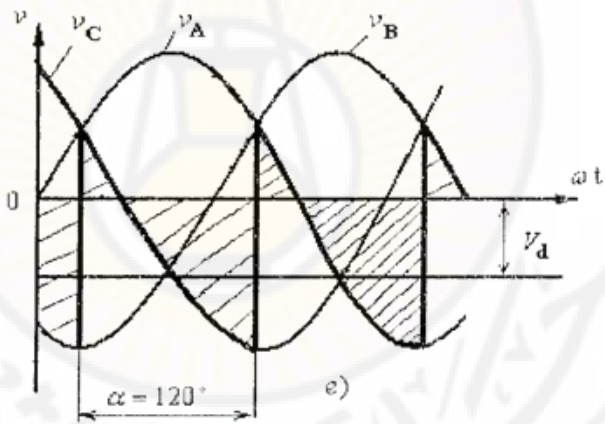
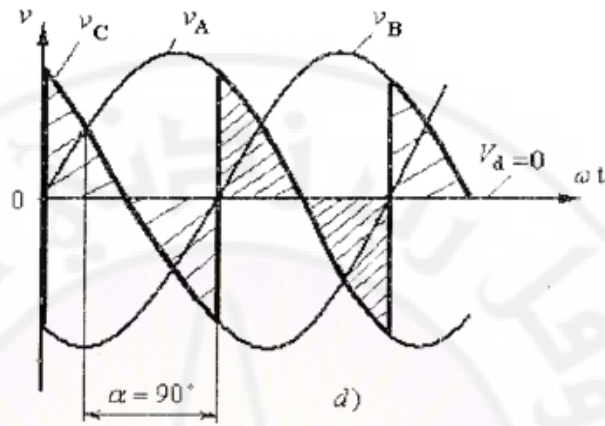


b)



c)

الشكل 7-27. المخططات الزمنية لدائرة مبدلة ثايرستورية ثلاثية الطور ذات النقطة المشتركة



الشكل 27-7. المخططات الزمنية لدارة مبدلة ثايرستورية ثلاثية الطور ذات النقطة المشتركة

يبين الشكل 27-7 b و c منحنيات الجهد والتيار لحالة $\alpha = 60^\circ$. ويسين

الشكل 28-7 خواص التنظيم لهذه الدارة لحالة $\tau \rightarrow \infty$. هذه الخواص تطابق بشكل

كامل العلاقة (7-4) عندما $0 < \alpha < 90^\circ$.

عندما $\alpha = 90^\circ$ فإن $V_d = 0$ (الشكل d-27-7). أما الحالة $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ فحسب العلاقة (7-4) يغير الجهد V_d اتجاهه كما هو مبين في الشكل e-27-7. هذا الجهد السالب لا يمكن أن يمرر تيار في الحمل لأنه يجعل التأثيرات متوازنة عكسياً. لهذا السبب رسمنا الجهد لهذه الحالة مطابقاً لمحور السينات في الشكل 28-7.

إذا وجد في الحمل قوة محرّكة كهربائية فإن الوضع يتغير بشكل جذري (الشكل a-27-7). هنا نميز الحالتين التاليتين:
إذا كانت قطبية القوة المحركة الكهربائية Rect. (أي تقويم) كما هو موضح إليها في الشكل a-27-7 تكون قيمة التيار:

$$\begin{array}{ll} 0 < \alpha < 90^\circ & \text{في المجال} \quad I_d = \frac{V_d - E}{R} \\ 90^\circ < \alpha < 180^\circ & \text{في المجال} \quad I_d = 0 \end{array}$$

أما إذا كانت للقوة المحركة الكهربائية القطبية Inv. تصبح قيمة التيار في المجال $90^\circ < \alpha < 180^\circ$:

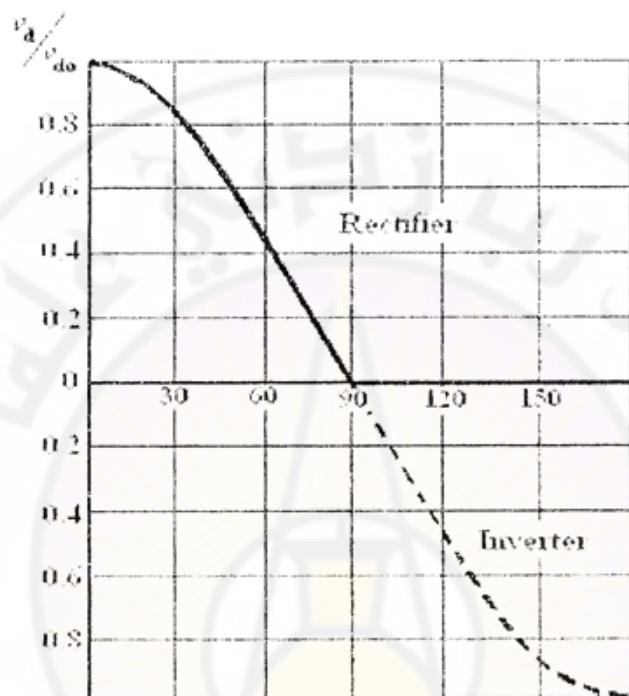
$$I_d = \frac{E - V_d}{R}$$

عندئذ (انظر الشكل a-27-7) يمر التيار بتأثير القوة المحركة الكهربائية للحمل التي تغلب على V_d ذات القطبية المشار إليها Inv. (أي مبدلة عاكسة)، في هذه الحالة تبقى التأثيرات متوازنة في حالة توصيل بسبب الانحياز الأمامي. والطاقة الناتجة تُعاد من الحمل إلى الشبكة عبر المحول وهذا ما يسمى بنظام "إعادة القدرة إلى الشبكة".

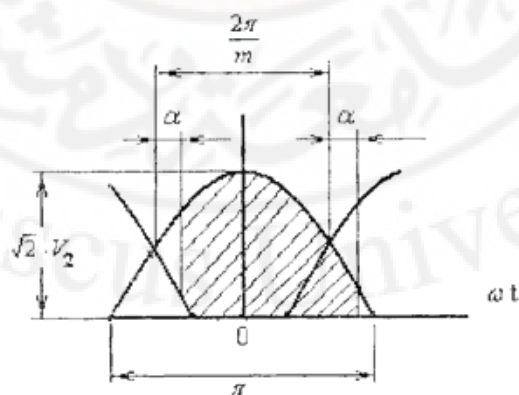
يمكن للدارات المبينة في الشكل 7-22 أن تعمل في نظام إعادة القدرة للشبكة إذا وجد في الحمل قوة محرّكة كهربائية بقطبية Inv. في الحالات الديناميكية تعمل المبدلات في نظام Inverter لحالة $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ دون أن يكون في الحمل قوة محرّكة كهربائية وذلك بتأثير القوة المحركة الكهربائية المتحرضة ذاتياً في الملف L. بشكل عام يمكن تحديد قيمة V_d لحالة m طور وذلك بأخذ تكامل جهد الطور في المجال $2\pi/m$ (انظر الشكل 7-29):

$$\begin{aligned}
 V_d &= \frac{1}{2\pi/m} \int_{-(\pi/m-\alpha)}^{\pi/m+\alpha} V_{2m} \cos \omega t d(\omega t) = \\
 &= \frac{mV_{2m}}{2\pi} \left[\sin\left(\frac{\pi}{m} + \alpha\right) + \sin\left(\frac{\pi}{m} - \alpha\right) \right] = \\
 &= \frac{\sqrt{2}m}{\pi} V_2 \sin \frac{\pi}{m} \cos \alpha = V_{d0} \cos \alpha \\
 V_{d0} &= \frac{\sqrt{2}mV_2}{\pi} \sin \frac{\pi}{m}
 \end{aligned}$$

حيث:



الشكل 28-7. خواص التنظيم للمبدلة التايستورية ثلاثية الطور ذات النقطة المشتركة



الشكل 29-7. منحنى الجهد لحالة m طور تقويم.

ملاحظة هامة: تُحسب المبدلات الثايرستورية وتُصمم عادة لحالة أكبر تيار وجهد خرج، أي حالة $\alpha = 0$ ، وهذا يتطابق مع دارات التقويم، لذلك فإن جميع علاقات دارات التقويم صالحة لتصميم المبدلات الثايرستورية المماثلة لها.

مسألة غير محلولة:

حمل جهده الأسمي 50 فولت وتياره الأسمي 5 أمبير، يُراد تغذيته عن طريق مبدلة ثايرستورية. المطلوب حساب واختيار عناصر هذه المبدلة للحالات التالية:

- ١- لحالة حمل أومي صرف: أ- للدارة الجسرية. ب- للدارة ذات النقطة الوسطية للمحول. ج- للدارة ثلاثية الطور ذات النقطة المشتركة.
- ٢- كم تصبح قيمة الجهد المقوم عند $\alpha = 60$.
- ٣- لحالة حمل أومي-تخريضي: أ- للدارة الجسرية. ب- للدارة ذات النقطة الوسطية للمحول. ج- للدارة ثلاثية الطور ذات النقطة المشتركة.
- ٤- كم تصبح قيمة الجهد المقوم عند $\alpha = 60$. مع العلم إن $L \rightarrow \infty$.

الفصل الثامن

التسخين الكهربائي بتيارات عالية التردد High Frequency Heating

مقدمة [1-4]:

يعتبر تسخين المواد بالتيار الكهربائي أسرع وأنظف وأكثر اقتصادياً وأكثر دقة أيضاً من التسخين بالأفران التي تستخدم الوقود. يمكن أن يتم التسخين، مثلاً، بتطبيق جهد كهربائي على قطعة معدنية فيمر تيار كهربائي فيها مولداً حرارة تناسب معدلها مع $R I^2$ حيث R هي مقاومة القطعة المعدنية وتقدر بالأوم، و I هي شدة التيار الكهربائي المار في هذه القطعة المعدنية وتقدر بالأمبير.

تسمى الأفران التي تستخدم هذا المبدأ للحصول على القدرة الكهربائية بالأفران ذات المقاومة (Resistance-type Furnaces) وهناك أيضاً الأفران ذات القوس (Arc-type Furnaces) وأفران الأشعة تحت الحمراء (IR Furnaces). في مثل تلك الأفران تحترق الحرارة المادة من الخارج.

من جهة أخرى، يمكن إنتاج الحرارة داخل مادة موصلة للتيار الكهربائي بطريقة التسخين بالتحريض، كما يمكن تسخين مادة عازلة من داخلها أيضاً.

يتطلب هذا النوع من التسخين استخدام قدرة كهربائية متناوبة عالية التردد، وتختلف قيمة التردد المختار بحسب الغاية من التسخين وبحسب حجم القطعة المسخنة. يبين الجدول (1-8) مجالات التردد المستخدم للقدرة الكهربائية المتناوبة.

الجدول 1-8- مجالات التردد المستخدم للقدرة الكهربائية المتناوبة

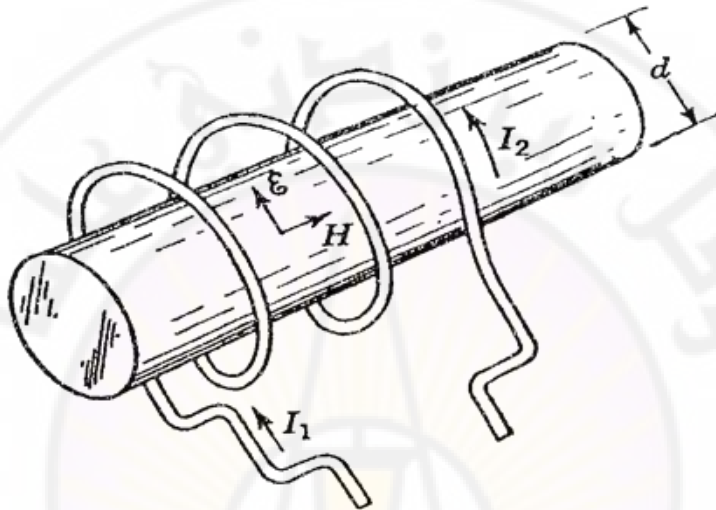
التردد المستخدم	نوع التسخين (التسخين بالتحريض)
(60-600) Hz	التسخين بدرجة حرارة منخفضة للمعدن، التخمير
(600-10.000) Hz	التسخين في العمق، الصهر، التسخين المتجانس
(10-200) KHz	تسخين سطح المعدن
(100-500) KHz	التقسية
(400-1000) KHz	تسخين القطع الصغيرة، الأسلاك، الشرائح المعدنية
(1-50) MHz	تسخين المواد العازلة

1-8- تسخين المعادن بالتحريض الكهربائي:

يمكن أن تسخن كتلة معدنية بسرعة أكبر بكثير مما لو سخنت بالطرق المعروفة كطريقة التسخين في فرن عادي وذلك بوضعها في حقل مغناطيسي ناتج عن مرور تيار متناوب في ملف كما يبينه الشكل 1-8. إن تغير التدفق يحرض جهداً كهربائياً في الكتلة المعدنية ويؤدي هذا الجهد إلى توليد تيارات تحريضية في قلب المعدن ذات مسار يعاكس في اتجاهه تغيرات الحقل المغناطيسي المؤدي لحدوثها.

تسمى هذه التيارات المتحيزة بالتيارات الإعصارية (Eddy Currents) ويمكن تشبيه توليدها بتوليد التيار المتحرض في ملف ثانوي نحول كهربائي ويؤدي مرورها في المعدن إلى حدوث ضياع في الطاقة يظهر بشكل حرارة يسخن القلب

المعدني. وحيث إن هذه الحرارة المتولدة ناتجة عن تيار متحرّض فتسمى هذه الطريقة من التسخين بالتسخين التحريضى (Induction Heating).



شكل 8-1-- تسخين المعادن بتيارات عالية التردد

يمكن باستخدام طريقة التسخين التحريضى تسخين قطعة من الفولاذ بسرعة تزيد 50 مرة عما لو وضعت في فرن عادي ساخن، بالإضافة إلى التجانس الحاصل في توزيع درجة الحرارة داخل القطعة.

في تسخين المعادن، يجب أن نميز بين تسخين المعادن المغناطيسية وتسخين المعادن غير المغناطيسية. فالتيارات الإعصارية تتعرض في كلا النوعين بالإضافة إلى أنه في المعادن المغناطيسية تعتبر الظاهرة التعويقية (Hysteresis) سبباً إضافياً في توليد الحرارة داخل المعدن المغنطيسي.

يمكن أن نعتبر أنه عندما يكون المعدن المغنطيسي جيد التوصيلية (Conductivity)، تكون المفايد الحرارية، عند الترددات العالية، ناتجة عن الظاهرة

التعويقية وتسمى بالمفاقيد التعويقية (Hysterisis Losses) وناتجة أيضاً عن التيارات الإعصارية وتسمى بمفاقيد التيارات الإعصارية (Eddy Current Losses).

عند تسخين قطعة معدنية أسطوانية الشكل يجب أن نحسب القدرة المخترنة داخل المادة (القطعة المعدنية) اللازمة لرفع درجة حرارتها إلى الدرجة المطلوبة خلال زمن تسخين محدد والتي تسمى بقدرة التسخين النوعية (Specific Heat Power) ونرمز إليها بالرمز (P_{th}) .

وإذا تمكنا من تقدير كمية الحرارة الضائعة أثناء عملية التسخين يمكن بالتالي تقدير القدرة المطلوبة من جهاز التسخين ومن ثم تصميم فرن التسخين التحريضي المطلوب. ويعطى التعبير الرياضي لمعدل التسخين بالمعادلة التالية:

$$P_{th} = \frac{MS(\Delta T)}{t} \text{ Watts} \quad (8-1)$$

حيث:

M - وزن المعدن، ليبرة.

t - الزمن، دقيقة.

S - الحرارة النوعية للمعدن.

ΔT - معدل ارتفاع درجة الحرارة، F° (Fahrenheit).

إن المفاقيد الحرارية التي تحدث لحمل مسخن بطريقة التحريض الكهربائي يمكن أن تكون مفاقيد ناتجة عن الإشعاع والحمل والتوصيل. ويمكن، غالباً، إهمال المفاقيد الناتجة عن الحمل والتوصيل أم الفقد الحراري (P_r) الناتج عن الإشعاع فيعطى بواسطة قانون (Stefan-Boltzman) وذلك بفرض أن الجسم أسود أو مشع كامل.

$$P_r = k \times A(T_f^4 - T_o^4) \text{ Watts} \quad (8-2)$$

حيث:

$$k = 5.73 \times 10^{-8} \text{ Watt} / \text{m}^2 / \text{deg}^4$$

A - مساحة السطح المشع الإجمالي، m^2 (متر مربع).

T_o - درجة الحرارة البدائية للمادة، K^0 (Degrees, Kelvin).

T_f - درجة الحرارة النهائية للمادة، K^0 (Degrees Kelvin).

إن القدرة المطلوبة لرفع درجة حرارة جسم أسود إلى الدرجة (T_f) ستكون أكبر من القدرة التي يحتاجها الجسم وذلك بسبب المفايد التي تظهر بشكل إشعاع وغيره. وحيث إن السطوح الفعلية للمعادن ذات معدل إشعاع أقل مما هو للجسم الأسود، فإن القدرة الكلية المطلوبة لرفع درجة حرارة جسم أسود إلى الدرجة (T_f) ستكون أكبر من القدرة اللازمة للمعدن الفعلي. وحيث إننا قد أهملنا المفايد الحرارية الخاصة بالتوصيل والحمل فإن القدرة المحسوبة سابقاً من أجل جسم أسود ستغطي إلى حد ما المفايد الإضافية التي لم تدخل في الحساب.

ستكون القدرة الكلية (P_i) المقدمة من الفرن مساوية إلى القدرة المخزونة في المعدن مضافاً إليها القدرة المفقودة بواسطة الإشعاع أي:

$$P_{th} + P_r = P_i$$

وهذه القدرة، يجب أن تساوي القدرة التي يجب أن يقدمها جهاز التسخين وهي القدرة المتولدة داخل المعدن وهي كما ذكرنا سابقاً أنها قدرة ناتجة عن التيارات الإعصارية التي

تتولد في المعادن غير المغناطيسية وقدرة ناتجة عن كل من التيارات الإعصارية وعن الظاهرة التعويقية التي تتولد في المعادن المغناطيسية.
وتحسب المفايد التعويقية رياضياً بحسب العلاقة التالية:

$$P_h = K B^{1.6} \times f \quad \text{Watts} \quad (8-3)$$

حيث:

K - ثابت.

B - كثافة الفيض (Flux Density) المغناطيسي، Weber/m^2

f - التردد، هرتز، Hz

تعتبر المفايد التعويقية ذات أهمية رئيسية في تسخين المعادن ذات الخواص المغناطيسية عند درجات حرارة دون درجة حرارة كوري (Curie)، وهي من أجل الفولاذ ذي النسبة القليلة من النعم (Low carbon steel) تساوي 1420 درجة فهرنهايت.

تحدد درجة حرارة كوري (Curie) معدن بأنها درجة الحرارة التي يفقد عندها المعدن خواصه المغناطيسية. أي أنه عندما تزيد درجة الحرارة عن نقطة كوري تزول المفايد الناتجة عن الظاهرة التعويقية للمعدن. تعتبر هذه الحالة إحدى المساوي التي تحد من الاستفادة من التسخين الناتج عن المفايد التعويقية.

أما المفايد الناتجة عن التيارات الإعصارية فتقدر كما يلي:

تعطى الكثافة الكلية للقدرة الناتجة عن التيارات الإعصارية على وحدة المساحات والداخلية في المعدن بالمعادلة التالية:

$$P_E = 4 H_o^2 / \sigma \delta \quad \text{Watts/m}^2 \quad (8-4)$$

حيث:

σ - الناقلية، وتقدر بـ: مهو-متر \ متر مربع، mho-meter/meter².
 δ - عمق اختراق التيار المتحرض في المعدن وتقدر بالمتر.
 H_o - شدة الحقل المغناطيسي وتقدر بأمبير لفة لكل متر وتحسب كما يلي:

$$H_o = NI/L \quad (8-5)$$

حيث:

L - طول الملف، (m) متر.
 N - عدد لفات الملف.
 I - شدة التيار، (A) أمبير.

ومن أجل تيار ملف (I) ثابت القيمة، تكون (H_o) ثابتة فتزداد القدرة المتحرضة عندئذ في القضييب المعدني عكسياً مع كل من (σ) و (δ).
 تميل التيارات الإعصارية (تيارات الترددات العالية المتحرضة) إلى المرور خلال الطبقة السطحية للمعدن وهذا يعني أن التيارات المتحرضة في جسم المعدن تمر ضمن عمق محدد ويعتمد عمق اختراقها على تردد التيار.

تسمى هذه الظاهرة التي تشير إلى محاولة مرور التيارات عالية التردد خلال سطح المعدن بالظاهرة القشرية (Skin Effect) ويمكن تفسير ذلك كما يلي:

إن الفيض المغناطيسي الداخلي يكون ذا كثافة أكبر في مركز الأسطوانة منه في النقاط الأخرى. وتقل هذه الكثافة كلما ابتعدنا عن المركز وتبلغ قيمة دنيا في المناطق الواقعة على محيط الأسطوانة. يُفهم من هذا أن الممانعة أمام التيار الكهربائي المتحرض

المتناوب عالي التردد تكون ذات قيمة عظمى في مركز الأسطوانة ويؤدي هذا إلى أن التيار المتحرض يميل إلى المرور قرب السطح ذي الممانعة الأصغر. يمكن تمييز هذه الظاهرة عند (50 Hz) وتصبح واضحة جداً عند ترددات تبلغ بضعة آلاف هرتز في المعادن جيدة الناقية.

ويمكن أن يعطى عمق اختراق التيار (δ) بالمعادلة التالية:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (8-6)$$

حيث:

μ - عامل النفاذ المغناطيسي للمادة المعدنية.

f - التردد، هرتز.

وتعطى μ كما يلي:

$$\mu = \mu_0 \times \mu_r$$

حيث:

μ_r هي النفاذية النسبية (Relative Permeability)

μ_0 هي النفاذية المطلقة للفراغ وتساوي:

$$\mu_0 = 4 \pi 10^{-7} \text{ Henry/meter (h/m)}$$

نلاحظ أن عمق اختراق التيار يتناسب عكسياً مع التردد والناقلية والنفاذية للمادة وهذا يعني أن ازدياد تردد التيار يؤدي إلى أن التيار يحاول أن يمر قريباً جداً من السطح.

ونلاحظ من العلاقات السابقة أن ازدياد تردد المنبع يؤدي أيضاً إلى زيادة القدرة الناتجة عن المفاتيح الخاصة بالتيارات الإعصارية، إلا أنه وجد عملياً أنه من أجل تردد أكبر من قيمة حرجية (f_{cr}) يزداد الفقد في القدرة في ملف التحريض نفسه بنفس السرعة التي تزداد فيها القدرة المتحرضة في المعدن مما يقلل الفائدة من زيادة التردد وتحدد قيمة التردد المرغوب من أجل قضيب معدني ما بالعلاقة التالية:

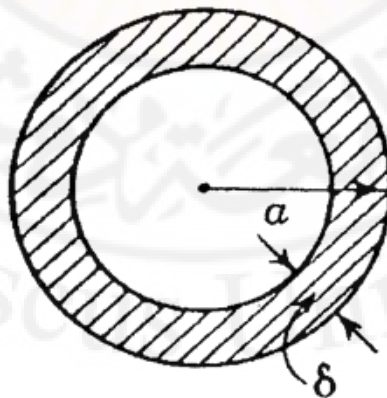
$$a / \delta = 2.5 \quad (8-7)$$

حيث: a هو نصف قطر القضيب المعدني.

ومنه نستنتج قيمة التردد الحرج:

$$f_{cr} \approx 2 / \mu \sigma a^2 \quad (8-8)$$

يبين الشكل 2-8 فكرة قبول أن يكون عمق التسخين (δ) يمثل قشرة بالنسبة لنصف القطر (a) للقضيب المعدني.



شكل 2-8

وضعت العلاقات السابقة باعتبار أن للقطعة المعدنية شكل قضيب أسطواني
ول هذه العلاقات في الكثير من الحالات الأخرى.

، كمثال، في الجدول (2-8) عمق اختراق التيار ضمن معدن النحاس وذلك
ترددات مختلفة:

لجدول 2-8 - عمق اختراق التيار ضمن معدن النحاس

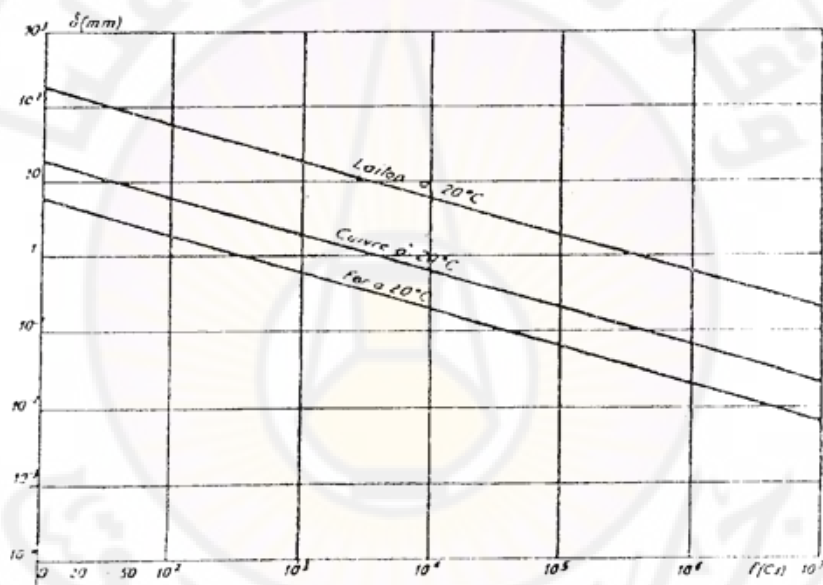
f (C/S)	50	10^4	10^6	10^8	10
δ	8.5 mm	0.6 mm	60 μ m	6 μ m	0.6 ,

حيث إنه من أجل النحاس:

$$\sigma = 0.6 \times 10^8 \text{ mho-m/m}^2$$

من الطبيعي ألا يحافظ عمق الاختراق (δ) على قيمته أثناء المعالجة الحرارية،
فعند ارتفاع درجة الحرارة ستتناقص قيمة ناقلية المعدن مما يزيد من قيمة (δ). وإذا
أخذنا بعين الاعتبار كون المعدن أنه ذو خواص مغناطيسية أيضاً فإن العلاقات السابقة
تصبح تقريبية لأن النفاذية (μ) لا تحافظ على قيمتها عند درجة كوري. فكما ذكرنا
أنه عندما تصل المادة إلى نقطة كوري تختفي الخواص المغناطيسية للمادة وتزداد قيمة
عمق الاختراق (δ) نتيجة لذلك وتعاني، بالتالي، القدرة (P) الناتجة عن التيارات
الإعصارية انخفاضاً مهماً مما يؤدي هذا إلى حدوث نوع من التوازن الحراري بجوار هذه
النقطة.

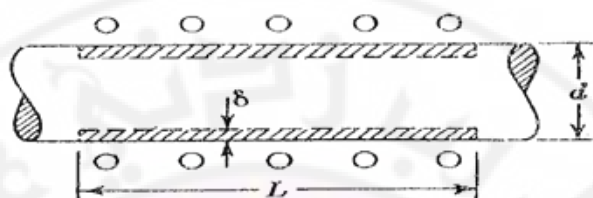
يمكن بالرجوع إلى المنحنى المبين في الشكل 3-8 إيجاد العلاقة بين عمق اختراق التيار δ الذي هو في الواقع عمق التسخين تحت سطح المعدن والتردد (F) اعتماداً على قانون عمق اختراق التيار وذلك لعدة أنواع من المعادن. وبالتالي، فإنه من أجل قطعة ما وبحسب فيما إذا كان المطلوب هو معالجة حرارية سطحية أو معالجة بالعمق فإنه تستعمل ترددات وقدرات كهربائية مختلفة جداً.



شكل 3-8- العلاقة بين عمق التسخين والتردد

إن من مميزات التسخين بتيارات عالية التردد ليس فقط السرعة التي يمكن أن تتم بها عملية التسخين بل أيضاً إمكانية التحكم بالمعالجة الحرارية لجزء محدد فقط من جسم المعدن حيث، كما شاهدنا، يمكن التحكم بوضع الملف بالنسبة للمعدن بالإضافة إلى أن تيارات التردد العالي وهي تيارات التسخين تميل إلى المرور خلال الطبقة السطحية

للمعدن وهذا يعني أنه يمكن تقسية الطبقة الخارجية فقط لقطعة فولاذية مثلاً وفي المنطقة التي نرغبها وذلك كما يبينه الشكل 4-8.



شكل 4-8 - تحديد منطقة التسخين وعمقها

نبين في الجداول التالية ذوات الأرقام (3-8 و 4-8 و 5-8) الثوابت الفيزيائية لبعض المعادن تفيد عند استخدام المعادلات السابقة.

الجدول (3-8) - الثوابت الفيزيائية لبعض المعادن عند درجة حرارة (27°C)^[2]:

Material	Av. Specific Heat (S), Joules/K°/Kg	Density, Kg/m ³	Thermal Conductivity, Watts/m ² /K°	Electrical Conductivity, Mho-m/m ²	Melting Point, C°
Aluminum	962	2560	2.03×10^4	3.54×10^7	660
Brass (66-34)	394	8400	1.2×10^4	1.5×10^7	920
Copper	394	8800	3.88×10^4	5.8×10^7	1083
Iron	461	7860	0.67×10^4	1.04×10^7	1535
Lead	126	11300	0.34×10^4	0.46×10^7	327
Nickel	460	8900	0.6×10^4	1.15×10^7	1452
Silver	234	10400	4.19×10^4	6.11×10^7	960
Steel (18/8)	500	7700	0.16×10^4	0.011×10^7	1410
Tin	240	7300	0.64×10^4	0.86×10^7	232

الجدول (4-8) : الثوابت الفيزيائية لبعض المعادن^[3]؛

Material	Resistivity <i>Ohm-in.</i> at 70 F°	Temp. Coefficient of Resistance F°	Average Specific Heat $Btu/lb/F^{\circ}$			Thermal Conductivity $Btu/hr/ft^2/in$ per F°	Weight Lb/in^3
			70 F°	200 F°	1200 F°		
Aluminum	1.10×10^{-6}	0.00220	0.214	0.230	0.274	1392	0.098
Brass, (60-40)	2.39×10^{-6}	0.00109	0.092	0.094	0.100	877	0.303
Copper	0.697×10^{-6}	0.00218	0.092	0.094	0.110	2668	0.321
Iron, Pure	3.86×10^{-6}	0.00361	0.104	1.113	0.210	467	0.282
Nickel	3.07×10^{-6}	0.00334	0.105	0.113	0.126	415	0.322
Steel, (Soft)	6.75×10^{-6}	0.00240	0.110	0.114	0.143	334	0.284
Steel, Hard- tempered	18.0×10^{-6}	0.00089	0.120	0.125	0.150	334	0.283

الجدول (5-8) - الثوابت الفيزيائية لبعض المعادن-[4]

Substance	Résistivité Ohm-m. à 10°	Coefficient de Température	Point de Fusion
Acier à 0.4% de Carbon	1.4×10^{-7}		1480°
Aluminium	2.82×10^{-8}	4×10^{-3}	660°
Argent	1.63×10^{-8}	4×10^{-3}	960.5°
Bronze Phosphoreux (Sn 4% P5%, Cu 35%)	9.37×10^{-8}		1050°
Cadmium	7.6×10^{-8}	3.8×10^{-3}	321°
Chrome	2.6×10^{-8}		
Constantane (Cu 55%, Ni 45%)	4.9×10^{-7}	2×10^{-4}	1210°
Cuivre (recuit)	1.72×10^{-8}	4.1×10^{-3}	1083°
Fer	9.6×10^{-8}	5.6×10^{-3}	1535°
Nickel	8.69×10^{-8}	7×10^{-3} , 4	1452°
Or	2.43×10^{-8}	3.4×10^{-3}	1063°
Platine	1.06×10^{-7}	3.8×10^{-3}	1171°
Tungstene	5.6×10^{-8}	4.5×10^{-3}	3370°
Zinc	5.8×10^{-8}	3.7×10^{-3}	419°
Manganine (Cu 84%, Mn 12%, Ni 4%)	4.47×10^{-7}	2×10^{-5}	910°
Laiton (Cu 66%, Zn 34%)	6.71×10^{-8}	2×10^{-3}	920°

إن إنجاز التسخين بسرعة كبيرة يعطي التسخين بالتحريض أهمية كبيرة حيث تعتبر هذه السرعة عاملاً مهماً في تحديد نوعية المعالجة الحرارية للجزء من المعدن. فزيادة سرعة التسخين تعني إنقاص الحرارة المنتقلة بالتوصيل أو بالحمل إلى الأجزاء المجاورة إلى الحد الأدنى. كما أن إنتاج الحرارة داخل المعدن مباشرة وليس خارجيه ينقص بالتالي المفاهيم الحرارية إلى درجة مهمة.

مثال (1-8):

قضيب من الفولاذ طوله (12 in) وقطره (1 in) والمطلوب تخميره سطحياً من درجة حرارة محيطية ($20^{\circ}C$) إلى درجة حرارة ($700^{\circ}C$) خلال زمن 45 ثانية. احسب قدرة مولد التردد العالي إذا كان التردد (450 KHz) وذلك بافتراض أن النفاذية النسبية تساوي (100) واحسب عمق اختراق التيار للسطح أيضاً.

1- حساب القدرة المشعة:

$$P_r = 1.89 \times 10^{-8} \times A(T_f^4 - T_o^4) \text{ Watts}$$

حساب مساحة السطح (A):

$$A = 2 \pi r \cdot l + 2 \pi r^2 = 0.02532 \text{ m}^2$$

$$P_r = 1.89 \times 10^{-8} \times 0.02532 \times (973^4 - 293^4) = 426 \text{ Watts}$$

2- حساب القدرة المختزنة في القطعة المعدنية:

$$P_{th} = 17.6 MS (\Delta T) / t$$

حساب الحجم (V):

$$(V) = \pi r^2 l = 9.42 \text{ in}^3$$

حساب الكتلة (M):

$$\begin{aligned} (M) &= \text{Density} \times \text{Volume} \\ &= 0.258 \times 9.42 = 2.68 \text{ lb} \end{aligned}$$

تحويل درجة الحرارة المثوية إلى فهرنهايت:

$$F^{\circ} = 9/5 C^{\circ} + 32$$

$$20 C^{\circ} = 68 F^{\circ}$$

$$700 C^{\circ} = 1290 F^{\circ}$$

إن الحرارة النوعية S للفلولاذ الطري (Soft Steel) عند (1290 F°) هي تقريباً 0.143 .

$$\begin{aligned} P_{th} &= 17.6 \times 2.68 \times 0.143 \times (1290 - 68) / 0.75 = \\ &= 11000 \text{ Watts} \end{aligned}$$

3- حساب القدرة الكلية المطلوبة (قدرة الدخل P_i):

$$P_i = P_{th} + P_r = 11000 + 426 = 11426 \text{ Watts}$$

4- حساب عمق اختراق التيار للسطح (δ) من المعادلة:

$$\delta = 1/\sqrt{\pi \mu \sigma f}$$

تؤخذ قيمة ناقلية الفولاذ مساوية إلى $(11 \times 10^4 \text{ mho-m/m}^2)$ والنفاذية النسبية مساوية إلى (100) فينتج:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \times 4 \times 100^{-7} \times 100 \times 11 \times 10^4 \times 450 \times 1000}}$$

$$= 0.226 \text{ mm}$$

ونحسب شدة الحقل المغناطيسي (H_0) من قانون القدرة الناتجة عن التيارات الإعصارية (المعادلة 8-4):

$$P_E = 4 H_0^2 / \sigma \delta \quad \text{Watts/m}^2$$

$$11426 = 4 H_0^2 / (11 \times 10^4) \cdot (226 \times 10^{-6})$$

$$H_0 = 8427 \text{ Amp.turns/m}$$

لنفرض ملفاً طويلاً وإن القوة المحركة المغناطيسية في مركز الملف تساوي إلى الأمبير لفة المحسوبة لكل متر من الملف. ولنفرض أيضاً أن قطر سلك الملف مع الفراغ بين لفتين يساوي (1.25 cm)، فيحسب عدد اللفات لكل متر كما يلي:

$$N/L = 100/1.25 = 80 \text{ turns/m}$$

ومنه يكون تيار الملف مساوٍ إلى:

$$I = H/(N/L) = 8427/80 = 105.33 \text{ Amp.}$$

وهكذا يمكن أن نخصص ما حسبناه بالشكل التالي:

- مولد تيار عالي التردد بقدرة تزيد عن (11000 W) لتغطية المفايد الخاصة بالملف.
- زمن التسخين 45 ثانية.
- ملف بعدد لفات 80 لكل متر.
- تيار الملف 105 أمبير.

ملاحظات:

بالرغم من أن درجة الحرارة المتولدة تكون على السطح فإن معظم هذه الحرارة قد يضيع بطريقة التوصيل إلى الأقسام الباردة من القطعة المعدنية أو بطريقة الإشعاع من السطح الحار، لذلك فإنه من الضروري أن يتم رفع درجة حرارة السطح إلى درجة عالية بزمان قصير جداً ومن ثم تتم تقسية السطح قبل أن يحصل ذلك الضياع. فهذه الطريقة يمكن تخفيض كلفة التقسية وتحافظ القطعة على شكلها حيث إنه قد يحتاج الأمر، في حال تسخين القطعة بكاملها، إلى إعادة تقويمها من جديد.

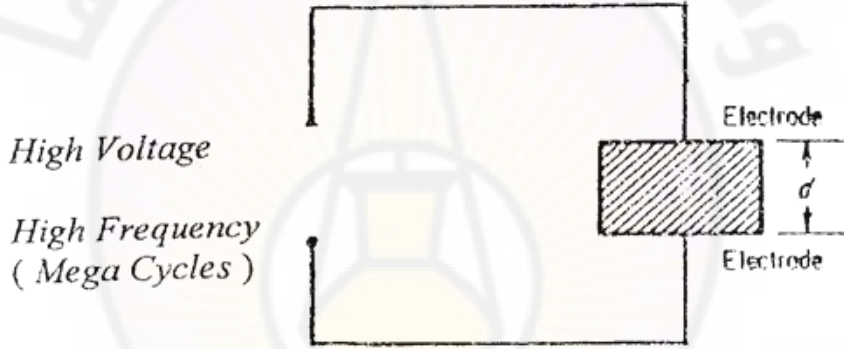
مع أنه يوجد عدة قوانين تساعد في اختيار قيمة تردد وقدرة المولد فإن معظم حالات التسخين بالتحريض تعتمد على قيم ونتائج تجريبية.

إن التردد المطلوب لا يعتمد كثيراً على نوع المادة الموصلة إنما يحدد بعد الأخذ بعين الاعتبار حجم القطعة وشكلها وكذلك عمق التسخين.

من أجل القضبان التي يزيد قطرها عن نصف إنش يستعمل في حال التقسية تردد يقل عن (10000 Hz) وقدرة مولد تساوي (15 KW) لكل إنش مربع من مساحة السطح. أما تقسية سطوح القضبان الأصغر حجماً فإنها تتطلب قدرة أكبر وتردداً أعلى قد يزيد عن (100 KHz).

2-8- تسخين المواد العازلة بتيارات عالية التردد:

يمكن تسخين المواد العازلة تسخيناً متجانساً وذلك بتطبيق جهد كهربائي مرتفع عالي التردد على هذه المادة. يؤدي وضع المادة العازلة بين قطبين كهربائيين كما يبدو في الشكل 5-8 إلى ارتفاع درجة حرارة هذه المادة نتيجة لما يسمى بالاحتكاك الذري في المادة العازلة الناتج عن الانعكاس السريع جداً للحقل الكهربائي للجهد العالي المتناوب المطبق.



شكل 5-8 - مادة عازلة ضمن قطبين يطبق عليهما جهد كهربائي عالي التردد

تتوزع الحرارة المتولدة بهذه الطريقة بشكل متجانس ضمن أجزاء المادة العازلة وبسرعة كبيرة لا تتجاوز بضعة دقائق من أجل قطعة سميكة بالرغم من أن المادة العازلة هي ذات ناقلية حرارية رديئة جداً. تشكل المادة العازلة الموضوعة ضمن أقطاب كهربائية مكثفاً كهربائياً وتعطى سعة هذا المكثف بالعلاقة التالية:

$$C = 0.0885 \varepsilon A/d \text{ Pico F.}$$

حيث:

ϵ - ثابت العازلية.

A - مساحة القطب، cm^2 .

d - المسافة بين القطبين، cm .

وتحسب القدرة المسلمة إلى المكثف كما يلي:

$$P_C = |E| \times |I| \times \cos \phi$$

حيث $(\cos \phi)$ هو عامل القدرة (Power factor) للحمل (المادة العازلة). ويعطى من الجدول 6-8. أما التيار المار في الحمل فيساوي:

$$I = |E \times w \times C|$$

وتكون القدرة المسلمة الى الحمل كما يلي:

$$P_L = E^2 \times w \times C \times \cos \phi$$

ويجب أن تكون القدرة الحرارية المطلوبة إلى الحمل مساوية إلى القدرة المطبقة. وحيث إن القدرة الحرارية تساوي إلى:

$$P_{th} = 17.6 M S (\Delta T) / t \quad \text{Watts}$$

يكون:

$$P_{in} = P_L = 17.6 M S (\Delta T) / t = E^2 \times w \times C \times \cos \phi$$

حيث:

S - الحرارة النوعية للمادة العازلة، $Btu/Lb/F^{\circ}$.

ΔT - معدل ارتفاع درجة الحرارة، F° .

M - وزن المادة، Lb .

t - زمن التسخين، min .

w - ويساوي إلى $(2\pi f)$ حيث f هو تردد التيار الكهربائي، هرتز.

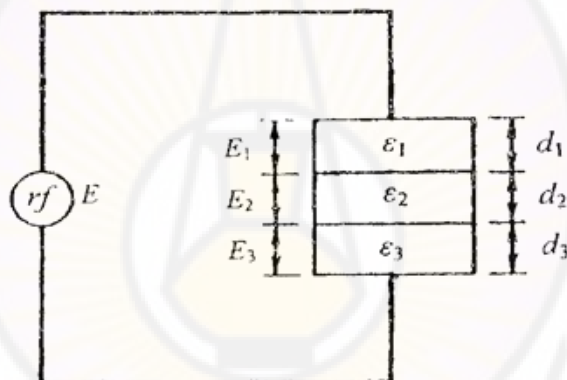
E - الجهد الكهربائي، فولت.

الجدول (6-8) : الثوابت الفيزيائية لبعض المواد العازلة^[3]

Material	Volume Resistivity $Ohm-In$	Specific Heat, $Btu/Lb/F^{\circ}$	Weight, Lb/In^3	Dielectric Constant		Power Factor	
				1 MHz	30 MHz	1 MHz	30 MHz
Fiber, Commercial	$10^9 \times 2$	0.25	0.038	5.0		0.05	
Glass, Pyrex	$10^{13} \times 2$	0.20	0.077	4.0	4.0	$10^{-3} \times 75$	0.001
Nylon	$10^{12} \times 4$	0.55	0.014	3.0	3.0	0.02	0.02
Phenolic Insulation Nema Grade CE	$10^{11} \times 4$	0.42	0.049	5.3	5.0	0.05	0.066
Resins, Beetle		0.054	0.054	5.5	5.2	0.027	0.05
Rubber, Natural Gum	$10^{12} - 10^{15}$	0.33	0.041	2.4	2.4	0.002	0.004
Maple	10^{10}	0.42	0.022	4.4		0.0341	
Mahogany	$10^{13} \times 2$	0.42	0.024	2.1	2.1	0.03	0.04

إن من أهم مميزات تسخين المواد العازلة بهذه الطريقة هو أن الحرارة تتولد كلياً داخل المادة العازلة. فبافتراض أن المادة متجانسة وأن الحقل الكهرومغناطيسي المتغير متجانس فإن الحرارة المتولدة وكذلك معدل ارتفاع درجة الحرارة يكونان متجانسين داخل المادة.

وحيث إن ارتفاع درجة الحرارة يكون منتظماً فإن التسخين يتم بسرعة، وهذه الطريقة هي أفضل بكثير من الطرق العادية في التسخين التي يجب تطبيق الحرارة فيها على جميع جوانب المادة بالإضافة إلى عدم التجانس في توزيع الحرارة داخل المادة.



شكل 6-8 - تسخين عدة مواد عازلة مختلفة

افتترضت المعادلات السابقة أن المادة تملأ الفراغ بين القطبين إلا أنه في حال أن هذه الفرضية غير حقيقة فإنه يمكن اعتبار الحالة كما في الشكل 6-8 حيث يبين هذا الشكل ثلاث طبقات من مواد عازلة مختلفة موجودة بين قطبين يطبق عليهما جهد كهربائي (E) عالي التردد. يتوزع الجهد الكلي (E) على هذه الطبقات كما هو مبين وتكون السعة الخاصة بكل طبقة هي (C_1) و (C_2) و (C_3) حيث تعتبر ثوابت العزل لها هي: (ϵ_1) و (ϵ_2) و (ϵ_3) .

$$C_1 = k \varepsilon_1 A_1/d_1$$

$$C_2 = k \varepsilon_2 A_2/d_2$$

$$C_3 = k \varepsilon_3 A_3/d_3$$

مثال: (2-8)

يراد تسخين كتلة من المطاط الطبيعي مساحتها 4 قدم مربع وسماكتها 0.5 إنش بوضعها بين لوحين معدنيين بنفس المساحة يطبق عليهما جهد كهربائي متناوب بتردد (1 MHz). ترتفع درجة الحرارة (300 F°) خلال زمن تسخين خمسة دقائق. احسب القدرة المطلوبة عند الحمل والجهد المطبق.

الحل:

حساب حجم القطعة:

$$V = 24 \times 24 \times 0.5 = 288 \text{ In}^3$$

حساب وزن القطعة:

$$W = 288 \times 0.041 = 11.8 \text{ Lb}$$

حساب الاستطاعة المخزنة:

$$P_{th} = 17.6 \times M \times S \times (\Delta T) / t =$$

$$= 17.6 \times 11.8 \times 0.33 \times 300 / 5 = 4110 \text{ Watts}$$

حساب السعة:

$$C = 2250 \frac{\epsilon \times A}{d} \times 10^{-10}$$

$$= 2250 \times 2.4 \times 24 \times 24 \times 10^{-10} / 0.5 = 6.23 \times 10^{-10} \mu F$$

حساب الجهد المطبق E :

$$P = E^2 \times w \times C \times \cos \theta$$

$$4100 = E^2 \times 2\pi \times 10^{-6} \times 6.23 \times 10^{-10} \times 0.002$$

$$E = 23000 \text{ volts.}$$

الفصل التاسع

القياسات وأجهزة القياس الكهربائية:

Electrical Measurements

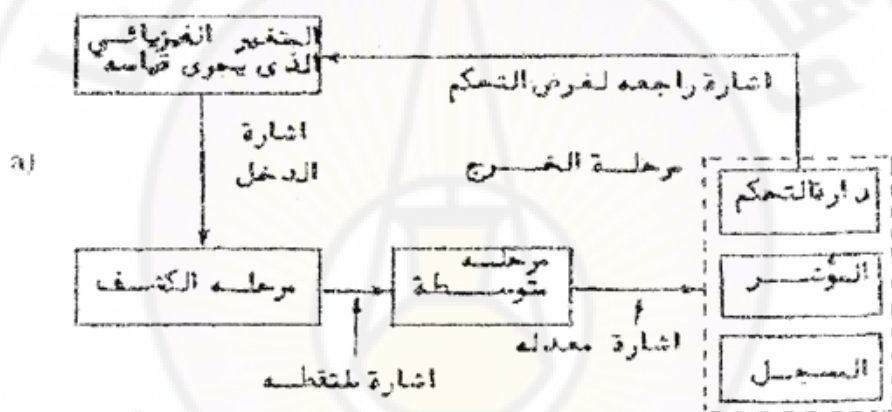
مقدمة [18,27,28,32,33]:

يعتمد التقدم العلمي والتقني لأي أمة على قدرتها على قياس وحساب وتقدير القيم المجهولة كما أن نجاح أي مهندس أو تقني يعتمد على قدرته في تحقيق الدقة في تجهيز الدارات والآلات وتفسير عملها. تحتل القياسات مكانة مرموقة في الأبحاث العلمية وفي الصناعة والزراعة والطب والنقل وغيرها. فبدون القياسات لا يمكن اكتشاف القوانين العلمية أو تقويم عمل الآلات .

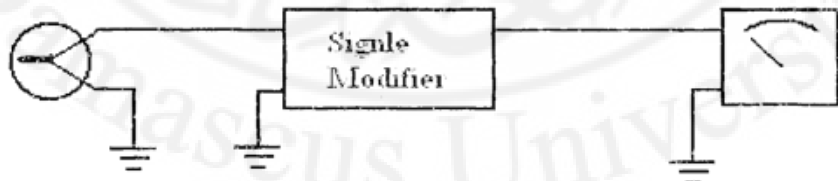
9-1- مراحل عملية القياس ومهمتها:

إن مهمة القياسات تكمن في إيجاد المقادير الفيزيائية تجريبياً، بمساعدة تقنية قياس تعبر عن القيم الفيزيائية بواسطة واحدة القياس. فالقياس عملية مقارنة بين قيمة فيزيائية يراد قياسها، وأخرى مشاهد لها فيزيائياً تسمى واحدة القياس، من أجل معرفة كم واحدة قياس تحتوي القيمة المجهولة. يبين الشكل a-1-9 عملية الربط والتنسيق بين العناصر المختلفة التي تشكل نظام قياس متكامل والذي يظهر مراحل القياس التي تتألف منها معظم نظم القياس وهي:

١ - مرحلة الكشف والالتقاط - ويتم فيها الكشف عن ظاهرة فيزيائية (حرارة، ضغط، سرعة، فيض مغناطيسي، إلخ) وتحويلها إلى مقدار فيزيائي قابل للقياس (إشارة كهربائية)، وذلك بواسطة عناصر حساسة للمقدار المقاس. وتسمى هذه العناصر بالجيسات أو مبدلات القياس (Transducer).



Transducer
(Thermocouple)



b)

الشكل 1-9. مراحل القياس

٢- المرحلة المتوسطة- وفيها يتم تعديل الإشارة (تكبيرها، تصغيرها، ترشيحها أو غير ذلك) لتصبح ذات شكل وقيمة مرغوبة ومناسبة لاستجابة الأداة القياسية. ويتم ذلك بواسطة مكيفات الإشارة (المخزّنات، المضخمات، دارات التقويم، المرشحات وغيرها).

٣- المرحلة النهائية- ويتم في هذه المرحلة التعرف على قيمة المتغير الفيزيائي بواسطة المؤشر أو بالتسجيل أو غيرها. والشكل 9-1-b يوضح هذه المراحل على مثال قياس درجة الحرارة. وقد تحتوي المرحلة النهائية على نظام تحكم وعندها يحتوي نظام القياس على تغذية عكسية. فلو فرضنا أن المتغير المراد قياسه هو درجة حرارة فرن مثلاً، فإذا أشار المؤشر إلى قيمة الحرارة المطلوبة (المحددة سابقاً)، فإن نظام التحكم لا يفعل شيئاً، أما في حال أصبحت درجة الحرارة في الفرن أكبر أو أصغر من قيمتها المحددة عندها يعمل نظام التحكم على زيادة التيار المار في المسخن وإعادة الحرارة إلى قيمتها المطلوبة. وهذا ما يتحقق عن طريق التغذية العكسية.

هذا المثال يبين الارتباط الوثيق بين القياس والتحكم، ومن المهم أن ندرك بأن دقة التحكم لا يمكن أن تكون أفضل من دقة قياس المتغير الفيزيائي فلذلك لابد من القياس الدقيق للمتغير قبل أن نتحكم به.

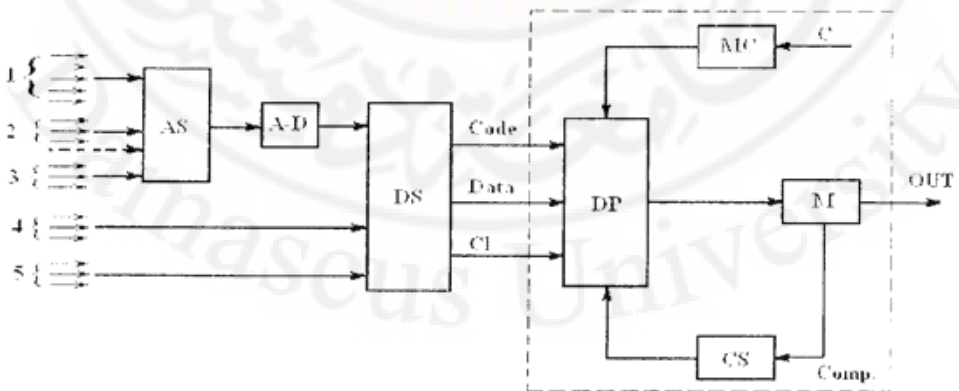
مما سبق يمكن استنتاج تعريف جهاز القياس:

جهاز القياس الكهربائي في أوسع معانيه هو تركيب كهربائي مهمته تبديل جميع الإشارات على مداخله إلى إشارة كهربائية (تيار أو جهد) تحمل معلومات قياسية عن الإشارات الأولية ومن ثم يقوم المقياس بمقارنة القيمة المجهولة بالقيم المعيارية ويعطي النتيجة النهائية بعد إظهارها بالطرق الملائمة للإنسان، وذلك على لوحة تدريج خاصة أو على شاشة.

9-2- نظام القياس الرقمي:

يمكن لتقنيات القياس الحديثة أن تقيس عدة قيم في آن واحد وتعطي النتائج منظمّة وجاهزة بعد أن تقوم بتحليلها. وتسمى هذه التقنيات بنظم القياس الذكية. يبين الشكل 9-2 نظام قياس معلوماتي بسيط.

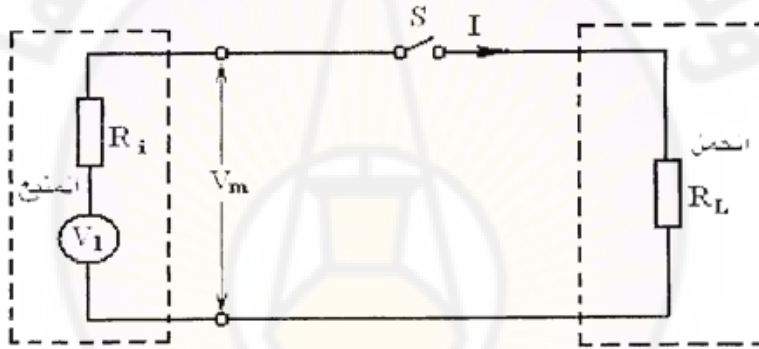
تدخل إشارات القياس التماثلية (1،2،3)، من وسائل القياس التماثلية، إلى جهاز تجميع الإشارات التماثلية متعدد القنوات (AS)، وتقوم المبدلة التماثلية الرقمية (A-D) بتحويل هذه الإشارات التماثلية إلى رقمية وتتجمع في جهاز الإدخال الرقمي متعدد القنوات (DS) مع الإشارات الرقمية (4،5) القادمة من وسائل القياس الرقمية مباشرة. ويتصل جهاز الإدخال الرقمي بالحاسوب (computer) عبر قنوات: الترميز (code) والمعطيات (data) وإشارة قناة التوقيت التزامنية (cl). أما الحاسوب فيتألف من الأجزاء التالية: DP-وحدة معالجة المعلومات. MC-وحدة ذاكرة للأوامر. CS-وحدة التحكم بتسلسل العمليات. M-وحدة الذاكرة المركزية للحاسوب. بعد أن تتم معالجة معلومات القياس في الحاسوب يقوم بإظهار النتائج، على وحدة الخرج (OUT) محللة ومرتبة وجاهزة وبالشكل المطلوب.



الشكل 9-2 المخطط الصندوقي الوظيفي لنظام قياس معلوماتي

3-9- التوفيق بين ممانعات دائرة القياس:

من أجل الحصول على أعلى حساسية ممكنة لجهاز القياس، الذي يشكل الحمل R_L (الشكل 3-9)، يجب أن تؤثر عليه إشارة الدخل الكهربائية باستطاعتها العظمى. من هنا يمكن تحديد شرط النقل الأمثل لنطاق الطاقة الحاملة للمعلومات إلى دائرة القياس.



الشكل 3-9. نقل الإشارة المقاسة من منبع مقاومته الداخلية R_i إلى جهاز القياس (الحمل)

فعند مرور تيار كهربائي من المنبع إلى الحمل، فإن استطاعة المنبع تساوي:

$$P_1 = V_1 I$$

والاستطاعة المستهلكة في المقياس (الحمل) تساوي:

$$P_2 = P_1 - R_i I^2 \quad (9-1)$$

إن الاستطاعة تزداد في البداية مع زيادة I وتصل إلى الذروة ثم تأخذ في الانخفاض، كما في الشكل a-4-9 لذلك نحصل على الاستطاعة العظمى لإشارة P2 باشتقاق P2 بالنسبة للتيار I ومساواة النتيجة بالصفر:

$$\frac{dP_2}{dI} = V_1 - 2R_i I = 0 \quad \text{إذا:}$$

$$I = \frac{V_1}{2R_i} \quad (9-2)$$

ومن الدارة المبينة في الشكل (3-9) نجد أن :

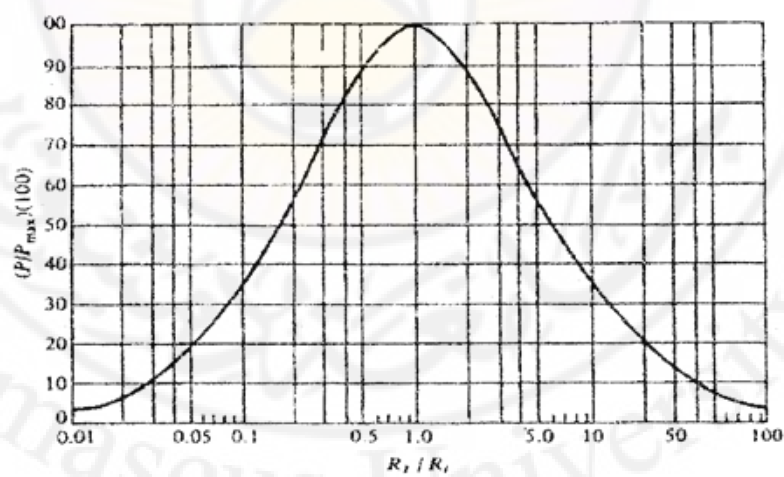
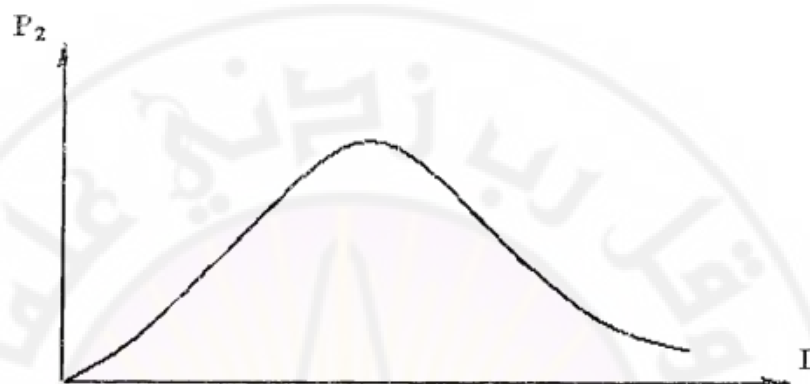
$$I = \frac{V_1}{R_i + R_L} \quad (9-3)$$

بمقارنة العلاقتين (9-2) و (9-3) نستنتج أن نظام الاستطاعة العظمى يتحقق عندما تتساوى المقاومة الداخلية للمنبع مع المقاومة المكافئة للدائرة الخارجية R_L ، أي:

$$R_i = R_L \quad (9-4)$$

وهذا ما يبينه الشكل b-4-9 .

يسمى الشرط (9-4) شرط توافق الاستطاعة لدائرة القياس وهو هام ويستخدم لحالة قياس الإشارات الضعيفة (كجسور القياس) ، أما إذا كانت القيم المقاسة ذات استطاعة معينة: فيجب أن يكون استهلاك جهاز القياس للاستطاعة أقل ما يمكن.



الشكل 4-9. علاقة الاستطاعة بالتيار (a) والمقاومة (b)

9-4- وحدات القياس الدولية:

International units of the measurement

لقد فرض تطور المجتمع الإنساني ضرورة إيجاد وحدات قياس مشتركة ومتفاه عليها كبديل للمعايير البدائية المحلية .

إن واحدة القياس تمثل مقداراً فيزيائياً معتمداً ومتفقاً عليه يؤخذ كقيمة معيارية معرفة بدقة، تقارن معها المقادير الأخرى المشابهة لها فيزيائياً. لقد تم وضع نظام وحدات القياس الدولية SI بشكلها الحالي في عام 1948 في مدينة باريس وفي عام 1960 تقرر التقيد بهذا النظام وإدخاله في الحياة العملية .

تصنف وحدات القياس إلى الأساسية والمركبة (المشتقة من الأساسية).
لدينا حسب نظام SI سبع وحدات قياس أساسية مبينة في الجدول 9-1 وفيه نبين أيضاً الواحدتين الإضافيتين وأهم الوحدات الكهربائية المركبة:
اعتمدت نظم القياس العالمية التقنيات اللازمة لتعريف وحدات القياس التي تحفظ نماذج منها في متحف جنوب فرنسا. وقد عرفت الوحدات السبع الأساسية فعلى سبل المثال:

الأمبير (Ampere) -(A): هو واحدة قياس شدة التيار وهو التيار الكهربائي المستقر الذي عند جريانه في موصلين مستقيمين ومتوازيين وموضوعين على مسافة متر واحد فيما بينهما في الفراغ ينتج قوة تأثيرها متبادل مقدارها $2 \cdot 10^{-7}$ نيوتن على المتر الواحد من الطول. وذلك حسب العلاقة: $F = \mu_0 \frac{I_1 I_2}{2\pi R}$.

الكيلوغرام (Kilogram) -(kg) : واحدة قياس الكتلة ويمثل كتلة جسم اسطواني الشكل قطره يساوي طوله ويساوي 39mm ومكون من البلاتين Pt بنسبة 90% و 10% من الإيريديوم Ir.

الجدول 1-9

المقدار	واحدة القياس	الرمز المستخدم
واحدات القياس الأساسية		
1. الطول	المتر	m
2. الكتلة	كيلو غرام	kg
3. الزمن	الثانية	s
4. التيار الكهربائي	الأمبير	A
5. درجة الحرارة	كلفن	K
6. شدة الفيض الضوئي	كانديلا	cd
7. كتلة الجزيء	المول	mol

واحدات القياس الإضافية		
8. الزاوية المستوية	راديان	rad
9. الزاوية الجسمة	سترديان	st

بعض واحداث القياس الكهربية المركبة

Ω	أوم	10. المقاومة الكهربية
V	فولت	11. التوترو (والقوة المحركة الكهربية)
C	كولون	12. كمية الشحنة الكهربية
F	فاراد	13. السعة الكهربية
H	هنري	14. عامس التحريض
Wb	ويبر	15. تدفق الفيض المغناطيسي
T	تسلا	16. كثافة الفيض المغناطيسي
Hz	هرتز	17. التردد
W	واط	18. الاستطاعة الكهربية

تشتق واحداث القياس المركبة من الواحدات الأساسية فعلى سبيل المثال:

الفولت:

$$V = \frac{W}{A} = \frac{J}{C} = \frac{N \cdot m}{A \cdot S} = \frac{m \cdot kg \cdot S^{-2} \cdot m}{A \cdot S} = m^2 \cdot kg \cdot S^{-3} \cdot A^{-1}$$

9-5-دقة القياس Measuring Accuracy:

تعكس خاصية الدقة درجة التقارب بين قيمتي إشارتي دخل ومخرج وسائل القياس الكهربائية، وتقدر بواسطة أخطاء القياس.

تقسم أخطاء القياس حسب طريقة التعبير العددي عنها إلى أخطاء مطلقة وأخطاء نسبية.

يُعرف الخطأ المطلق (Absolute error) بأنه الفرق بين القيمة المقاسة X_m والقيمة الحقيقية X .

$$\Delta X = X_m - X$$

يُعرف الخطأ النسبي (Relative error) بأنه النسبة بين الخطأ المطلق والقيمة المتوقعة الحقيقية X لمتغير القياس.

$$F_r = \frac{\Delta X}{X} \cong \frac{\Delta X}{X_m}$$

يحسب الخطأ النسبي في أغلب الأحيان بنسبة مئوية ويسمى الخطأ النسبي المئوي:

$$F_r \% = \frac{\Delta X}{X} \cdot 100$$

تتوقف دقة القياس وصحته على مدى الخطأ في القياس، ولما كان الخطأ النسبي للقياس يعطي مقياساً كمياً لدرجة الخطأ، فإن صحة القياس يمكن التعبير عنها بنسبة مئوية من العلاقة:

$$A_c \% = 100 - F_r \%$$

9-6- أنواع أخطاء القياس ومصادرها Error of measurement:

تقسم أخطاء القياس حسب مصادرها إلى الأنواع التالية:

1- أخطاء الطريقة. 2- أخطاء الجهاز. 3- أخطاء المخرب.

وتقسم حسب مواصفات الخطأ إلى:

1- أخطاء منهجية. 2- أخطاء عشوائية. 3- أخطاء فادحة.

فأخطاء الطريقة تحدث بسبب ضعف في طريقة القياس المتبعة وعدم مراعاة التنسيق بين خصائص داري الدخ والخرج القياسية واستخدام طرق تقريبية في معالجة وتحليل النتائج.

أما أخطاء أجهزة القياس فتحدث بسبب ضعف دقتها التي تتعين من درجة دقتها التصميمية.

تحدث أخطاء المخرب بسبب خطأ في حساب قيمة التدرج وأجزائها وعدم قيمة الجهاز للعسل بشكل صحيح وبوضعية صحيحة وخطأ اختلاف زاوية النظر.

تعرف الأخطاء المنهجية بأنها تلك الأخطاء المرتكبة عند القياس وتكون إما ثابتة أو تتغير وفق علاقة معروفة وتكرر عند الحفاظ على نفس شروط التجربة. من أهم أنواع الأخطاء المنهجية: 1- الأخطاء المحسوبة من درجة دقة أجهزة القياس. 2- أخطاء التواء المؤشر واستثمار الجهاز عند وضعية غير صحيحة. 3- أخطاء دارة القياس كاختيار مقياس فولت بمقاومة داخلية غير عالية أو مقياس أمبير بمقاومة ليست صغيرة جداً.

إن الأخطاء العشوائية هي أخطاء متغيرة (غير ثابتة) ولا تتبع قوانين معروفة. ولا تتكرر بشكل منتظم. فإذا تكررت التجربة لنفس الظروف وكانت النتائج متفاربة هذا يعني بأن الأخطاء العشوائية قليلة جداً. من الصعب حصر سبب الأخطاء العشوائية، إلا أنها قد تنتج عن خلل في جهاز القياس أو عن مؤثرات خارجية، مثل الاهتزازات الميكانيكية والحقول المغناطيسية، أو بسبب الاحتكاك وكذلك تجاوز عتبة

حساسية الجهاز وغيرها.

أن خطأ القياس النهائي يساوي مجموع الخطأ المنهجي Δ والخطأ العشوائي V :

$$\Delta X = \pm(\Delta + V)$$

تحصل الأخطاء الفادحة نتيجة خطأ من المحرّب، كقراءة تأشيرة الجهاز قراءة خاطئة، أو خطأ في كتابتها. لذا يجب رفض مثل هذه النتائج وإعادة القياس من جديد.

9-7- أجهزة القياس Measuring Instruments:

القياس كما ذكرنا عبارة عن عملية مقارنة بين قيمة فيزيائية يراد قياسها، وأخرى مشابهة لها فيزيائياً تسمى واحدة القياس، من أجل معرفة كم واحدة قياس تحتوي القيمة المجهولة. تقوم أجهزة القياس بعملية المقارنة وتعطي نتيجة القياس النهائية بالطريقة الملائمة للإنسان بدقة معينة.

9-7-1- تصنيف أجهزة القياس :

تصنف أجهزة القياس حسب القيم التي يقيسها الجهاز إلى :

مقاييس أمبير ومقاييس فولت ومقاييس أوم ومقاييس الواط ومقاييس تردد وغيرها .

تصنف أجهزة القياس حسب التقنية القياسية المعتمدة إلى:

1- أجهزة قياس تماثلية Analogue Instruments - وتكون فيها إشارتنا الدخلى والخرج متواصلتين وتعطيان النتيجة على لوحة تدريج بواسطة مؤشر أو على شاشة كما في راسم الإشارة.

2- أجهزة القياس الرقمية Digital Instruments - هي الأجهزة التي تستخدم الدارات والتقنيات المنطقية وتقوم بإظهار النتيجة على شكل قراءة رقمية. وهي

تستخدم ثنائي الإشعاع الضوئي (LED) لإظهار النتيجة. وتكون إشارة الدخل متقطعة مع الزمن.

3- أجهزة القياس التقارنية Comparison Instruments- وهي الأجهزة التي تقوم بالمقارنة المباشرة بين القيمة المجهولة وقيمة معيارية مماثلة لها مادياً كما في جسور القياس.

تصنف أجهزة القياس حسب طريقة إظهار المعلومات إلى:

- 1- أجهزة الدلالة- وهي التي تدل على القيمة المراد قياسها في الوقت المحدد على شكل انحراف المؤشر (في الأجهزة التماثلية) أو على شكل قراءة رقمية (في الأجهزة الرقمية). ومثال على هذه الأجهزة مقياس التيار ومقياس التوتر .
- 2- أجهزة التسجيل وهي تؤمن تسجيلاً بيانياً أو كتابة لتغيرات القيمة المطلوب قياسها خلال الوقت المحدد. أكثر هذه الأجهزة تكون كهروميكانيكية حيث تستخدم أوراق الرسم البياني وأدوات كتابة ميكانيكية كالأقلام .

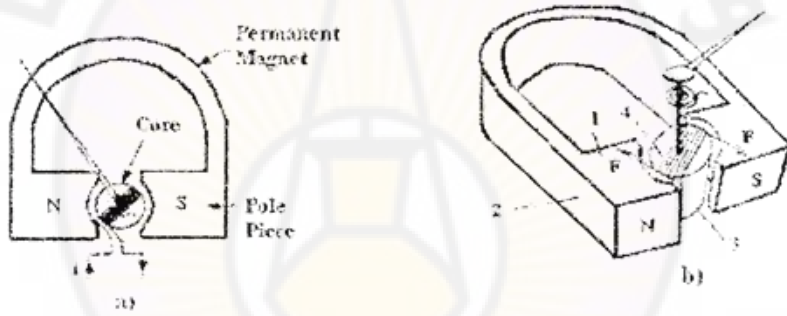
9-7-2- المقياس ذو الملف المتحرك:

Moving coil measuring instrument

صمم هذا الجهاز من قبل دارسونفال (Darsonval) عام 1881. وهو كما يظهر في الشكل 9-5.

ينشأ عزم الدوران في هذا الجهاز عن التأثير المتبادل بين التيار الذي يمر بملفات الملف المتحرك (4) والمجال المغناطيسي الناتج عن المغناطيس النضوي الدائم (2) يكون الملف المتحرك مستطيل الشكل ويتألف من قطعة ألنيوم مستطيلة ملفوف عليها سلك نحاسي ناعم بقطر 0.3 mm . يثبت الملف المتحرك مع المؤشر على محور الدوران ويركب بدوره على حوامل إبرية الشكل مصنوعة من الماس للتقليل من الاحتكاك.

ويكون الملف حر الدوران حول أسطوانة حديدية مصممة غير متحركة (3). يتم توصيل التيار إلى الملف عن طريق نابضين صغيرين مثبتين على طرفي محور الدوران توصل إليهما نهايات الملف كما تقوم هذه النوابض بتأمين العزم المقاوم . يكون المجال المغناطيسي، الناتج عن المغناطيس الدائم، في الثغرة الهوائية التي يتحرك فيها الملف بين الأقطاب (1) والقلب الحديدي (3) قوياً وعمودياً ومنتظماً كي لا يعتمد عزم الدوران على زاوية انحراف الملف.



الشكل 5-9. المقياس ذو الملف المتحرك

عندما يمر تيار I عبر الملف فإن ذلك سيؤدي إلى تأثير متبادل بين الحقل المغناطيسي الناتج عن هذا التيار والحقل المغناطيسي الناتج عن المغناطيس الدائم مما يؤدي إلى نشوء مزدوجة قوة تحريك تؤثر على جانبي الملف (الشكل 5-9) فينحرف الملف مع مؤشره بما يتناسب مع كمية التيار عبر الملف . يمكن تحديد قيمة هذه القوة من العلاقة :

$$F = N \cdot L \cdot B \cdot I$$

حيث -B- كثافة الفيض المغناطيسي (T).

-L- طول الملف (m)

-N- عدد لفات الملف (turn)

فإذا كان عرض الملف بالمتري d فيكون عزم الدوران:

$$M = 2F \frac{d}{2} = N \cdot L \cdot B \cdot I \cdot d$$

يستمر دوران الجزء المتحرك في الجهاز حتى زاوية انحراف معينة θ حيث يصبح عزم الدوران مساوياً للعزم المقاوم $M_s = K_c \theta$ الذي ينتج عن النوابض عندئذ يحصل التوازن ويشير المؤشر إلى القيمة المقاسة.

حيث: K_c - ثابت نابض الإرجاع ويمثل العزم المقاوم لوحدة الانحراف الزاوي $\frac{Nm}{rad}$ ، ويتعلق بمقاسات ومادة النوابض.

$$M = M_s \Rightarrow NIdBI = K_c \theta$$

$$\theta = \frac{NIdBI}{K_c} = S \cdot I$$

إذا: (9-5)

حيث: $S = \frac{NIdBI}{K_c}$ - حساسية الجهاز وهي النسبة بين مقدار انحراف المؤشر والقيمة الكهربائية المقاسة.

تمثل العلاقة (9-5) معادلة الجهاز الأساسية وهي توضح بأن الجهاز هو مقياس للتيار. وبما أن الحساسية ذات قيمة ثابتة فيكون تدرج الجهاز متساوياً ومنتظماً.

عند تغيير اتجاه التيار يتغير اتجاه حركة المؤشر لذلك فاجهاز ذو الملف المتحرك يصلح لقياس التيار المستمر فقط .

إذا وصل الجهاز في دائرة تيار متناوب ترددتها أكبر من عشرة هرتزات فلا يستطيع الجهاز ملاحظة تغيرات إشارة التيار بسبب عطالته، وبالتالي يبقى مؤشره على الصفر .

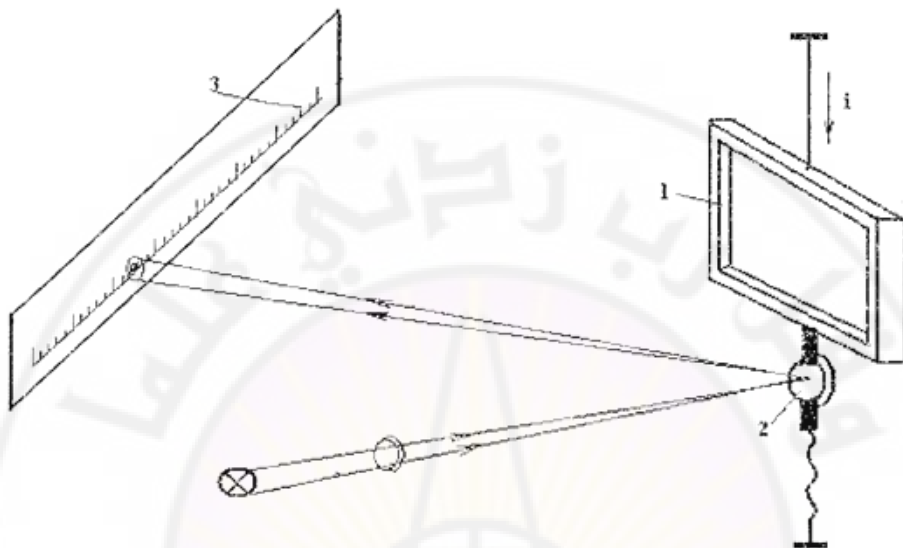
عند استخدام المقياس ذي الملف المتحرك كمقياس فولت فإن معادلة الجهاز الأساسية ستأخذ الشكل الآتي :

$$\theta = \frac{NLdB}{K_t} \cdot \frac{V}{R_m}$$

حيث : R_m - المقاومة الداخلية للمقياس .

إن احتكاك محور الملف مع نقطتي ارتكازه يقلل من حساسية الجهاز ويزيد من أخطاء القياس، لذلك فإن المقياس الغلفاني ذا الملف المتحرك الذي يستخدم للكشف عن التيارات الصغيرة يعلق ملفه المتحرك أو يُشد من الجانبين كما في الشكل 6-9 ويستخدم لهذا الغرض شرطان من الفسفور-برونز أو الذهب للربط الكهربائي والكوارتز للتعليق.

عند مرور تيار كهربائي مستمر في المقياس ينحرف الملف المتحرك بزاوية قدرها θ فينعكس الشعاع الضوئي الناتج عن المصباح الصغير عن المرآة 2، ويسقط على لوحة تدريج المقياس 3 على شكل نقطة ضوئية. يتعلق انحراف النقطة الضوئية بقيمة التيار I وبالمسافة بين المرآة والتدريج وكذلك بحساسية المقياس. يُستخدم المقياس الغلفاني بشكل أساسي في جسور القياس للكشف عن التيارات الصغيرة.



الشكل 6-9. المقياس الغلفاني ذو الملف المتحرك

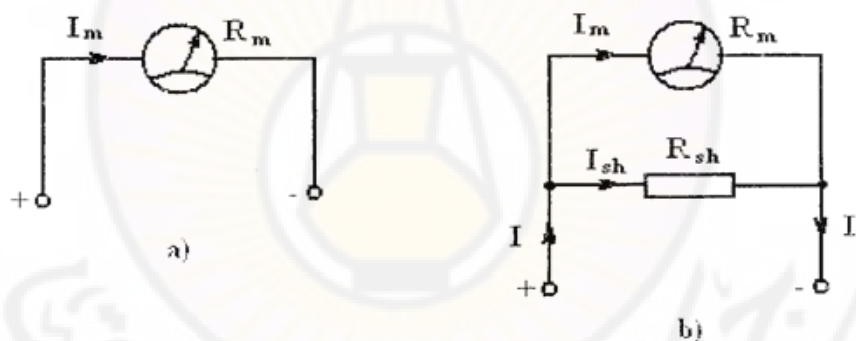
9-7-3- توسيع مجال أجهزة القياس:

يصمم جهاز القياس عادة لقياس إشارات كهربية ذات محدودات معينة. فعندما يُراد استخدامه لقياس إشارات لا تنتمي إلى مجال استجابته تُستخدم عند ذلك مكيفات الإشارة (المجزئات، المضخمات، محولات القياس ودارات التقويم).

9-7-3-1- مجزئات (مفرعات) التيار الأومية Current Shunts :

تُستخدم مفرعات التيار من أجل توسيع مجال قياس مقياس الأمبير أو المقياس الغلفاني.

يرصل مقياس الأمبير دائماً على التسلسل مع الدارة المطلوب قياس تيارها وتكون مقاومته صغيرة جداً يمكن إهمالها في كثير من الحالات .
يُصمم المقياس كي يتحمل تياراً اسمياً I_m (الحُد الأعلى للتيار الذي يتحمله المقياس وقيسه بشكل متواصل زمنياً). ويكون هذا التيار، قبل إضافة فروع، صغيراً من مرتبة الميلي أمبير. يمكن توسيع مجال قياس المقياس (الشكل 7-9-أ) لأي قيمة تيار I وذلك عن طريق وصل مقاومه منخفضة (تدعى مقاومة المفرعة R_{sh}) على التفرع معه كما في الشكل 7-9-ب.



الشكل 7-9. توسيع مجال قياس مقياس الأمبير

نستنتج علاقة تحديد قيمة المفرعة انطلاقاً من تساوي الجهد على طرفي المقياس والمفرعة:

$$I_m R_m = I_{sh} R_{sh} = (I - I_m) R_{sh}$$

$$\therefore R_{sh} = \frac{I_m}{(I - I_m)} R_m = \frac{1}{\left(\frac{I}{I_m} - 1\right)} R_m$$

$$\therefore R_{sh} = \frac{R_m}{n - 1} \dots \dots \dots (9 - 6)$$

حيث: $n = \frac{I}{I_m}$ - عدد مرات توسيع مجال قياس مقياس أمبير.

مثال:

مقياس أمبير مجال قياسه $5mA$ بمقاومة داخلية 20Ω . والمطلوب تحديد قيمة مقاومة المفرعة التي توسع مجال قياسه إلى $5A$.
الحل:

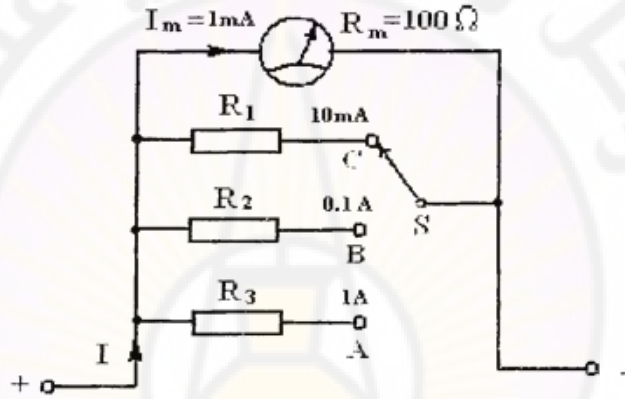
$$R_{sh} = \frac{R_m}{(n - 1)} = \frac{20}{999} = 0.02 \dots \dots \Omega$$

إن مقاومة المفرعة التي تم شرحها سابقاً تعطي مقياس تيار أحادي المدى. ولكن باستخدام المفرعة المبينة في الشكل 8-9 وتدعى مفرعة أيرتون (Ayrton shunt) نستطيع أن نحصل على مقياس تيار متعدد المجالات.
تُحدد قيمة مقاومات هذه المفرعة حسب العلاقة (9-6) فلنمعيث المبينة على الشكل 8-9 نجد:

$$R_1 = \frac{R_m}{n - 1} = \frac{100\Omega}{(10 - 1)} = 11.11 \dots \dots \Omega$$

$$R_2 = \frac{100\Omega}{(100-1)} = 1.01.....\Omega$$

$$R_3 = \frac{100\Omega}{(1000-1)} = 0.1.....\Omega$$



الشكل 8-9. مفرعة أميرون

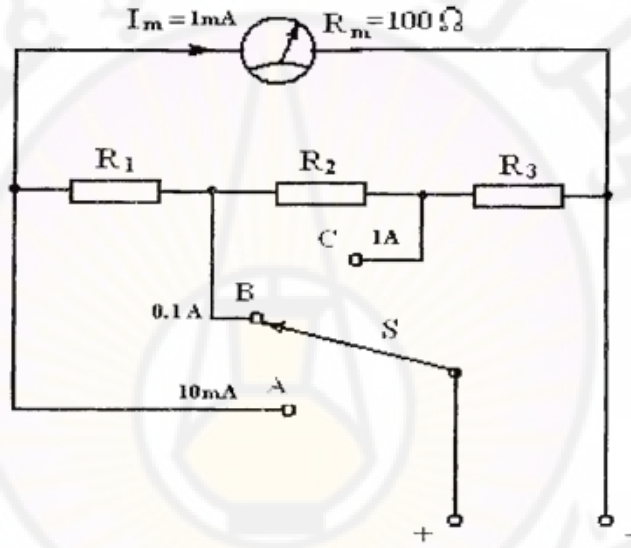
يبين الشكل 9-9 طريقة أخرى لتوسيع مجال قياس مقاس الأمبير وهي الطريقة التعاقبية.

وكما نلاحظ فإن المفرعة تتألف من ثلاث مقاومات R_3, R_2, R_1 عندما يكون المفتاح S في الموقع A فإن $(R_3 + R_2 + R_1)$ تصبح موصولة على التفرع مع R_m . أما عندما يكون S في الموقع B فإن $(R_3 + R_2)$ تكون موصولة بشكل تفرعي مع $(R_m + R_1)$ وهكذا :

١- عندما يكون مفتاح التشغيل عند A فإن :

$$n = \frac{10mA}{1mA} = 10$$

$$\therefore (R_1 + R_2 + R_3) = \frac{R_m}{(n-1)} = \frac{100}{9} \dots \Omega \dots \quad (1)$$



الشكل 9-9. المبرعة التعاقبية

2- عندما يكون مفتاح التشغيل عند B تكون $(R_3 + R_2)$ موصلة على التفرع مع $(R_m + R_1)$ أو $(100 + R_1)$:

$$n = \frac{100}{1} = 100$$

$$\therefore (R_2 + R_3) = \frac{R_1 + 100}{99} \dots \Omega \dots$$

(2)

3- عندما يكون مفتاح التشغيل عند C فإن R_3 تكون موصلة على التفرع مع $(100 + R_2 + R_1)$ وتكون :

$$n = \frac{1000}{1} = 1000 \quad (3)$$

$$R_3 = \frac{R_1 + R_2 + 100}{999} \dots \dots \dots \Omega$$

ومن خلال المعادلات (1) و (2) و (3) نلاحظ أن :

$$R_1 = 10 \dots \dots \Omega$$

$$R_2 = 1 \dots \dots \Omega$$

$$R_3 = 1/9 \dots \dots \Omega$$

9-7-3-2- مجزئات الجهد الأومية:

Voltage resistance divider

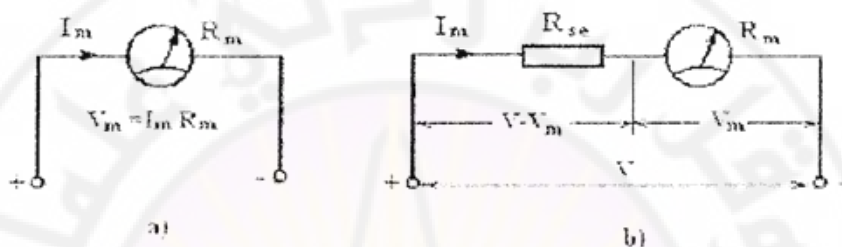
تستخدم مجزئات الجهد من أجل توسيع مجال قياس مقياس الفولت أو المقياس

الغلفاني .

يرصل مقياس الفولت دائماً على التفرع في الدارات الكهربائية وتكون مقاومته عالية جداً. كما يجب مراعاة قطبية أجهزة قياس التيار المستمر كي يتحرك المؤشر الاتجاه الصحيح (نحو اليمين).

يستطيع المقياس ذو الملف المتحرك قياس جهود صغيرة جداً ، ولكن بوصل مقاومة كبيرة على التسلسل معه يمكن توسيع مجال قياسه ليصبح قادراً على قياس أي جهد. ويمكن أن ندعو المقاومة التسلسلية المضافة بمقاومة المضاعفة لأنها تضاعف

إمكانية أجهاز في قراءة قيم القوة المحركة الكهربائية. وهي عادة توضع داخل عبئة المقياس .



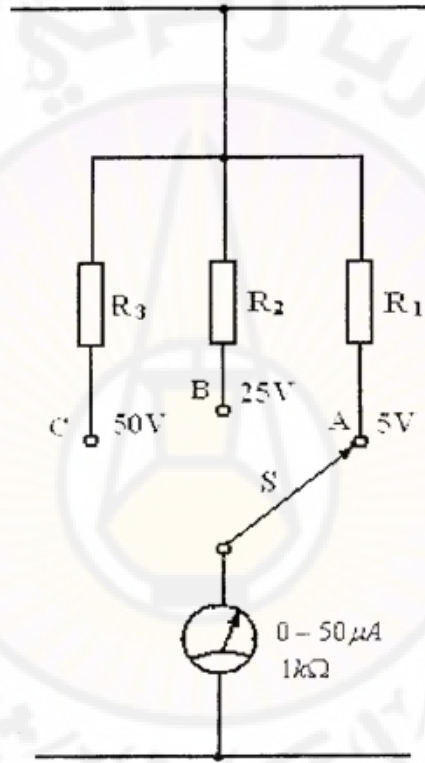
الشكل 10-9. مجزئ الجهد

نفترض بأن المطلوب زيادة مجال قياس الجهاز من V_m إلى V ، فيكون هبوط الجهد على المقاومة المضافة R_{se} (الشكل 10-9) هو $(V - V_m)$ أما التيار الذي يمر خلال هذه المقاومة فهو نفس تيار المقياس I_m لذلك من الشكل 10-9 نجد:

$$\begin{aligned} I_m &= \frac{V_m}{R_m} = \frac{V}{R_m + R_{se}} \Rightarrow \\ \frac{R_m + R_{se}}{R_m} &= \frac{V}{V_m} \\ \frac{R_{se}}{R_m} &= \frac{V}{V_m} - 1 \\ \therefore R_{se} &= R_m (m - 1) \dots \dots (9-7) \end{aligned}$$

حيث $m = \frac{V}{V_m}$: عدد مرات توسيع مجال قياس جهاز الفولت. وكلما كانت المقاومة

التسلسلية أعلى كان مجال القياس أكبر .



الشكل 9-11. مقياس فولت مستمر متعدد المجالات

مثال:

مقياس ذو ملف متحرك تياره $50\mu A$ ومقاومته الداخلية $1K\Omega$ يُراد استخدامه كمقياس فولت مستمر بمدى $50V$. احسب مقاومة المضاعفة اللازمة.

الحل:

$$V_m = I_m \times R_m = 50.10^{-6} \times 1000 = 50.10^{-3} \text{V}$$

$$m = \frac{V}{V_m} = \frac{50}{50.10^{-3}} = 1000$$

$$R_{s,m} = R_m (m - 1) = 1000 \times 999 = 999 \text{k}\Omega$$

يبين الشكل 11-9 مقياس فولت متعدد الحالات: 0-5 V ، 0-25 V ، 0-50 V . يمكن إيجاد القيم المختلفة للمقاومات R_3, R_2, R_1 بنفس الطريقة كما في المثال السابق :

$$R_1 = 99 \text{K}\Omega$$

$$R_2 = 499 \text{K}\Omega$$

$$R_3 = 999 \text{K}\Omega$$

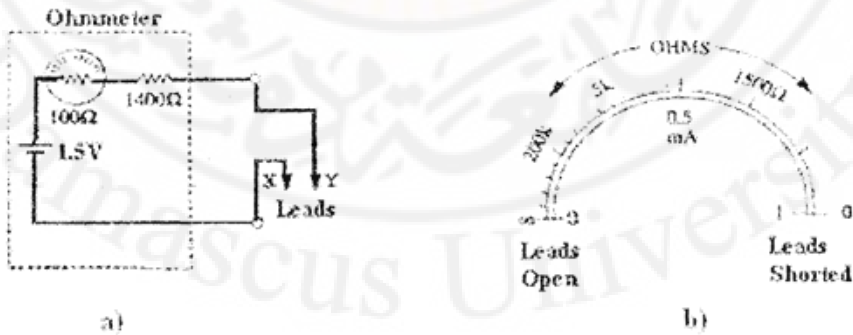
كلما كان مجال القوة المحركة الكهربائية كبيراً كانت مقاومة المضاعفة المطلوبة أكبر.

ملاحظة: من أجل تقليل أخطاء القياس يجب استخدام مقياس الفولت ذي المقاومة الداخلية الكلية الأعلى. فكلما كبرت مقاومة مقياس الفولت انخفض خطأ القياس. أما بالنسبة لمقياس الأمبير فيجب أن تكون مقاومته أصغر ما يمكن وكنمسا انخفضت مقاومته قل خطأ القياس .

9-7-4-- مقياس الأوم Ohmmeter:

مقياس الأوم -- هو جهاز يقيس قيم المقاومات بشكل مباشر. إن مقياس الأوم من حيث المبدأ هو عبارة عن مقياس ميلي أمبير ذي ملف متحرك مدرج بالأوم. يتألف مقياس الأوم كما يبدو في الشكل 9-12 من مقياس ذي ملف متحرك وبطارية تُشكل منبعاً للجهد (1.5V)، ومن المقاومة المحددة للتيار (1400Ω) كما يوجد مقاومة إضافية بداخل الجهاز موصلة على التفرع معه مهمتها ضبط المؤشر على الصفر.

لقياس المقاومة يتم وصل نهايتي مقياس الأوم X-Y عبر المقاومة المجهولة المراد قياسها. عندما تكون النهايتان X-Y مقصورتين، فإن تيار الانحراف الكامل للمقياس المبين في الشكل 9-12 هو $1.5V / (100 + 1400)\Omega = 1mA$ فينحرف المؤشر إلى أقصى اليمين، وهذا يطابق 0Ω لأن المقاومة الخارجية مساوية للصفر عندما تكون النهايتان X-Y غير متلامستين يكون التيار مساوياً للصفر، وهذا يطابق قيمة اللانهاية للمقاومة الخارجية المجهولة.

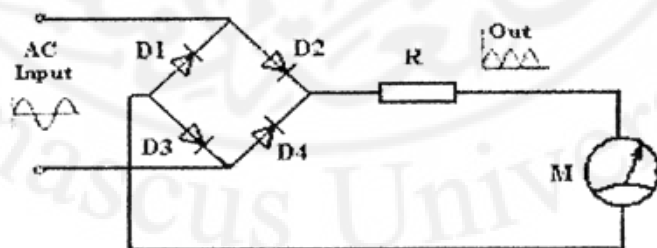
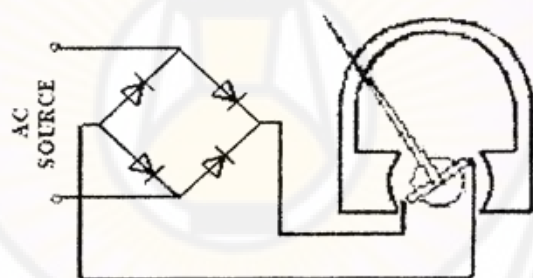


الشكل 9-12. مقياس الأوم

يتم تدريج لوحة المقياس المعكوسة بتدرجات غير متساوية من الصفر وحتى
اللانهاية أوم وذلك باستخدام مقاومات معيارية .

5-7-9- المقياس ذو الملف المتحرك المعدل Rectifier meter :

إن الدقة والحساسية العالية التي تتمتع بها أجهزة قياس التيار المستمر وكذلك
التدريج الخطي للوحات تدريجها جعلها مستحسنة للاستخدام في قياس التيار المتناوب،
ويتم ذلك بتقويم التيار المتناوب، إلى تيار مستمر بواسطة دائرة تقويم موجة كاملة
جسرية كما في الشكل 13-9.



الشكل 13-9. المقياس المعدل

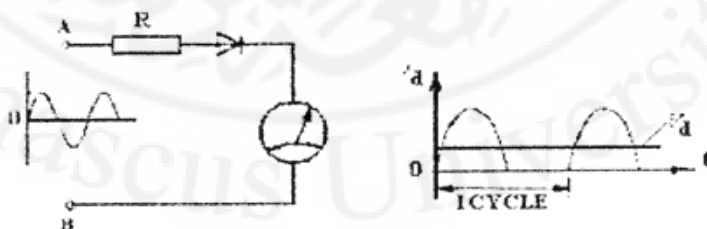
بعد تقويم الموجة الكاملة نحصل من خرج الجسر على تيار أحادي الاتجاه، يمكن تحديد قيمته المتوسطة من العلاقة:

$$I_{dc} = 0.9 \cdot I$$

هذه القيمة تمر في المقياس ذي الملف المتحرك، الذي يعطي انحرافاً متناسباً معها. إلا أن القيمة المراد قياسها بواسطة المقياس المعدل هي القيمة الفعالة للتيار أو الجهد المتناوب، لذلك يتم تدريجه بحيث تساوي كل تدريجه للقيمة الفعالة (RMS) 1.11 مرة مضروبة في القيمة المتوسطة:

$$I = 1.11 \cdot I_{dc}$$

يستخدم المقياس المعدل في الأجهزة العامة التي تقيس الإشارات المستمرة والمتناوبة كالأفورمترات ذوات المجالات المتعددة وذلك من أجل قياس القيم المتناوبة. في القياسات التي لا تتطلب دقة عالية تستخدم مقاييس معدلة بدارة تقويم نصف موجة كما في الشكل 14-9.

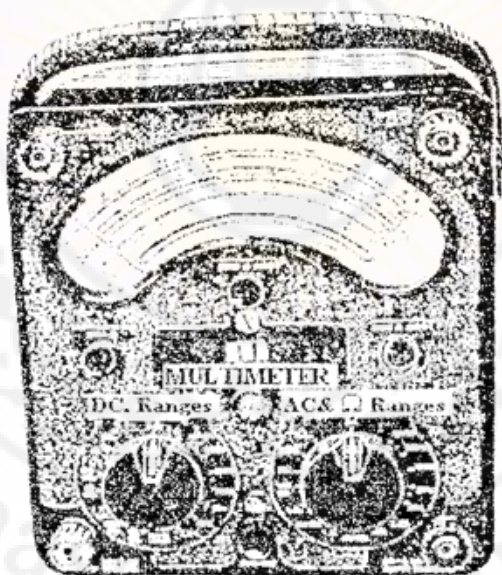


الشكل 14-9. مقياس معدل بدارة تقويم نصف موجة

تكون قراءة هذا الجهاز صحيحة للإشارات الجيبية فقط. لأي إشارات أخرى يجب تعديل القراءة وذلك انطلاقاً من معرفة القيمة المتوسطة والفعالة لهذه الإشارات.

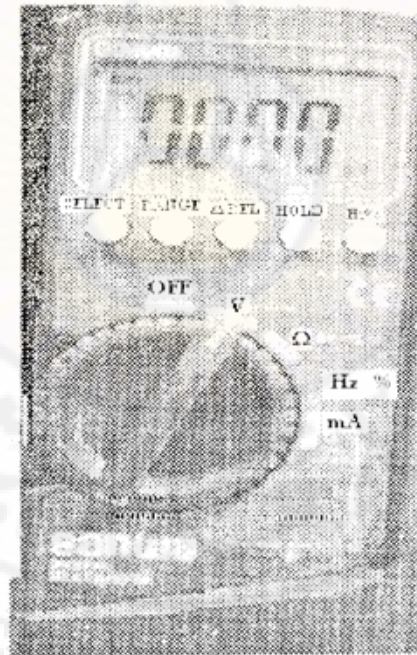
6-7-9- جهاز الأفومتر AVO meter :

يمكن استخدام الجهاز ذي الملف المتحرك لقياس المقاومة والتيار والجهد المستمر أو المتناوب ولعدة مجالات في آن واحد وذلك باستخدام الخزانات لتوسيع مجال قياس الجهد والتيار وإضافة منبع خارجي من أجل مقياس الأوم كما بينا في الفقرات الثلاث السابقة، وتسمى هذه الأجهزة العامة والاقتصادية بالأفومترات.



الشكل 9-15. مقياس الأفومتر التماثلي

صمم الأفومتر التماثلي ذو الشكل العام المبين في الشكل 9-15 من أجل التقنيات الكهربائية والإلكترونية وهندسة الراديو والتلفاز. ولديه خمس وظائف و 30 مدى يقيس القوة اخرجة الكهربية للتيار المستمر والمتناوب من 0 وحتى $2.5KV$. كما يقيس التيار المستمر والمتناوب من 0 وحتى $10A$. أما مدى المقاومة فتتقسم إلى ثلاثة أقسام تغطي من 0 وحتى $20M\Omega$. يتميز الأفومتر بالدقة الممتازة وببساطة التشغيل وسهولة الحمل.



الشكل 9-16. مقياس الأفومتر الرقمي

يبين الشكل 9-16 أفومتراً رقمياً (DMM) وهو يستطيع قياس الجهد المستمر حتى 9999V والمتناوب حتى 9999 أيضاً ويمكنه قياس التيار المستمر والمتناوب من $10\mu A$ وحتى 1A، وقياس المقاومات من 0Ω وحتى $10M\Omega$. يتميز هذا الجهاز بالدقة العالية وبسرعة الاستجابة.

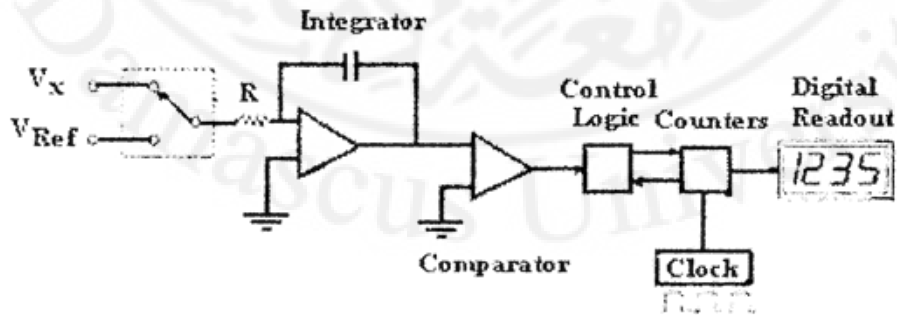
9-7-7- مقياس الفولت الرقمي :

The digital Voltmeter (DVM)

يقوم هذا المقياس بعرض نتيجة قياس الجهد المستمر والمتناوب على شكل أرقام منفصلة بدلاً من انحراف المؤشر على لوحة التدريج كما في الأجهزة التماثلية. بالمقارنة مع غيره من المقاييس فإن لمقياس الفولت الرقمي عدة ميزات منها :

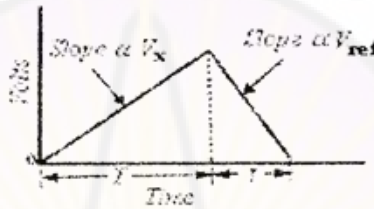
- 1- سرعة استجابة عالية. 2- دقة عالية. 3- يتوافق مع غيره من الأجهزة الرقمية.
- 4- لا يتأثر بالوضعية (أفقية، عمودية) .

يبين الشكل 9-17 مقياس فولت رقمي يعتمد على تقنية الميل المضاعف. ويتألف من خمسة عناصر أساسية: المكامل والمقارن وعنصر تحكم منطقي وساعة رئيسية وعداد بالإضافة لشاشة الإظهار الرقمية.



الشكل 9-17 مقياس فولت رقمي

يعتمد المقياس الرقمي في مبدأ عمله على تبديل الجهد بالزمن، حيث يوصل الجهد المراد قياسه V_x عبر مفتاح التشغيل S إلى المكامل خلال فترة زمنية معروفة T كما يبدو في الشكل 9-18. يتم تحديد هذه الفترة عن طريق عد نبضات الساعة بالقيمة العشرية .



الشكل 9-18

عند تسليط الجهد المستمر المراد قياسه على مدخل الجهاز فإن المكامل يعطي على خرجه جهداً V_1 :

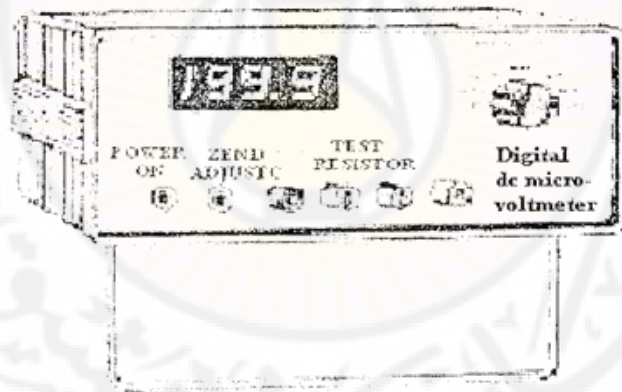
$$V_1 = \frac{1}{RC} \int_0^T V_x \cdot dt = \frac{V_x}{RC} \cdot T$$

عند نهاية الوقت T يتم تبديل وضعية المفتاح S إلى الجهد V_{ref} ذي القطبية المعاكسة. ويبدأ جهد المكامل بالانخفاض على شكل خط منحدر. في الفترة الثانية t يكون الجهد ذا قيمة معروفة أما الوقت فهو غير معلوم. يمكن تحديد هذا الوقت t من خلال عد النبضات الزمنية للساعة حتى يصل الجهد إلى قيمة دلالتة الأصلية (الصفر):

$$V_2 = \frac{V_X}{RC}T - \frac{1}{RC} \int_T^{T+T} V_{ref} dt = \frac{V_X T}{RC} - \frac{V_{ref}}{RC}T = 0$$

$$V_X = \frac{V_{ref}}{T}T$$

أصبح واضحاً أن قياس الزمن T يعني قياس الجهد المجهول ويتم ذلك بسهولة بواسطة نظام التحكم المنطقي والعداد. عندما تصل قيمة جهد خرج المكامل إلى الصفر فإن المقارن يأمر عنصر التحكم المنطقي بتوقيف العد وإظهار النتيجة الرقمية التي هي عدد النبضات المتناسبة طردياً مع جهد المقياس .



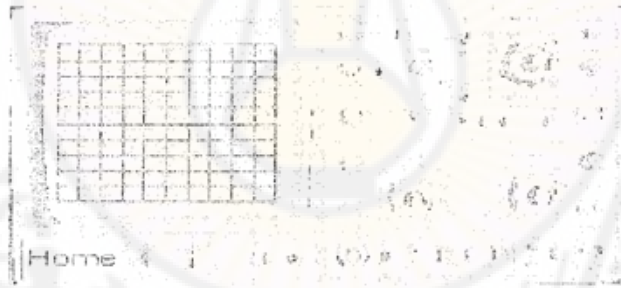
الشكل 9-19. مقياس فولت رقمي

ويبين الشكل 9-19 مقياس فولت رقمي مجال قياسه $(1\mu V - 1000V)$ ودقته $\pm 2\%$. وهو يستخدم بشكل واسع في مجال الصناعة والأبحاث المخبرية والعلمية ومراكز الخدمة.

9-7-8- راسم الإشارة Oscilloscope :

راسم الإشارة هو جهاز يقوم بعرض تغيرات الإشارة الكهربائية خلال الزمن على شاشته وقياس هذه الإشارات.

يُشار إلى راسم الإشارة براسم الاهتزازات وهو أداة رئيسية في الهندسة الإلكترونية ، يؤمن هذا المكشاف عرضاً ثنائي الأبعاد لإشارة الموجة على الشاشة بحيث تسمح للمهندس أو للفني برؤية الإشارة في أجزاء متعددة من الدارة. كما أنه يسمح بمعرفة ما يحدث داخل الدارة نفسها. حيث بمشاهدة شكل الإشارة يمكن تصحيح الأخطاء في الدارة.



الشكل 9-20. الشكل العام لراسم الإشارة

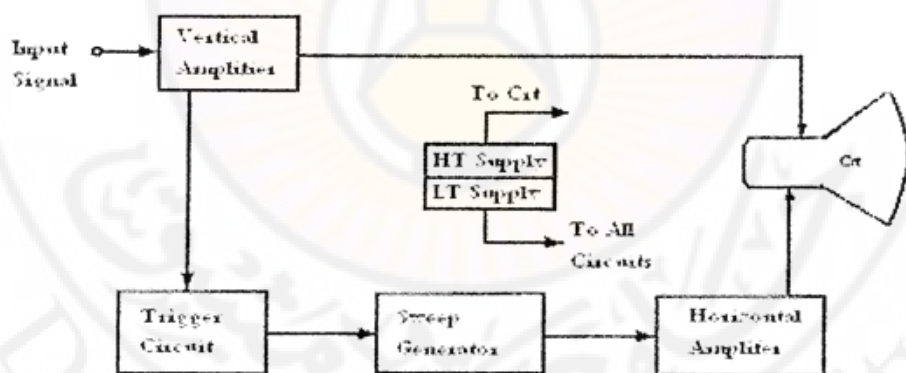
الشكل العام لراسم الإشارة مبين في الشكل 9-20.

يمكن لراسم الاهتزازات عرض وقياس عدة قيم كهربائية وإلكترونية مثل القوة الحركية الكهربائية والتيار الكهربائي المستمر والمتناوب وزاوية فرق الطور وقياس الوقت أو الدور ومطال الموجة وزمن صعودها أو هبوطها وغير ذلك. كما يمكن قياس

المقادير غير الكهربائية مثل الضغط والحرارة وذلك باستخدام مبدلات الطاقة المناسبة التي تحول هذه المقادير إلى قوة محرّكة كهربائية متناسبة معها.

كما نلاحظ في الشكل 21-9 فإن راسم الإشارة يتألف مما يلي :

- 1- أنبوب الأشعة المهبطية (Cathode Ray Tube - CRT) الذي يقوم بعرض الكمية المراد قياسها على الشاشة.
- 2- المكبر الشاقولي Vertical Amplifier - يعمل هذا المكبر على تكبير الإشارة المقاسة لتصبح مرئية وتسلط على الصفائح X .
- 3- المكبر الأفقي Horizontal Amplifier - يقوم هذا المكبر بتكبير جهد سن المنشار، الذي يشكل إشارة الدخل ويُسلط إشارة الخرج المكبرة على الصفائح X.



الشكل 21-9 المخطط الصندوقي لراسم الإشارة

- 4- المولد المتسع Sweep generator - وينتج موجة على شكل سن المنشار تستخدم من أجل الانحراف الأفقي للشعاع الإلكتروني.

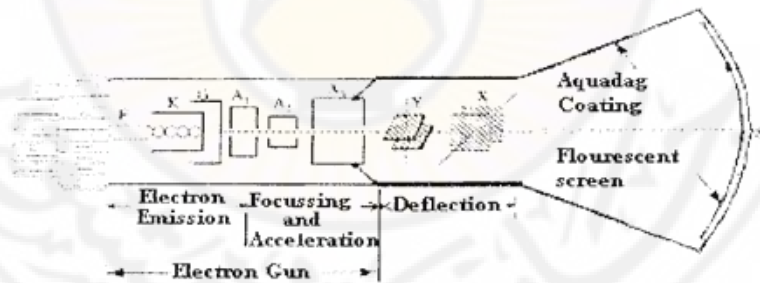
5- الدارة المنبهة Trigger circuit - وتقوم بإرسال نبضات متتالية لإقلاع المولد المتسع.

6- منبع للجهود العالي والمنخفض High and low Voltage power supply.

9-7-8-1- أنبوب الأشعة المهبطية ومبدأ عمل الراسم :

Cathode Ray Tube (CRT)

يعتبر أنبوب الأشعة المهبطية (CRT) المبين في الشكل 9-22 الجزء الأساسي في راسم الإشارة. وهو أنبوب مفرغ من الهواء تقع على جانبيه الأمامي شاشة (S) مطلية من الداخل بمادة كيميائية متألقة تصدر الضوء عند اصطدام الإلكترونات بها، وتبرز من الجانب الخلفي أرجل معدنية لوصّل الأنبوب مع الدارة الخارجية.



الشكل 9-22. أنبوب الأشعة المهبطية

عند مرور تيار كهربائي في سلك التسخين (F) يصدر المهبط (K) حزمة من الإلكترونات يتم التحكم بغزارتها بواسطة فتحة أسطوانة الشبكة (G)، التي يكون كمونها أصغر من كمون المهبط (K)، ويعتمد عدد الإلكترونات المسموح لها بعبور

فوهة الشبكة، على جهد التحكم بالشبكة، الذي يتم تغييره باستخدام المفتاح Intensity (انظر الشكل 9-23). تشكل المضاعد (A_2, A_3, A_1) عدسة إلكترونية مهمتها تسريع الإلكترونات الموجهة وتركيزها. يتم التحكم بالبعد الخرجي للعدسة الإلكترونية وبالتالي بأبعاد البقعة المضيئة على الشاشة، وذلك بتغيير كمون المضاعد (A_2) عن طريق المفتاح Focus أما القطبان الموجبان (A_3, A_1) فيعملان على تعجيل الشعاع الإلكتروني (الشكل 9-23) الذي يتوجه نحو الشاشة. يُعطي قسم أمامي من الجزء الداخلي للأنبوب بطبقة من مادة الغرافيت الناقل ويوصل على (A_3) كي يحافظ على نفس الجهد. وهذه الطبقة وظيفتان هما: 1- تعجل الشعاع الإلكتروني بعد مروره بين صفائح الانحراف. 2- تجمع إلكترونات الشعاع الإلكتروني الذي يصطدم بالشاشة، وذلك لمنع حدوث سحنة سلبية على الشاشة، وتأمين خط رجوع لها.

تُستعمل مجموعتان من الصفائح لحرف الشعاع الإلكتروني في الاتجاهات الأفقية والعمودية. ويشار إلى المجموعة الأولى بالرمز (Y) وهي مخصصة للانحراف العمودي ويسلط عليها الجهد المراد قياسه، أما المجموعة الأخرى (X) فهي خاصة بالانحراف الأفقي ويسلط عليها جهد سن المنشار.

عندما لا يكون هناك أي جهد على الصفائح، فإن الشعاع يمر بين مجموعتي الصفائح دون أن ينحرف ويشكل بقعة مضيئة في مركز الشاشة.

في حال غياب الجهد عن الصفائح (X) وإذا أعطيت الصفيحة العليا (Y) جهداً موجباً ينحرف الشعاع نحو الأعلى بما يتناسب مع قيمة الجهد المستخدم. وبشكل مشابه فإن الشعاع ينحرف نحو الأسفل عندما تكون الصفيحة السفلى (Y) إيجابية. وفي حال سلطت على الصفائح (Y) قوة محرك كهربائية مترددة، فإن البقعة تتحرك نحو الأعلى والأسفل مشكلةً أثراً مضيئاً شاقولياً على الشاشة.

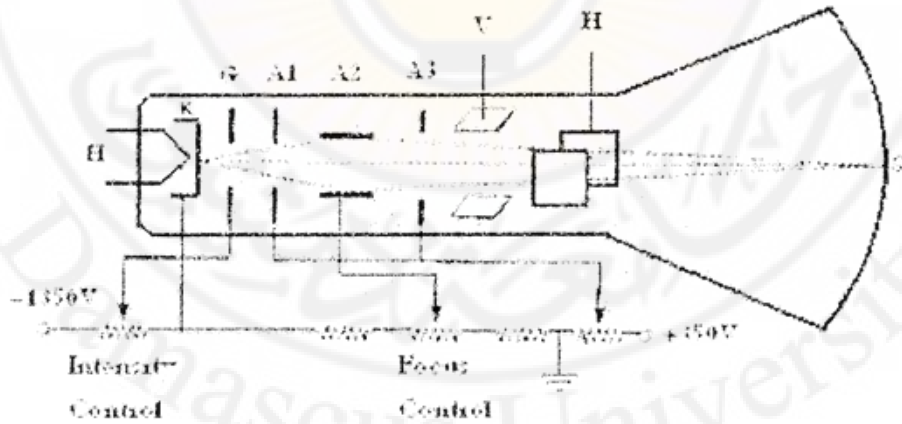
كما ذكرنا سابقاً يُسلط على مجموعة الصفائح (X) جهد خطي على شكل سن المنشار كما في الشكل 9-24. فتحت هذه الظروف يتحرك الشعاع

الإلكتروني من اليسار إلى اليمين. ومن خلال تكرار عملية ملاحظة أثر تشكل الموجة
نحصل على عرض مستمر للموجة خلال الزمن.

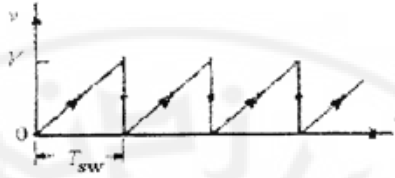
من أجل الحصول على شكل مستقر وغير مشوه على الشاشة عند قياس
الإشارات المترددة، من الضروري أن يحصل توافق زمني بين الإشارة المترددة المراد
قياسها وإشارة سن المنشار، وذلك حسب العلاقة التالية :

$$T_{sw} = nT_s$$

حيث: T_s - دور الإشارة المراد قياسها و T_{sw} - دور إشارة سن المنشار و n - عدد
صحيح.

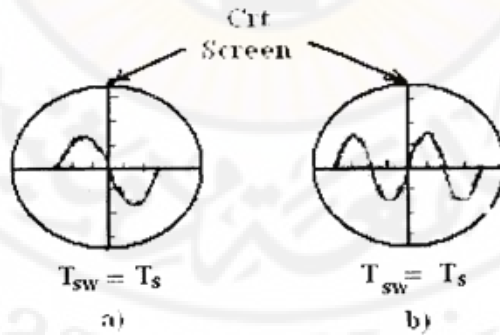


الشكل 9-23. مخطط أنبوب الأشعة المهبطية



الشكل 9-24. جهد سن المنشار المسلط على مجموعة الصفائح X

إذا كان ($n = 1$) يكون ($T_s = T_{SW}$) سيتم عندئذ عرض دور واحد فقط للإشارة المراد قياسها كما يبدو في الشكل 9-25-a. أما إذا كانت T_{SW} تساوي ضعفي T_s فسيتم عرض دورين كما يبدو في الشكل 9-25-b. ومن الواضح أنه حصول ثلاثة أدوار كاملة على الشاشة فإن T_{SW} يجب أن تساوي ثلاثة أضعاف T_s .



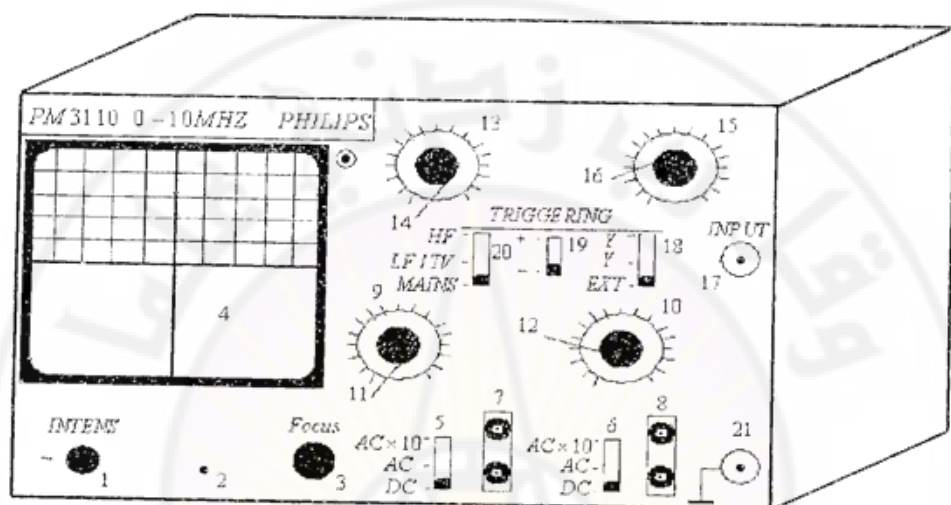
الشكل 9-25. توافق الإشارات

9-7-8-2- مفاتيح راسم الإشارة :

يبين الشكل 9-26 أحد أشكال راسم الإشارة وتظهر فيه المفاتيح التالية:

- 1- مفتاح التشغيل والإضاءة Intensity ويتم به تشغيل الجهاز بتدوير المفتاح باتجاه عقارب الساعة، ويتحكم بشدة الإضاءة.
- 2- مصباح يضيء عند تشغيل الراسم.
- 3- مفتاح التحكم في دقة الإضاءة focus - يمكن بواسطته جعل الإشارة على الشاشة في أوضح صورة.
- 4- شاشة الراسم.
- 5- مفتاح نوع التيار للإشارة المطبقة على المدخل Y_A ، فإذا كان التيار مستمراً يُوضع المفتاح على DC، وإذا كان متردداً يُوضع على AC، ويوضع على $10 \times AC$ لتكبير الإشارة المترددة عشر مرات.
- 6- مفتاح نوع التيار للإشارة المطبقة على المدخل Y_B .
- 7- مدخل لوحة الانحراف الشاقولي Y_A لتيار المستمر والمتردد ويستخدم في التوصيل كابل محوري حيث يكون السلك المحوري هو الموجب والشبكة المحيطة به هي الأرضي أو السالب. عند لمس السلك الأرضي لا تتغير الإشارة على شاشة الراسم، أما عند لمس السلك الموجب تظهر إشارات تشويش على الشاشة.
- 8- مدخل لوحة الانحراف الشاقولي Y_B .
- 9- مفتاح التضخيم الشاقولي Y_A $\{V/div\}$ - وهو يعطي قيمة التدرج الواحدة بالفولت أو بالميلي فولت، فإذا كان مقدار الانحراف مثلاً يساوي تدرجتين والمفتاح على 5V تكون قيمة الجهد المقاس 10V.
- 10- مفتاح التضخيم الشاقولي Y_B $\{V/div\}$.
- 11- مفتاح الإزاحة الشاقولية - وبه يمكننا إزاحة الإشارة المتشكلة على شاشة الراسم للأعلى وللأسفل وفق المحور الشاقولي Y_A .

- 12- مفتاح الإزاحة الشاقولية Y_H .
- 13- مفتاح الإزاحة الأفقية وبه يمكن إزاحة الإشارة المتشكلة على الراسم أفقياً بمقدار 5 تدريجات.
- 14- مفتاح إزاحة أفقية لتحريك الإشارة لليمين واليسار.
- 15- مفتاح قاعدة الزمن وهو يعطي قيمة التدريجية الأفقية الواحدة بالثانية أو بالميلي ثانية. ويفيد في معرفة دور الموجة وترددها بالإضافة إلى ضبط سرعة الحركة الأفقية للشعاع الإلكتروني.
- 16- مفتاح التوقيت الدقيق لمعايرة قاعدة الزمن.
- 17- مدخل لوحة الانحراف الأفقي.
- 18- مفتاح يُحدد المدخل المستخدم Y_H ، $Y_{H'}$ أو EXT.
- 19- إحداث فرق طور قدره 180 درجة.
- 20- مفتاح تحديد نوع التردد المستخدم (عالٍ أو منخفض).
- 21- أرضي.



الشكل 9-26 أحد أشكال راسم الإشارة

المراجع

- 1- Electronics in Industry
George M. Chute, Robert D. Chute
McGraw-Hill Book Co.
- 2- Engineering Electronics
J. D. Ryder
McGraw-Hill Book Co.
- 3- Principle of Industrial Electronics
Ben Zeines
McGraw-Hill Book Co.
- 4- Electronique Industrielle, 1974.
G. Goudet Eyrolles
- 5- Experimental Methods for Engineers.
International Student Edition
J. P. Hoffman
McGraw-Hill Book Co.
- 6- Basic Transducers and Principles
Robert A. Peura and John G. Webster
- 7- Elements of Electrical and Electronic Instrumentations, 1975
Kurt S. Lion
McGraw-Hill Book Co.
- 8- The PLC Workbook
Programmable Logic Controllers made easy, 1996
K. Clements-Jewery & W. Jeffcoat
Prentice Hall.
- 9- Industrial Electronics: Devices and Systems, second edition, 2000.
Dale R. Patrick and Stephen W. Fardo
The Fairmont Press, Inc. Lilburn, Georgia

- 10-Circuit Design for Electronic Instrumentation.
Analog and Digital Devices from Sensor to display, 1979.
Darold Wobschall.
McGRAW-HILL Book Co.
- 11-Instrumentation for Engineering Measurements, second
edition, 1993.
James W. Dally (University of Maryland),
William F. Riley,
Kenneth G. McConnell (Iowa State University)
John Wiley and Sons, Inc.
- 12- Microelectronic Circuits, 3rd. edition, 1991.
Adel S. Sedra & Kenneth C. Smith, University of
Toronto, Saunders College Publishing.
- 13- Microelectronics, 2nd. Edition, 1987.
Digital and Analogue Circuits and Systems.
Jacob Millman & Arvin Grabel
McGraw-Hill Book Co.
- 14- Semiconductors from A to Z, 1974.
Philip Dahlen.
Tab Books
- 15- Industrial Electronics. Second Edition, 1978.
Noel Morris.
North Staffordshire Polytechnic.
McGraw-Hill Book Co. (UK) Limited.
- 16- Industrial Electronics, Second Edition, 2000.
Applications for Programmable Controllers, Instrumentation and
Process Control, and Electrical Machines and Motor Control.
Thomas F. Kissell
Terra Community College
Prentice Hall.

- 17- Fundaments of Electronics, 1990.
I.P. Jerebtsov
Energoatomizdat, Leningrad.
- 18- A Textbook of Electrical Technology, 2001.
B.L.Theraja & A.K.Theraja
S.Chand & Companyltd. Ram Nagar, New Delhi.
- 19- Control Systeme in Thyristor DC Drivers , 1988.
V.M.Perelmutter & V.A.Sidorenko
Energoatomizdat, Moscow.
- 20- Microelectronic Circuits, 4th. edition, 2004.
Adel S. Sedra & Kenneth C. Smith
Oxford University .
- 21- Mechatronics, 3rd. edition, 2003.
Electronic Control Systems in Mechanical and Electrica
Engineering .
W.Bolton
Prentice Hall.
- 22- Programmable Controllers, Operation and Application, 1988.
Warnock I.G.
Prentice-Hall.
- 23- Programmable Logic Controllers, 1996.
W.Bolton
Newnes.
- 24- Automation with Programmable Logic Controllers, 1996.
Rohner P.
Macmillan.
- 25- Industrial Electronics,1988.
Gorbachev G.N. & Chapligin E.E.
Energoatomizdat, Moscow.
- 26- Fundaments of Industrial Electronics, 1978.
Gerasimov V.G.

Vishaya shkolam, Moscow.

27- Electrical Measurements, 1982.

Drakhsev P.
Energoizdat, Moscow.

28- General Electrical Engineering, 1986.

A.T. Blajkin
Energoatomizdat, Leningrad.

29- Devices of Automatic Control, 1986.

N.I. Volkov & V.P. Milovzorov
Vishaya shkolam, Moscow.

30- الهندسة الإلكترونية- جامعة دمشق - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية،
الأستاذ الدكتور عبد الرزاق بدوي.

31- الإلكترونيات الصناعية 1 و 2 - جامعة حلب - كلية الهندسة الكهربائية،
الأستاذ الدكتور محمد سعيد عقيل.

32- القياسات وأجهزة القياس الكهربائية- جامعة دمشق - كلية الهندسة الميكانيكية
والكهربائية، الدكتور محمد موسى.

33- الفيزياء العملي- جامعة عمر المختار- الدكتور عبد الحميد الحامض.

34- الإلكترونيات الصناعية- جامعة دمشق- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية،
الدكتور فاروق الدريعي.

35- المتحكم القابل للبرمجة - الجامعة الصيفية 2004 - محاضرات البرفسور جون
ديريز.

المصطلحات العلمية

A

A.C. Current	تيار متناوب
A.C. Voltage	جهد متناوب
Absolute Value	قيمة مطلقة
Absorption	امتصاص
Accelerating capacitor	مكثف تسريع
Acceptor Atom	جوهـر مستقبل
Acquisition Time	زمن التحصيل
Active	فَعَّالٌ - نشيط
Active Circuit	دائرة فعالة
Active Line	خط فعال
Active Network	شبكة فعالة
Admittance	سمحية
Alarm	تنبيه - إنذار
Alarm Signal	إشارة تنبيه (إنذار)
Alpha, α	ألفا
Amplification	تكبير
Amplifier	مكبر
Amplifiers Coupling	ترابط (ربط) المكبرات
Amplitude	مطال

Amplitude Factor	عامل المظال
Amplitude Modulation, AM	تعديل مضالي
Amplitude Stabilization	استقرار المظال
Analog-to-Digital, (A/D) Converter	محول تماثلي /رقسمي
Angular	زاوي
Angular Displacement	إزاحة زاوية
Anode	متباعد
Aperture Time	زمن الفتحة
Λ -Stable Circuit	دارة علامة الاستقرار
Attenuation Factor	عامل التخميد
Attenuator	مُخَمِّد - مُضَعِّف
Audio Frequency	تردد سمعي (صوتي)
Avalanche Transistor	ترانزستور جرفي
Average	وسط - معدّل
Average Detection	كشف القيمة المتوسطة
Average Value	قيمة وسطية
Average Voltage	الجهد المتوسط

B

Band	نطاق
Bandwidth	عرض النطاق
Base	قاعدة

Beam	حزمة
Beta, β	بيتا
Bias Current	تيار الانحياز (الاستقطاب)
Bias Voltage	جهد الانحياز (الاستقطاب)
Binary	ثنائي
Binary Code	رمز ثنائي
Binary Counter	عداد ثنائي
Binary System	نظام ثنائي
Bi-polar Transistor, BJT	ترانزستور ثنائي القطبية
Bi-Stable Circuit	دائرة ثنائي الاستقرار
Bit	بتة - بت
Bit of data	بتة معلومات
Bleeder Resistance	مقاومة تفرير
Block Diagram	مخطط صندوقي
Boolean Algebra	جبر بولياني
Breakdown Voltage	جهد انهيار
Brightness	نصوع - توهج
Brightness Control	ضبط النصوع
Buffer	عازل ، حاجز
Buzzer	طنان

C

Calibration	معايرة
Capacitance	سعة
Catching Diode	ثنائي تحفظ
Cathode	مهبط
Cell	خلية
Center Frequency	تردد المركز
Channel	قناة
Characteristics	خصائص
Charge	شحن ، شحنة
Chip	شرائح
Circuit	دائرة
Clamping Circuit	دائرة إزاحة
Clipper	محدد ، قاطع
Clipper Circuit	دائرة قطع
Clock Pulse	نبضة ساعة
Closed Loop	حلقة مغلقة
CMOS Transistor	ترانزستور CMOS
Code	رمز
Coding	ترميز
Coefficient	معامل
Coefficient of Amplification	معامل التكبير

Collector	مجمع
Common Base, C.B.	قاعدة مشتركة
Common Collector, C.C.	مجمع مشترك
Common Emitter, C.E	باعث مشترك
Comparator	مُقارِن
Compensation Circuit	دائرة تعويض
Complementary Emitter Follower	تابع باعشي متمم
Complimentary	متمم - متمم
Complimentary Output	خرج متمم (متمم)
Condenser/Capacitor	مكثف
Conduction	توصيل
Conductivity	توصيلية
Constant	ثابت
Continuous Signal	إشارة متواصلة
Control	تحكم - ضبط
Control Circuit	دائرة تحكم
Control Grid	شبكة التحكم
Converter	محول/مبدل
Convolution	طَيّ - نَيّ
Cosmic Rays	أشعة كونية
Counter	عداد
Counter Circuit	دائرة عداد
Coupler	قارِن

Coupling	ترابط ... اقتران
Coupling Coefficient	معامل الاقتران
Critical Value	قيمة حرجة
Crystal	بلورة
Current	تيار
Cutoff Frequency	تردد القطع
Cut-off Region	منطقة قطع
Cycle	دورة - دور
Cycle/sec, (Hz)	ذبذبة بالثانية، (هرتز)

D

D.C. Current	تيار مستمر
D.C. Voltage	جهد مستمر
Data Output	مخرج بيانات
Data Signal	إشارة معطيات
Data transmission	إرسال بيانات
Decibel, dB	ديسيبل
Delay	تأخير
Delay Cable	كبل تأخير
Delay Time	زمن تأخير
Depth	عمق
Detection	كشف

Detector	كاشف (مكشف)
Deviation	اشعراف
Device	جهاز - أداة
Diagram	مخطط - رسم بياني
Dielectric	عازل
Dielectric Absorption	امتصاص العازل
Differential	تفاضلي
Differential Circuit	دائرة تفاضلية
Differential Coefficient	معامل تفاضلي
Differential Function	تابع تفاضلي
Differential Transformer	محول تفاضلي
Differentiator	مُفاضل
Diffusion Capacitance	سعة الانتشار
Digit	رقم
Digital	رقمي
Digital Code	رمز رقمي
Digital Data	بيانات رقمية
Digital Display	تمثيل رقمي
Digital Electronics	إلكترونيات رقمية
Digital Signal	إشارة رقمية
Diode	ثنائي
Direct Coupling	اقتران مباشر
Discharge	تفريغ

Discrete Signal	إشارة مقطّعة
Discriminator Circuit	دارة كشف (تمييز)
Displacement	إزاحة - انتقال
Display	عرض
Display Board	لوحة عرض
Display Controller	متحكم بالإظهار
Distortion	تشوّه - تشويه
Divider	مجزئ
Donor Atom	جوهـر معطي
Drain	مَصْرَف
Drift rate	معدّل الانحراف
Droop	تَدَلّي
Duty Cycle	مردود الدورة
Dynamic Conductivity	توصيلية (ناقلية) ديناميكية
Dynamic Resistance	مقاومة ديناميكية
Detection	كشف التعديـن
Demodulation	كشف التعديـن

E

Earth	أرض
Earthing	تأريض
Eddy Current	تيارات إعصارية

Eddy Current Losses	المفاقيد بالتيارات الإعصارية
Effective Value	قيمة فعالة
Efficiency	مردود
Efficiency Factor	عامل المردود
Electric Circuit	دائرة كهربائية
Electric Field	حقول كهربائي
Electrical Discharge	تفريغ كهربائي
Electron	كهروب- إلكترون
Electrons Current	تيار كهارب
Element	عنصر
Emitter	باعث
Emitter Follower	تابع باعثي
Equation	معادلة
Equivalent Circuit	دائرة مكافئة
Exponential Signal	إشارة أُسيّة

F

Fall Time, t_f	زمن هبوط
FAN-IN	تحميل البوابات عند الدخل
FAN-OUT	تحميل البوابات عند الخرج
Feed Back	تغذية خلفية (عكسية)
Field Effect Transistor, FET	ترانزستور ذو أثر حقلي

Filter Circuit	دائرة مُرشِّح
Flash	وَمُضْئَة - وميض
Flasher Circuit	دائرة وامض
Flip-Flop	قَلَاب
Flow	تدفق
Fluctuation	تأرجُح
Focus	بؤرة - محرق
Focusing	تركيز في البؤرة (المحرق)
Forward Current	تيار أمامي
Four-layer Element	عنصر رباعي الطبقات
Frequency	تردد
Frequency Band	نطاق تردد
Frequency Deviation	انحراف التردد
Frequency Response	استجابة ترددية
Frequency Selection	اختيار التردد
Frequency Selective Network	شبكة اختيار التردد
Full Load	حمل كامل
Full Wave Rectifier	مُوَحِّد موجة كاملة
Function	تابع
Fundamental Frequency	تردد أساسي

G

Gain	ربح
Gate	بوابة
Generator	مولّد
Grounded	مؤرّض

H

Half Wave Rectifier	موحد نصف موجة
Harmonic Oscillator	مولّد إشارة جيبية
Harmonics	توافقيات
Hertz	هرتز
High Frequency	تردد عالي
High frequency Heating	التسخين عالي التردد
High Pass Filter	مرشح تمرير عالي
High Voltage	جهد عالي
High-Pass Filter	مرشح تمرير عالي
Holes	فجوات - ثقوب
Holes Current	تيار فجوات
Horizontal Deflection Plates	صفائح الانحراف الأفقية
Hysteresis Characteristics	خصائص تعويقية
Hysteresis Losses	المفاقد التعويقية

Impedance	معاوقة
Impurities	شوائب
Indicator	مؤشر
Induction	تحريض
Inductor	ملف تحريضي
Information	معلومات
Information Circuit	دائرة معلومات
Infra Red, IR	تحت الحمراء
INHIBIT	منع - كبح
Initial Phase	طور بدئي
Initial State	حالة أولية
Input	دخول
Input Current	تيار دخول
Input Impedance	ممانعة دخول
Input Resistance	مقاومة دخول
Input Voltage	جهد دخول
Instantaneous	خطي
Instantaneous Frequency	تردد لحظي
Instrument	جهاز
Integral Circuit	دائرة تكامل

Integrated Circuit, <i>IC</i>	دائرة تكاملية
Integrator	مُكامل
Interconnection	توصيل تقاطعي
Interference	تداخل
Internal Resistance	مقاومة داخلية
Intrusion Alarm	إنذار عند الافتحام
Inverter	عاكس
Inverting Amplifier	مكبر عاكس
Isolation Resistance	مقاومة عزل
Isolation Voltage	جهد عزل

J

Junction Diode	ثنائي ذو الوصلة
Junction Photocell	خلية ضوئية ذات الوصلة
Junction Capacitance	سعة الوصلة

L

Latch	ماسك
Leading Edge	جبهة أمامية
Lagging Edge	جبهة أمامية
Leakage	تسرب

LED Sequencing Circuits	دارات LED تتابعية
Level	مستوى
Light Emitting Diode, LED	ثنائي باعث للضوء
Limiter	محدد
Linear Circuit	دائرة خطية
Linear Element	عنصر خطي
Linear Function	تابع خطي
Linear System	نظام خطي
Linear Voltage	جهد خطي
Linearity	خطية
Load	الحمل
Load Current	تيار حمل
Load Line	خط الحمل
Load Resistance	مقاومة حمل
Loaded	محمّل
Loaded Circuit	دائرة محمّلة
Logarithmic	لوغاريتمي
Logic	منطق
Logic Circuit	دائرة رقمية
Logic Noise	ضجيج منطق
Logic Principles	مبادئ منطق
Loop	حلقة
Loop Gain	ربح الحلقة

Loss	فقد - خسارة
Low frequency	تردد منخفض
Low Pass Filter	مرشح تمرير منخفض

M

Magnetic Coupling	ترباط مغنطيسي
Magnitude	مقدار
Mark-Space Ratio	نسبة عرض النبضة إلى الفراغ
Mass	كتلة
Matching	توافق (مواءمة)
Maximum Value	قيمة عظمى
Measuring Instrument	جهاز قياس
Minimum	دنيا
Mobility	حركية
Modulation	تعديل
Modulation Envelope	غلاف التعديل
Modulation Index	عامل التعديل
Mono-Stable Circuit	دارة وحيد الاستقرار
Mono-stable Multivibrator	مبهرز وحيد استقرار
Mono-stable, <i>M.St.</i>	وحيد استقرار
Monotone	وحيد النغم
Multimeter	جهاز قياس متعدد الأغراض

Multiplexer

مجمع - مضاعف

Multivibrator

متعدد الاهتزاز

N

Negative

سالب

Negative Resistance

مقاومة سالبة

Network

شبكة

Neutral

حيادي

Noise

ضجيج

Noise Factor

عامل ضجيج

Noise Figure

شكل ضجيج

Noise Filter

مرشح ضجيج

Noise Level

مستوى ضجيج

No-Load

اللا حمل

Non-Inverting

غير عاكس

Non-Inverting Amplifier

مكبر غير عاكس

Nonlinear

غير خطي

NPN transistor

NPN ترانزستور نوع

Numeric

عددي

Non-linear

غير خطي

O

Offset Voltage	جهد إزاحة
Off-State	حالة قطع
On-State	حالة توصيل (وصل)
Open Loop Gain	ربح الحلقة المفتوحة
Operational Amplifier	مكبر عمليات
Opto	ضوئي (بصري)
Opto Isolator	عازل ضوئي (بصري)
Opto Reflector	عاكس ضوئي (بصري)
Opto Triac	ترياك ضوئي (بصري)
Optocoupler	قارن ضوئي (بصري)
Oscillator	مهتز
Oscilloscope	راسم إشارة
Output	خروج
Output Impedance	معاوقة خرج
Output Power	قدرة خرج
Output Pulse	نبضة خرج
Output Resistance	مقاومة خرج
Output Signal	إشارة خرج
Output Voltage	جهد خرج
Overshoot	تجاوز
Overtones	ترددات عليا

P

Parameters	مُعامِلات
Parasitic Capacitance	سعة تشويشية
Parasitic Inductance	تَحْرِيطُ تشويشي
Pass Band	نطاق تمرير
Peak	ذروة
Peak Factor	عامل ذروة
Peak Voltage	جهد ذروة
Penetration	اختراق
Periodic Function	تابع دوري
Periodic Signal	إشارة دورية
Periodic Wave	موجة دورية
Permeability	سمحية
Phase	طور
Phase Shift Oscillator	مُهْتَز ذو إزاحة في الطور
Phenomena	ظاهرة
Photo Conductive Cell	خلية توصيل ضوئية
Photo emissive Element	عنصر إصدار ضوئي
Photo Resistive Cell	خلية مقاومة ضوئية
Photoelectric Cell	خلية كهروضوئية
Photoelectric Constant	ثابت كهروضوئي
Photoelectric Detector	مكشاف (كاشف) كهروضوئي

Photoelectric Effect	تأثير كهروضوئي
Photoelectric Emission	إصدار كهروضوئي
Photomultiplier	مضاعف ضوئي
Photovoltaic Cell	خلية جهدية ضوئية (خلية شمسية)
Piezoelectric	كهروضغطي
Piezoelectric Effect	أثر كهروضغطي
Pinch-off Voltage	جهد اختناق
P-N Junction	وصلة (P-N)
PNP Transistor	ترانزستور نوع PNP
Polarity	قطبية
Polarization	استقطاب
Polarized	مُستقطب
Positive	موجب
Potentiometer	مقاومة متغيرة
Power	قدرة - استطاعة
Power Amplifier	مضخم (مكبر) قدرة
Power supply	منبع تغذية كهربائية
Preamplifier	مضخم أولي
Primary Winding	ملف أولي
Proportionality Factor	عامل النسبية
Pulse	نبضة
Pulse Circuit	دائرة نبضية
Pulse Generator	مولد نبضي

Q

Quality	نوعية
Quality Factor	عامل الجودة

R

R. F. Oscillator	مُهتَز تردد راديوي
Radiation	إشعاع
Ramp or Sweep Signal	إشارة متغيرة خطياً، إشارة مسح
Ratio Detector	كاشف النسبة
Ray	شعاع
Reactance	رَدِّيَّة
Rectangular Pulse	نبضة قائمة
Rectifier	مُوحِّد
Rectifier Circuit	دائرة توحيد
Reference	مراجع
Reference Level	مستوى مرجعي
Reference Signal	إشارة مرجعية
Regenerative Characteristics	خصائص بحدِّدة
Regulation	تنظيم
Relaxation Oscillator	مُهتَز استرخائي
Relay	حاکمة

RESET	يُهَيِّئ
Reset State	حالة إرجاع
Resistance	مقاومة
Resistances Matching	توافق مقومات
Resistive Temperature Coefficient, α	معامل درجة الحرارة للمقاومة
Resistivity	مقاومية
Resolution Time	زمن التبيين
Resonance	رنين - طنين
Resonant Frequency	تردد الرنين
Response Time	زمن الاستجابة
Return Ratio	نسبة الرجوع
Reverse Current	تيار عكسي
Ripple Factor	عامل التخرج
Ripples	تعرجات
Rise Time	زمن صعود

S

Saturated Circuit	دائرة مشبعة
Saturation	إشباع
Saturation Region	منطقة إشباع
Saw-tooth Signal	إشارة سن منشار
Screen	شاشة

Secondary Winding	ملف ثانوي
Self-Heating Factor	عامل التسخين الذاتي
Semiconductor Circu	دارة نصف ناقل
Sensing Element	عنصر تحسس
Sensitivity	حساسية
Sensor	حساس
Sequential Circuit	دارة تتابعية
Series Resonance	رنين تسلسلي
SET	يُعَدُّ - يُحَكِّم
Set State	حالة كهينة
Set-Reset	كهينة - إرجاع
Settling Time, t_s	زمن الاستقرار
Shift	انزياح
Signal	إشارة
Signal Generator	مولّد إشارة
Signal Source	منبع إشارة
Signal/Noise Ratio	نسبة الإشارة إلى الضجيج
Sine Wave	موجة جيبية
Single Phase	وحيد الطور
Sinking Current	تيار السحب
Sinusoidal Signal	إشارة جيبية
Sinusoidal Wave	موجة جيبية
Skin Effect	ظاهرة قشرية

Slew Rate	معامل الميل
Slope	ميل
Slope Angle	زاوية الميل
Solar Cell	خلية شمسية
Solid State	حالة صلبة
Source	منبع
Sourcing Current	تيار التصدير
Specific Heat	الحرارة النوعية
Specific Heat Power	قدرة التسخين النوعية
Spectrum	طيف
Square Signal	إشارة مربعة
Stabilization	استقرار
Stable	مستقر
Stable State	حالة مستقرة
Stair Case Signal	إشارة درجية (سُلمية)
Standard	قياسي
Starting Voltage	جهد إقلاع
State	حالة
Static Resistance	مقاومة ساكنة
Steady State	حالة مستقرة
Steering Diode	ثنائي توجيه
Step Function	تابع خطوي

Step Signal	إشارة قفزة
Step Voltage	جهد خطوة
Storage Cell	خلية خزن (خلية ذاكرة)
Stray Capacitance	سعة شاردة
Substrate	الطبقة الأساس
Superposition Method	طريقة التراكب
Sweep	مسح
Sweep Signal	إشارة مسح
Sweep Voltage	جهد مسح
Switching Circuit	دائرة تبديل
Switching Cycle	دورة التبديل
Switching Speed	سرعة التبديل
Switching Time, t_W	زمن التبديل
Switching Trajectory	مسار التبديل
Symmetrical	متناظر
Synchronization	تزامن
System	نظام

T

Technique	تقنية
Temperature	درجة حرارة
Thermal	حراري

Thermal Conductivity	توصيلية حرارية
Thermal Radiation	إشعاع حراري
Thermal Time Constant	ثابت زمن حراري
Thermistor	ثيرمستور
Thermometer	ميزان حرارة - تيرمو متر
Three Phase	ثلاثي الطور
Threshold	عتبة
Threshold Voltage	جهد عتبة
Thyristor, (SCR)	ثايرستور (موحد متحكم به سيليكوني)
Time Base	قاعدة الزمن
Time Constant, τ	ثابت زمن، τ
Time Delay	تأخير زمني
Time Delay Circuit	دائرة تأخير زمني
Time Function	تابع زمني
Timer	مؤقت
Timing Markers	علامات توقيت
Tone	نغم - طنين
Transducer	مجس
Transfer	نقل - تحويل
Transfer Characteristics	خصائص التحويل (النقل)
Transfer Equation	معادلة التحويل (النقل)
Transformer	محول
Transistor	ترانزستور

Transition Time	زمن الانتقال (التحول)
Transmission Gate	بوابة نقل (إرسال)
Transmitter Circuit	دارة مرسل (إرسال)
Triac	ترياك
Triangular Wave	موجة مثلثية
Trigger	قادح
Triggering Level	مستوى قَدَح
Triggering Signal	إشارة قَدَح
Trimmer	مكثف تعيير دقيق

U

Ultraviolet, UV	فوق بنفسجي
Unijunction Transistor	ترانزيستور وحياد الوصلة
Unregulated Power Supply	منبع تغذية غير منظم
Undershoot	قصور
Unloaded	غير محمّل
Unstable State	حالة غير مستقرة

V

Varactor Diode	ثنائي متغير السعة
Velocity	سرعة

Vertical Deflection Plates	صفائح الانحراف العمودية
Visible	مرئي
Voltage Amplification	تكبير جهد
Voltage Divider	مجزئ جهد
Voltage Doubler	مضاعف جهد
Voltage Drop	هبوط جهد
Voltage Multiplier	ضارب جهد
Voltage Regulator	منظم جهد
Voltage Source	منبع جهد
Voltage-time Converter	مبدل جهد-زمن

W

Wave	موجة
Wave Length	طول الموجة
Wave Propagation	انتشار موجة
Width	عرض
Winding	ملف
Wire	سلك

X

X-Rays	أشعة سينية
--------	------------

Y

Y-rays

أشعة غاما

Z

Zener Diode

ثنائي زينير

Zener Voltage

جهد زينير

Zero Crossing Detecto

كاشف العبور بالصفر

اللجنة العلمية:

د. حسن أبو النور

د. فاروق دريعي

د. جورج صنيح

المدقق اللغوي:

د. منى طع

حقوق الطبع والترجمة والنشر محفوظة لمديرية الكتب والمطبوعات

