الباب الأول

مكبرات العمليات OP. Amp.

obeikandl.com

obeikandl.com

مكبرات العمليات OP. Amp.

١ / ١ - مقدمة

فى عام ١٩٤٠ ميلادية عند ابتكار الكومبيوتر التناظرى كانت الحاجة ماسة لمكبر له كسب عالى وأداء ممتاز لإجراء العمليات الحسابية مثل: الجمع والطرح والتفاضل والتكامل الأمر الذى ساعد على ابتكار مكبر العمليات، وكانت مكبرات العمليات فى بادئ الأمر تبنى من الصمامات التى كانت تشغل حيزاً كبيراً آنذاك؛ ولكن مع اكتشاف الترانزستور أصبحت مكبرات العمليات أبسط وأصغر وأصبحت تتواجد فى صورة موديلات Modules وهذه الموديلات عبارة عن صندوق صغير يحتوى على جميع مكونات مكبر العمليات، ولكن مع تطور تكنولوجيا أشباه الموصلات أمكن تصنيع مكبرات العمليات فى دائرة متكاملة واحدة.

وفى هذه الأيام أصبحت مكبرات العمليات متوفرة فى الأسواق بكثرة وبأسعار زهيدة تقترب من أسعار الترانزستورات.

١ / ٢ - مكبرات العمليات المثالية والحديثة

فيما يلى أهم المواصفات الفنية لمكبر العمليات المثالى:

١ - تكبير لا نهائى: فأقل تغير فى الدخل يجب أن يقابله تغير لا نهائى فى الخرج.

٢ - خرج صفرى يقابل الدخل الصفرى.

٣ - معاوقة لا نهائية للدخل: فيجب أن تكون القدرة المسحوبة فى الدخل منعدمة.

٤ - معاوقة صفرية للخرج: فيجب ألا يتغير جهد الخرج عندما تنخفض مقاومة الحمل للصفر.

٥ - عرض حزمة ترددات لا نهائية Infinit band Width.

٦ - لا يتأثر بتغير جهد مصدر القدرة أو تغير درجة الحرارة.

وبالرغم من أن مكبر العمليات المثالى لم يصنع إلى الآن إلا أن تكنولوجيا أشباه الموصلات استطاعت أن تصل بخواص مكبرات العمليات إلى مواصفات تقترب من تلك الخاصة بمكبر العمليات المثالى.

وفيما يلى خواص مكبرات العمليات الحديثة المتوفرة فى الأسواق:

١ – كسب عال جداً للجهد المستمر يصل إلى (10^3:10^6).

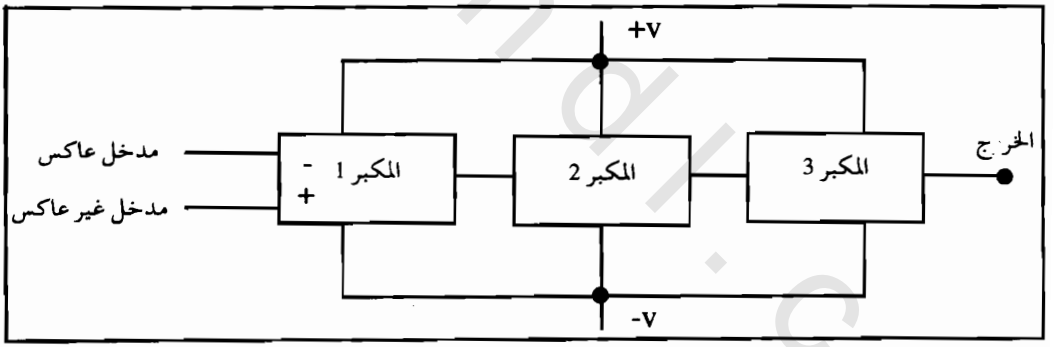
٢ – عرض حزمة ترددات يبدأ عند التيار المستمر dcوينتهى عند كسب الوحدة unity gain.

٣ – جهد خرج موجب أو سالب يتراوح ما بين ± 100 V: ± 10 V.

٤ – معاوقة دخل كبيرة بحيث يكون تيار الدخل مهملاً.

٥ – حيود قليل جداً للخرج عند تغير درجة الحرارة.

والشكل (١ – ١) يبين المخطط الصندوقى لمكبر العمليات.



الشكل (١ – ١)

ويلاحظ أن مكبر العمليات يتكون من:

١ – مكبر رقم 1 وهو مكبر تفاضلى له معاوقة دخل كبيرة، وله مدخلان أحدهما يأخذ إشارة سالبة، ويسمى مدخل عاكس Inverting input والآخر يأخذ إشارة موجبة ويسمى مدخل غير عاكس Non inverting input.

٢ – مكبر رقم 2 وهو مكبر جهد له معامل كسب كبير.

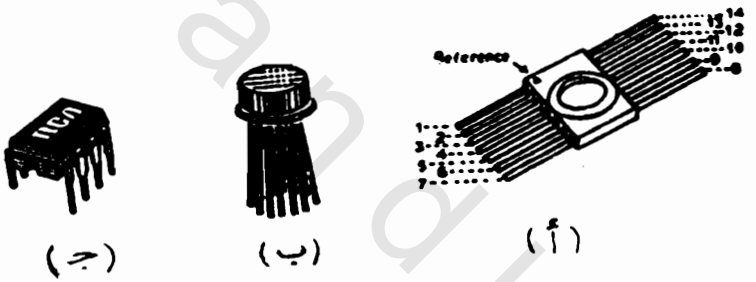
٣ – مكبر رقم 3 وهو مكبر بمعاوقة خرج صغيرة.

وتتواجد الدوائر المتكاملة لمكبرات العمليات فى ثلاث صور مبينة بالشكل (١ – ٢) وهم كما يلى:

– دوائر متكاملة مبططة Flat Package (الشكل أ).

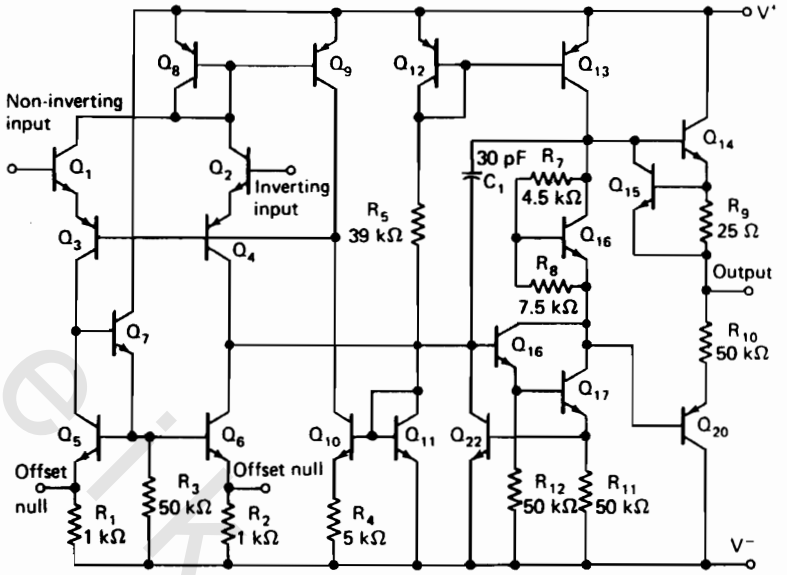
– دوائر متكاملة على شكل اسطوانة معدنية Metal Cane Package (الشكل ب).

– دوائر متكاملة على شكل شريحة بصفين من الأرجل Dual in Line (DIL) (الشكل جـ).



الشكل (١ – ٢)

أما الشكل (١ – ٣) فيعرض التركيب البنائى لمكبر عمليات طراز 741، ويلاحظ أن عدد الترانزستورات المستخدمة فى بناء المكبر تساوى 20 ترانزستور بالإضافة إلى إثنى عشر مقاومة ومكثف، وهذه الدائرة يصعب تنفيذها باستخدام عناصر مستقلة؛ ولكن لحسن الحظ أمكن تجميع هذه العناصر فى شريحة متكاملة واحدة.



الشكل (١ – ٣)

والشكل (١ – ٤) يعرض نموذجًا لدائرة مكبر عمليات 741 من نوع DIL، وكذلك المسقط الأفقى للدائرة المتكاملة لمكبر العمليات 741، والذى يبين جميع المداخل والمخارج. ويلاحظ وجود تجويف نصف دائرى على أحد جانبى الدائرة المتكاملة وحتى يمكن معرفة أرقام أرجل الدائرة المتكاملة تمسك الدائرة المتكاملة باليد بحيث يكون التجويف فى اليسار فتكون الرجل اليسرى هى الرجل رقم 1، ويكون العد فى عكس اتجاه عقارب الساعة.

التعريف بوظائف أرجل مكبر العمليات 741:

الرجل (1) تستخدم لضبط الخرج عند الصفر.

الرجل (2) تمثل المدخل العاكس.

الرجل (3) تمثل المدخل غير العاكس.

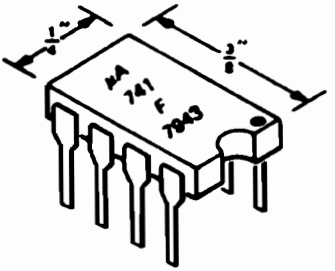
الرجل (4) توصل بالجهد السالب للمصدر ويساوى V 15 -.

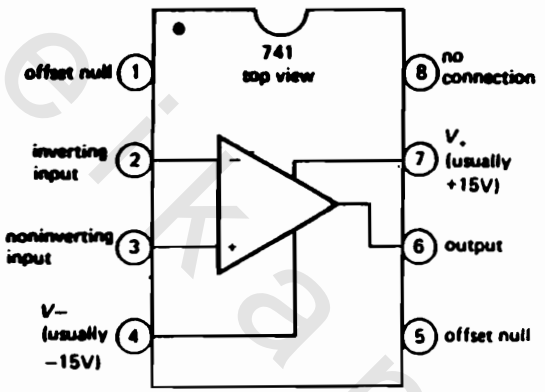
الرجل (5) تستخدم لضبط الخرج عند الصفر.

الرجل (6) تمثل الخرج.

الرجل (7) توصل بالجهد الموجب للمصدر ويساوى +15V.

الرجل (8) غير مستخدمة.





الشكل (١ – ٤)

١ / ٣ – بناء مكبر عمليات بسيط

الشكل (١ – ٥) يعرض دائرة مكبر عمليات بسيط باستخدام عناصر مستقلة.

عناصر الدائرة:

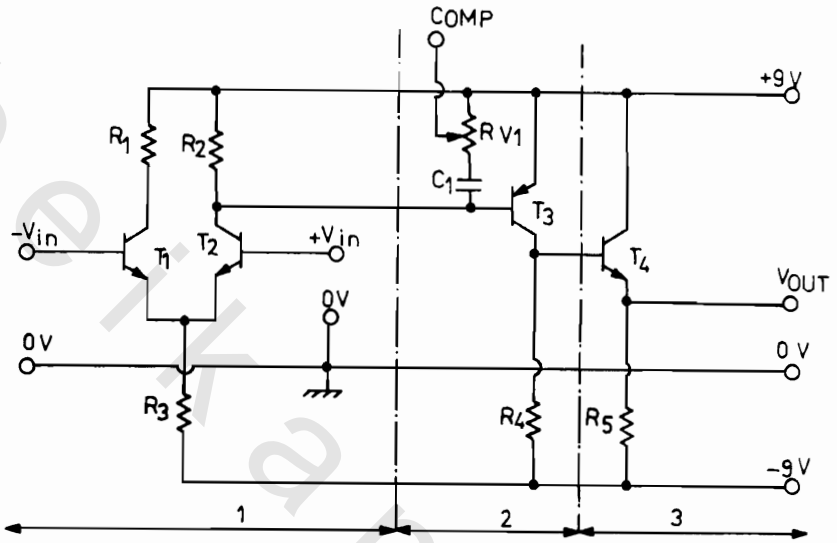
مقاومة كربونية 6.8 K Ω	R_1, R_2, R_4
مقاومة كربونية 47 K Ω	R_3
مقاومة كربونية 4.7 K Ω	R_5
مقاومة متغيرة 100 Ω	RV_1
مكثف بوليسير 0.01 μF	C_1

obeikandl.com

ترانزستور NPN طراز BC 148 — T_1, T_2, T_4

ترانزستور NPN طراز BC 158 — T_3

مصدر قدرة (+ 9V, 0, - 9V)



الشكل (١ – ٥)

نظرية عمل الدائرة:

تشكل الترانزستورات T_1, T_2 مرحلة الدخل الفرقى وتوصل المقاومة الكبيرة R_3 بالتوالى مع T_1, T_2 ، وتعمل كمصدر تيار ثابت. أما الترانزستور T_3 فيعمل كمرحلة تكبير بينية فى حين أن الترانزستور T_4 يشكل مرحلة خرج ذات معاوقة صغيرة. وعند وصول إشارة للمدخل غير العاكس (+) يتم تكبيرها بواسطة T_2 مع عكس الإشارة ثم تكبيرها مرة أخرى بواسطة T_3 مع عكس الإشارة والنتيجة أن يكون خرج T_3 متفق فى الإشارة مع إشارة الدخل أما T_4 فيعمل كمكبر غير عاكس.

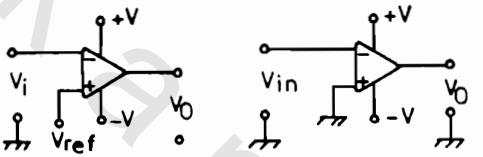
وعند وصول إشارة إلى المدخل العاكس (–) والذى يمثل قاعدة T_1 فإنه بنفس الطريقة السابقة يحدث تكبير لإشارة الدخل بنفس معامل التكبير ولكن بإشارة مخالفة.

وتعمل المقاومة RV1 والمكثف C1 على تحسين استجابة المكبر ويسمى طرف المقاومة المتغيرة RV1 بطرف التعويض.

١ / ٤ - خواص مكبرات العمليات:

١ / ٤ / ١ - التشغيل بالحلقة المفتوحة والحلقة المغلقة:

إن تشغيل مكبرات العمليات بدون تغذية مرتدة يسمى بالتشغيل بالحلقة المفتوحة، حيث يتم تكبير إشارة دخل صغيرة جداً لتصبح إشارة خرج كبيرة جداً، نتيجة للكسب الكبير لمكبر العمليات. ويستخدم التشغيل بالحلقة المفتوحة عند المقارنة. والشكل (١ - ٦) يعرض طريقة استخدام مكبر العمليات فى المقارنة.

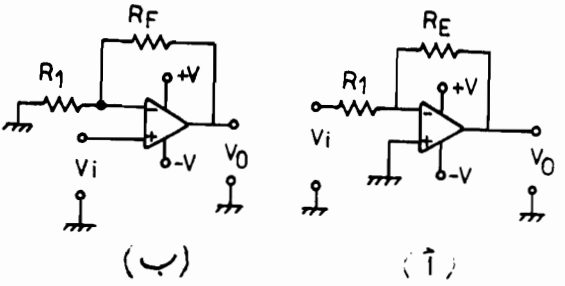


أ ب

الشكل (١ - ٦)

والشكل (أ) يبين طريقة استخدام مكبر العمليات فى مقارنة إشارة جهد الدخل Vi بجهد الأرضى. والشكل (ب) يبين طريقة استخدام مكبر العمليات فى مقارنة جهد إشارة الدخل Vi بجهد أساس Vref. وسوف نتناول دوائر المقارنة بالتفصيل فى الفقرة (١ / ٦ / ٦).

وعادة فإن مكبر العمليات يعمل بحلقات مغلقة سواء كان الدخل من المدخل العاكس، أو المدخل غير العاكس، حيث تكون التغذية من المخرج إلى المدخل العاكس، كما هو مبين بالشكل (١ - ٧).



(ب) (أ)

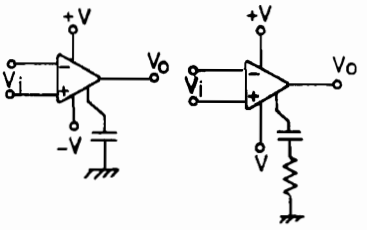
الشكل (١ – ٧)

فإن دخلت إشارة على المدخل العاكس سمى المكبر بالمكبر العاكس (الشكل أ)، وإذا دخلت إشارة الدخل على المدخل غير العاكس سمى المكبر بالمكبر غير العاكس (الشكل ب).

والجدير بالذكر أن كسب الدائرة يعتمد فى هذه الحالة على قيم عناصر التغذية المرتدة كما سيتضح فيما بعد.

١ / ٤ / ٢ – تعويض التردد Frequency Compensation

من المعروف أنه عند تغذية المكبر العاكس بجهد مستمر موجب فإن الخرج سيصبح سالبًا أى أن الإزاحة الوجهية بين الخرج والدخل تكافىء 180° درجة كهربية، ولكن فى حالة إشارات الدخل المتردد فكلما ازداد التردد ازدادت الازاحة الوجهية لتصل إلى 360°؛ الأمر الذى يؤدى إلى حدوث تذبذب فى خرج المكبر، لأن الإشارة المرتدة أصبحت متفقة فى الوجه مع إشارة الدخل (لأن إزاحة 360° تعنى اتفاق فى الوجه) ولعلاج هذه المشكلة فإن بعض مكبرات العمليات غير المزودة بتعويض داخلى للتردد تزود برجل إضافية لتعديل الوجه، وذلك لإحداث تأخير فى الوجه Lag أو



(أ)

الشكل (١ – ٨)

إحداث تقديم فى الوجه Lead كما هو مبين بالشكل (١ – ٨) فالشكل (أ) يبين طريقة إحداث تقديم فى الوجه، والشكل ب يبين طريقة إحداث تأخير فى الوجه، والشكل (ب) يبين طريقة إحداث تأخير فى الوجه، وعادة نحتاج لتعويض التردد عند تشغيل مكبرات العمليات عند ترددات أعلى من التردد الأقصى والذى يتراوح ما بين 1:10MHZ .

والجدير بالذكر أن مكبر العمليات 741 لايحتاج لتعويض فى التردد لأنه مزود داخلياً بدائرة تعويض .

١ / ٤ / ٣ – عرض حزمة الترددات Band Width

عرض حزمة الترددات لمكبرات العمليات يقصد بها مدى الترددات التى يعمل فيها مكبر العمليات باستقرار، ويتناسب عرض حزمة الترددات تناسبًا عكسيًا مع الكسب . فمثلاً يمكن أن يستخدم مكبر العمليات 741 فى دائرة بحيث يكون له معامل كسب 100، ويكون له عرض حزمة ترددات 10 KHZ . فى حين يمكن استخدام مكبر العمليات 741 فى دائرة أخرى بحيث يكون له معامل كسب 10 ويكون له عرض حزمة ترددات 10 KHZ .

فى حين يمكن استخدام مكبر العمليات 741 فى دائرة أخرى بحيث يكون له معامل كسب 10 وله عرض حزمة ترددات 100KHZ .

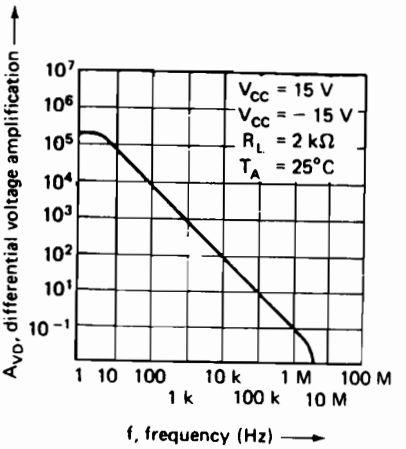
والمعادلة 1.1 تستخدم لإيجاد عرض حزمة الترددات BW :

$$BW = \frac{GBW}{Av} \rightarrow 1.1$$

حيث إن :

حاصل ضرب الكسب فى عرض حزمة الترددات	GBW
كسب الجهد	Av
عرض حزمة الترددات	BW

والشكل (١ – ٩) يعرض العلاقة بين كسب الجهد الفرقى والتردد لمكبر عمليات 741 .



الشكل (١ – ٩)

١ / ٤ / ٤ – نسبة استبعاد النمط العام Common mode rejection ratio

لنسبة استبعاد النمط العام CMRR عدة تعريفات لعل أيسرها يفهم من المعادلة 1.2 .

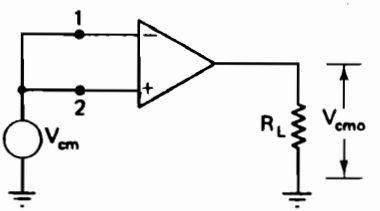
$$CMRR = \frac{Av}{Acm} \rightarrow 1.2$$

حيث إن :

Av معامل كسب الجهد للحلقة المغلقة

Acm معامل كسب النمط العام

والشكل (١ – ١٠) يبين طريقة تعيين معامل كسب النمط العام Acm .



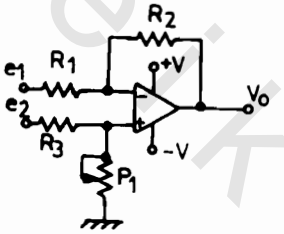
الشكل (١ – ١٠)

$$Acm = \frac{Vcmo}{Vcm} \rightarrow 1.3$$

وعادة فإن Acm تكون أقل كثيراً من الواحد .

أما معامل كسب الحلقة المغلقة فيختلف طريقة الحصول عليه تبعًا لطريقة توصيل مكبر العمليات كما سيتضح فيما بعد والشكل (١- ١١) يوضح طريقة تحسين نسبة استبعاد النمط العام .

حيث إن :



الشكل (١ - ١١)

R_1, R_2, R_3	مقاومة كربونية 100 K Ω
P_1	مقاومة متغيرة 100 K Ω

فعندما يكون $e_1=e_2$ فإن الخرج يكون قريبا من الصفر، وذلك بضبط P_1 . وكلما ازدادت قيمة CMRR؛ دل على جودة المكبر، وأحيانا تعين CMRR بالديسيبل (dB) . وذلك من المعادلة 1.4

$$CMRR = 20 \text{ Log } \frac{Av}{Acm} \rightarrow 1.4$$

١ / ٤ / ٥ - إزالة الحيود الناتج عن تيار الدخل الانحيازى

Offset due to input bias Current

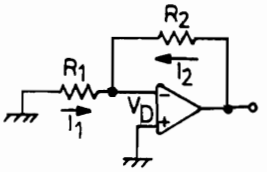
نظراً لأن مكبرات العمليات تتكون من مجموعة من الترانزستورات ونظراً لأن هذه الترانزستورات تحتاج لتيارات دخل حتى تعمل وتتراوح تيارات الدخل ما بين (80: 500 nA) . ففى حالة عدم تواجد إشارة دخل فإن تيارات الدخل الصغيرة يمكن أن تولد فرق جهد Vo بين المدخل العاكس وغير العاكس لمكبر العمليات؛ وينتج عن ذلك جهد خرج كبير كما هو مبين بالشكل (١ - ١٢) .

حيث إن : جهد الخرج Vo يساوى :

$$Vo = I_1 R_1 \rightarrow 1.5$$

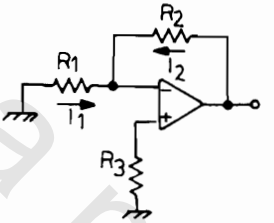
وحتى نزيل الحيود الناتج فى الخرج نتيجة لتيار الدخل الانحيازى توصل مقاومة R3 بين المدخل غير العاكس والأرضى كما هو مبين بالشكل (١ – ١٣).

وتعين المقاومة R3 من المعادلة 1.6



الشكل (١ – ١٢)

$$R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \rightarrow 1.6$$



الشكل (١ – ١٣)

١ / ٤ / ٦ – جهد الدخل المزيل للحيود Input Offset Voltage

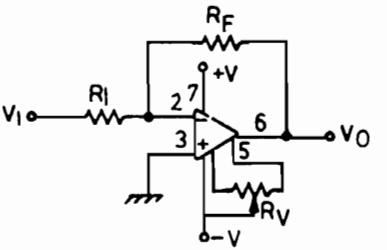
بعد عمل الترتيبات اللازمة لإزالة حيود الخرج الناتج عن تيار الدخل الانحيازى ستشعر أنه مازال هناك حيود فى الخرج عندما يكون دخله مساويًا الصفر يصل إلى الملى ڤولت، والسبب فى ذلك عدم التوافق الجيد بين الترانزستورات التى يبنى منها مكبر العمليات فى مرحلة الدخل.

والجدير بالذكر أن بعض مكبرات العمليات مثل: 741 تزود برجلين إضافيين لإزالة حيود الدخل المستمر بالطريقة المبينة بالشكل (١ – ١٤).

ويلاحظ أن مكبر العمليات 741 مزود بالأرجل1,5 لإزالة الحيود، وذلك بواسطة مقاومة متغيرة RV1 توصل بينهما وتغذى النقطة المنزلقة للمقاومة المتغيرة مع الجهد

obeikandl.com

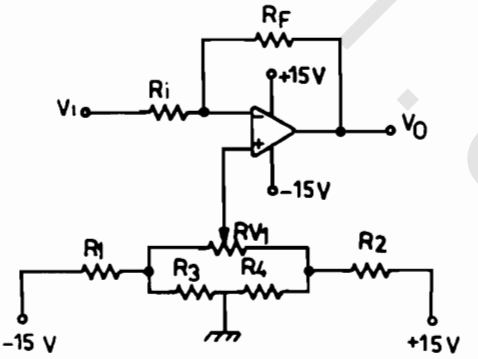
السالب V- للمصدر الكهربى.



الشكل (١ – ١٤)

أما فى حالة مكبرات العمليات غير المزودة بأرجل لإزالة الحيود مثل المكبر 709 فيتم إزالة الحيود فيها بالطريقة المبينة بالشكل (١ – ١٥).

فبواسطة المقاومة المتغيرة RV1 يمكن الوصول إلى خرج مساويًا الصفر عندما يكون الدخل مساويًا الصفر. وتصل قيمة الجهد الذى يجب تسليطه على الرجل غير العاكسة (1: 15 mV) وذلك لإزالة حيود الخرج.



الشكل (١ – ١٥)

١ / ٤ / ٧ – معدل الإمالة Slew rate

ويعرف على أنه سرعة تغير جهد الخرج المقابل لموجة مربعة عندما تكون مقاومة الحمل 2KΩ ووحدتها (V/S) أو (V/μS).

وتتراوح ما بين (0.2V/μS : 20V/μS). ويسبب معدل الإمالة مشاكل فى حالة الموجات العريضة الاتساع (التى لها زمن دورى كبير) ويعين معدل الإمالة SR من المعادلة 1.7 من

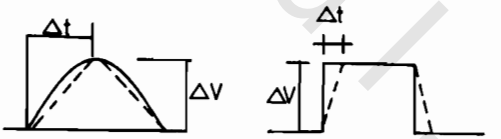
$$SR = \frac{\Delta Vo}{\Delta t} \rightarrow 1.7$$

حيث إن:

ΔVo التغير فى جهد الخرج الحادث فى زمن Δt

Δt التغير فى الزمن

والشكل (١ – ١٦) يبين التشويه الحادث فى موجة مربعة (الشكل أ) وموجة جيبية (الشكل ب)؛ علماً بأن المنحنيات المنقطة تبين الخرج المشوه والناتج عن معدل الإمالة المنخفض.



الشكل (١ – ١٦)

١ / ٥ – مصطلحات فنية شائعة الاستخدام

١ – **كسب الجهد للحلقة المفتوحة Avo**: وهى النسبة بين جهد الخرج وجهد الدخل فى حالة عدم وجود تغذية مرتدة وتصل هذه القيمة إلى 100000 وتتغير من مكبر لآخر.

obeikandl.com

٢ - **كسب الجهد للحلقة المغلقة Avc** : وهو النسبة بين جهد الخرج وجهد الدخل فى حالة وجود تغذية مرتدة وتتراوح هذه النسبة بين 1000 : 1 وهى تعتمد على قيم عناصر التغذية المرتدة.

٣ - **مقاومة الدخل Ri** : وهى المقاومة بين المدخلين والأرضى.

٤ - **مقاومة الخرج Ro** : وهى المقاومة بين الخرج والأرضى.

٥ - **جهد الدخل الملاشى للحيود Vio (Input offset voltage drift)** : وهو الجهد الواجب تطبيقه بين المدخلين للحصول على خرج صفرى.

٦ - **تيار الدخل الملاشى للحيود Iio (Input offset current)** : وهو الفرق بين تيارات المدخلين عندما يكون الخرج فى حالة جهد صفرى.

٧ - **تيار الدخل الانحيازى Iib (Input bias current)** : وهو متوسط تيارات المدخلين عندما يكون الخرج فى حالة جهد صفرى.

٨ - **جهد الدخل التفاضلى Vid (Differential Input voltage)** : وهو فرق الجهد الأقصى المسموح به بين المدخلين العاكس وغير العاكس.

٩ - **زمن الاستجابة Tr (Response Time)** : وهو الزمن اللازم لتغيير جهد الخرج من النسبة 10% إلى 90% من القيمة العظمى لجهد الخرج.

١٠ - المستوى العالى لجهد الخرج Voh.

١١ - المستوى المنخفض لجهد الخرج Vol.

١٢ - المستوى العالى لتيار الخرج Ioh.

١٣ - المستوى المنخفض لتيار الخرج Iol.

١٤ - تيار التغذية Icc.

١٥ - جهد التغذية Vcc.

١٦ - عرض حزمة الترددات عند كسب الوحدة GBW ويساوى حاصل ضرب الكسب فى عرض حزمة الترددات.

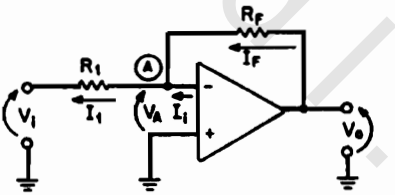
١ / ٦ - الدوائر الأساسية لمكبرات العمليات

حيث إن: معامل تكبير الحلقة المفتوحة Avo لمكبرات العمليات يكون كبيراً ويصل إلى 200000؛ لذا فإن مكبرات العمليات عادة لا تستخدم فى الحلقات المفتوحة، ولكن تستخدم فى حلقات مغلقة Closed Loop، ولكى يكون المكبر فى حالة استقرار فإن هذا الغلق يتم بواسطة تغذية خلفية سالبة Negative Feed back، وذلك من المخرج إلى المدخل العاكس، ويوجد عدة دوائر أساسية لمكبرات العمليات سنتناولها فى الفقرات التالية.

١ / ٦ / ١ - دائرة المكبر العاكس Inverting amplifier

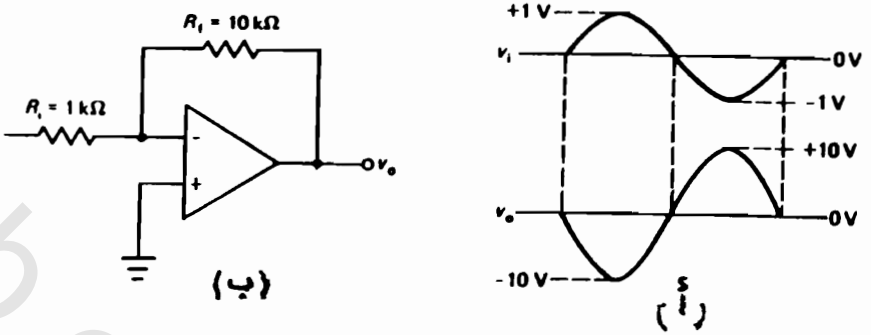
الشكل (١ - ١٧) يعرض دائرة مكبر عاكس وتسمى المقاومة R_F بمقاومة التغذية الخلفية أما المقاومة R_1 فهى مقاومة توالى وتوصل بين المدخل السالب (-) للمكبر وإشارة الدخل المطلوب تكبيرها، ونحصل على معامل كسب الجهد Av من المعادلة 1.8 :

$$Av = \frac{Vo}{Vl} = \frac{-R_F}{R_1} \quad \rightarrow 1.8$$



الشكل (١ - ١٧)

ولمزيد من الإيضاح إليك المثال الموضح بالشكل (١ - ١٨)



الشكل (١ – ١٨)

فإذا كانت إشارة الدخل Vi عبارة عن موجة جيبية قيمتها العظمى 1V+ فإن إشارة الخرج Vo ستكون موجة جيبية أيضاً بإزاحة 180° وقيمتها العظمى 10V .

حيث إن :

$$Vo = \frac{-RF}{RI} \quad Vi$$

$$= \frac{-10}{1} \times 1 = -10V$$

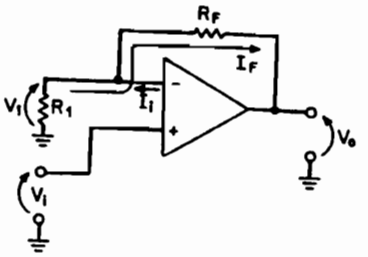
ويجب ملاحظة أن جهد الخرج Vo فى هذه الحالة لا يمكن أن يتعدى جهد مصدر القدرة، فإذا كان جهد مصدر القدرة 15V± فإن جهد الخرج لن يتعدى 15V± لأن المكبر سيكون فى حالة تشبع.

١ / ٦ / ٢ – دائرة المكبر غير العاكس Non Inverting Amplifier

الشكل (١ – ١٩) يعرض دائرة مكبر غير عاكس، ويلاحظ أن إشارة الدخل يسمح لها بالدخول على المدخل غير العاكس للمكبر (+) .

وفيما يلى معادلة كسب الجهد للمكبر غير العاكس :

$$Av = \frac{Vo}{Vi} = 1 + \frac{RF}{RI} \rightarrow 1.9$$



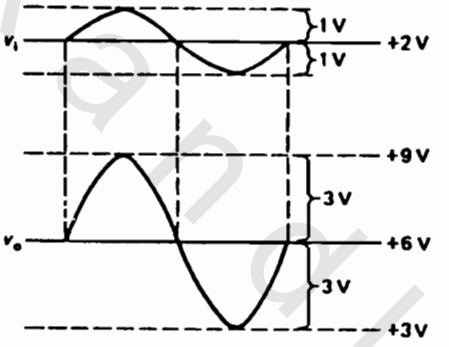
الشكل (١ – ١٩)

فإذا كان : $R_1 = 10K\Omega$, $R_F = 20K\Omega$ ودخلت موجة جيبية على المدخل غير العاكس، وكانت القيمة العظمى لها تساوى 1V± فإن القيمة العظمى لجهد الخرج يساوى :

$$Vo = Av\ Vi = (1 + \frac{R_F}{R_1})\ Vi$$

$$= (1 + \frac{20}{10}) \pm 1 = \pm 3V$$

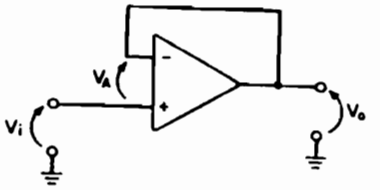
والشكل (١ – ٢٠) يبين العلاقة بين Vi مع الزمن، وكذلك Vo مع الزمن فى هذه الحالة ويلاحظ أنه لا يوجد إزاحة وجهية بين Vi و Vo .



الشكل (١ – ٢٠)

١ / ٦ / ٣ – دائرة مكبر الوحدة Unity Follower

الشكل (١ – ٢١) يعرض دائرة مكبر وحدة غير عاكس، ويتميز مكبر الوحدة بأنه جهد خرجه Vo مساوٍ تقريباً لجهد الدخل Vi فى القيمة والقطبية، لذلك سمى مكبر الوحدة ويستخدم مكبر الوحدة عادة فى العزل. **وفيما يلى معادلة كسب الجهد لمكبر الوحدة :**



الشكل (١ – ٢١)

$$Av = \frac{Vo}{Vi} = 1 \rightarrow 1.10$$

١ / ٦ / ٤ - دائرة المكبر الجامع والعاكس The summing Op. Amp.

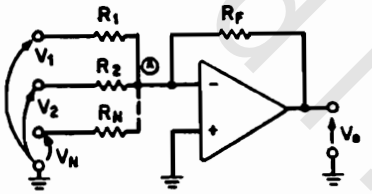
يعتبر المكبر الجامع العاكس هو أحد تطبيقات المكبر العاكس، ويجرى المكبر الجامع عملية جمع لجهود الدخول المختلفة، ولكن مع عكس الإشارة.

والشكل (١ - ٢٢) يعرض دائرة جامع عاكس بثلاثة مداخل فقط وبالطبع يمكن زيادة عدد المداخل حسب الاستخدام لأى عدد من المداخل، أو نحصل على قيمة جهد الخرج لهذه الدائرة من المعادلة 1.11

$$Vo = -\left(\frac{RF}{R1} V1 + \frac{RF}{R2} V2 + \frac{RF}{R3} V3\right) \rightarrow 1.11$$

فإذا كانت : $R1 = R2 = R3 = RF$

تصبح $Vo = -(V1 + V2 + V3)$



الشكل (١ - ٢٢)

مثال :

إذا كان قيم المقاومات كما يلى $R1 = R2 = R3 = RF = 10K\Omega$

وكانت جهود الدخل كالآتى : $V1 = 5V , V2 = 6V , V3 = 8V$

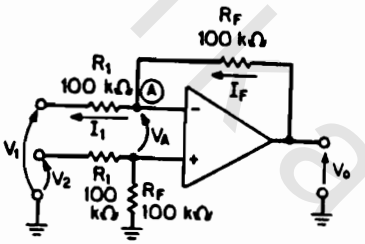
فإن جهد الخرج سيساوى : $Vo = - (5 + 6 + 8) - 19V$

فإذا كان جهد مصدر القدرة مساوياً $\pm 15V$ فإن المكبر سوف يتشبع، وبالتالى يصبح مساوياً جهد التشبع Vsat - والذى يساوى 13V - فى هذه الحالة.

١ / ٦ / ٥ - دائرة المكبر الفرقى The Differential Amplifier

فى الدوائر السابقة لاحظنا أن الإشارة الداخلة تدخل على أحد طرفى الدخل لمكبر العمليات، أما إذا سمح لإشارتى دخل الدخول معاً على مدخلى مكبر العمليات يسمى المكبر فى هذه الحالة بالمكبر الفرقى (المكبر الطارح).

والشكل (١ - ٢٣) يعرض دائرة المكبر الفرقى ويمكن الحصول على قيمة جهد الخرج Vo للمكبر الفرقى من المعادلة 1.12 :



الشكل (١ - ٢٣)

$$Vo = \frac{RF}{R1} (V2 - V1) \rightarrow 1.12$$

والجدير بالذكر أن المقاومة الموصلة بين المدخل غير العاكس والأرضى تقوم بضبط أى حيود للخرج عن الصفر فى حالة تساوى الجهدين V2 و V1 أو مساواتهما للصفر.

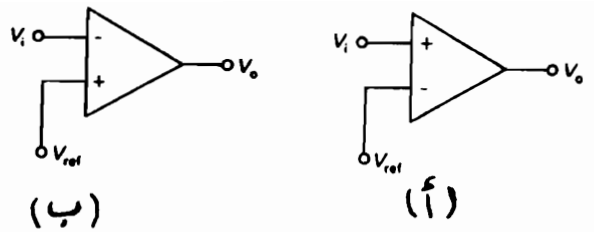
١ / ٦ / ٦ - دائرة مقارن الجهد Voltage comparator

يوجد نوعان من دوائر مقارنات الجهد وهما :

١ - دائرة مقارن الجهد العاكس.

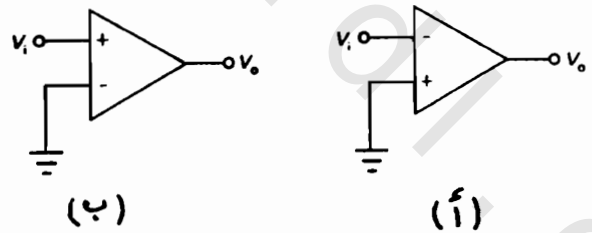
٢ - دائرة مقارن الجهد غير العاكس.

والشكل (١ - ٢٤) يعرض مقارن جهد بسيط غير عاكس (أ) ومقارن جهد بسيط غير عاكس (ب) ويسمى المقارن بمقارن عاكس عند دخول إشارة الجهد على المدخل العاكس، فى حين يسمى بمقارن غير عاكس عند دخول إشارة الجهد على المدخل غير العاكس.



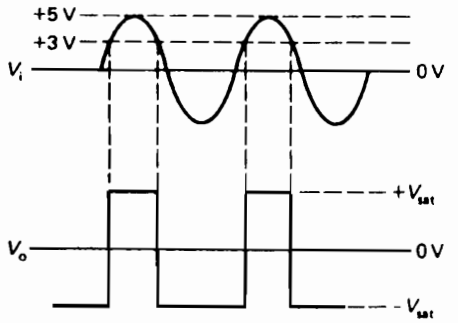
الشكل (١ – ٢٤)

حيث إن: معامل الكسب لمكبر العمليات التى يعمل فى حلقة مفتوحة كما هو الحال فى المقارن كبير جداً؛ لذا فإن جهد إشارة بالملى ڤولت يكفى لتشبع المكبر؛ لذا فإن خرج مقارن الجهد دائماً جهد التشبع موجباً أو سالباً Vsat±، وفى حالة قيام المقارن بمقارنة إشارة جهد مع 0V (جهد الأرضى) فإنه يسمى بكاشف عبور الصفر Zero crossing detector، كما بالشكل (١ – ٢٥)، حيث يتغير حالة خرج المقارن عند عبور جهد الدخل بالصفر، فإذا افترضنا أن مقارن غير عاكس يقارن موجة جيبية جهدها الأقصى 5V بجهد أساس مستمر يساوى 3V+.



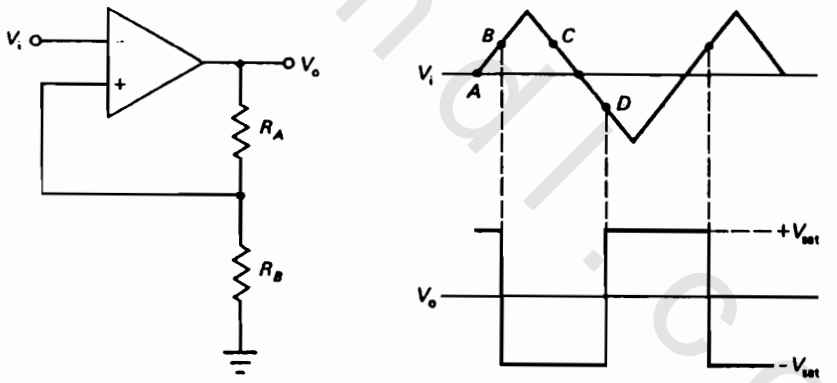
الشكل (١ – ٢٥)

فإذا افترضنا أن مقارن غير عاكس يقارن موجة جيبية جهدها الأقصى 5V مع جهد أساس مستمر يساوى 3V+ فإن شكل موجة الدخل وموجة الخرج المتوقع موضحة بالشكل (١ – ٢٦)، ويلاحظ أنه عندما يكون جهد الدخل أكبر من 3V+ فإن خرج المقارن يكون مساوياً Vsat+، وعندما يكون جهد الدخل أصغر من 3V+ فإن خرج المقارن يكون مساوياً Vsat -؛ علماً بأن Vsat تساوى 13V± تقريباً عندما يكون جهد مصدر القدرة 15V±.



الشكل (١ – ٢٦)

ويوجد نوعاً آخر من دوائر المقارنات تسمى بدوائر المقارنات ذات الرجوعية وتستخدم هذه المقارنات فى المنظم ذا الموضعين Two position controllers، والشكل (١ – ٢٧) يعرض دائرة مقارن برجوعية وشكل الموجة الخارجة Vo عندما تكون الموجة الداخلة Vi على شكل أسنان منشار.



الشكل (١ – ٢٧)

والمقصود بالرجوعية هو اعتماد خرج الدائرة على الحالة السابقة للدخل. فكما هو واضح أن خرج المقارن يكون مشبعاً موجباً فى المنطقة بين النقطتين A, B وتماماً كالحالة السابقة للمقارن فى حين يتحول خرج المقارن ليصبح مشبعاً سالباً بعد النقطة B ويظل الخرج مشبعاً سالباً فى المنطقة C, D اعتماداً على الحالة

السابقة وهكذا.

ويمكن تحديدحدود الرجوعية من المعادلة 1.13 :

$$Vref = \frac{R_B}{R_A + R_B} (\pm Vsat) \rightarrow 1.13$$

حيث إن :

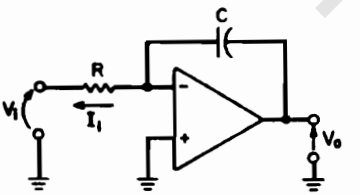
Vref جهد الأساس وهو جهد النقطة B أو النقطة A

Vsat جهد التشبع لمكبر العمليات

١ / ٦ / ٧ - دائرة المكبر المكامل Integrator

تعرف عملية التكامل بأنها جمع قيم إشارات الدخل خلال فترة زمنية معينة، والشكل (١ - ٢٨) يعرض دائرة مكبر مكامل وهى تشبه دائرة المكبر العاكس عدا أن مقاومة التغذية الخلفية R_F فى المكبر العاكس استبدلت بالمكثف C والمعادلة 1.14 تعرف العملية التى تجريها هذه الدائرة :

$$Vo = \frac{-1}{RC} \int_{o}^{t} Vi\, dt \rightarrow 1.14$$



الشكل (١ - ٢٨)

وعادة توصل مقاومة بالتوازى مع مكثف دائرة المكامل للأسباب التالية :

١ - منع المكبر من تكامل الجهود المستمرة حتى ولو كانت صغيرة والتى قد تؤدى لفقدان الدائرة لصفة التكامل.

٢ – المحافظة على معامل كسب لا يقل عن $\left(\frac{R_A}{R_1}\right)$ عند الترددات المنخفضة.

حيث إن:

R_A هى قيمة المقاومة الموصلة بالمكثف على التوازى، أما R_1 فهى مقاومة الدخل.

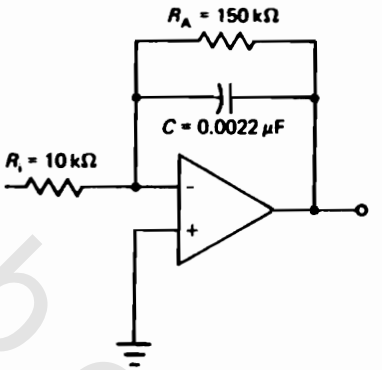
والشكل (١ – ٢٩) يبين دائرة مكامل (أ) وشكل موجة الدخل والخرج عندما تكون موجة الدخل مربعة (ب)، وعندما تكون موجة الدخل جيبية (جـ).

ويلاحظ أن الموجة المربعة عند تكاملها تتحول لموجة مثلثة أما الموجة الجيبية عند تكاملها تكون جيبية؛ ولكن بإزاحة 90° جهة اليسار؛ علماً بأن جهد الخرج الأقصى للمكامل عندما يكون دخله موجة جيبية يساوى:

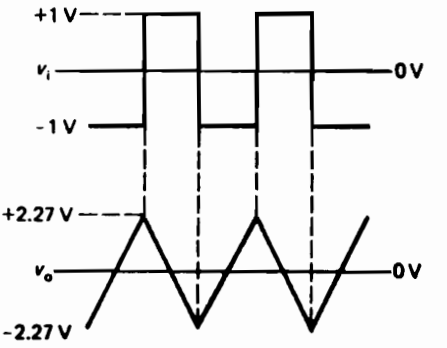
$$V_{o\,(PK)} = \frac{V_{i\,(PK)}}{2\pi F R_i C} \rightarrow 1.15$$

حيث إن:

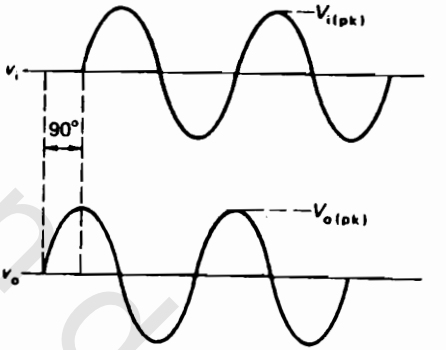
جهد الخرج الأقصى	$V_{o\,(PK)}$
جهد الدخل الأقصى	$V_{i\,(PK)}$
تردد موجة الدخل	F
النسبة التقريبية	π



أ



ب



جـ

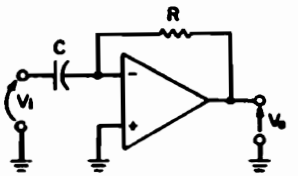
الشكل (١ – ٢٩)

١ / ٦ / ٨ – دائرة المكبر المفاضل The differentiator

الشكل (١ – ٣٠) يعرض دائرة المكبر المفاضل وهى تشبه دائرة المكبر المكامل مع تبديل وضع المكثف والمقاومة، والمعادلة 1.15 تعرف العملية التى تجريها هذه الدائرة:

$$Vo = -RC \frac{dvi}{dt} \quad \rightarrow 1.15$$

وعادة توصل مقاومة Rs على التوالى مع المكثف C للمحافظة على الكسب فى الترددات العالية



الشكل (١ – ٣٠)

مساوياً $\frac{-R}{Rs}$.

والشكل (١ – ٣١) يبين دائرة مكبر مفاضل عملية وشكل الموجة الداخلة والخارجة فى حالتين:

١ – عندما تكون الموجة الداخلة جيبية . ٢ – عندما تكون الموجة الداخلة مربعة .

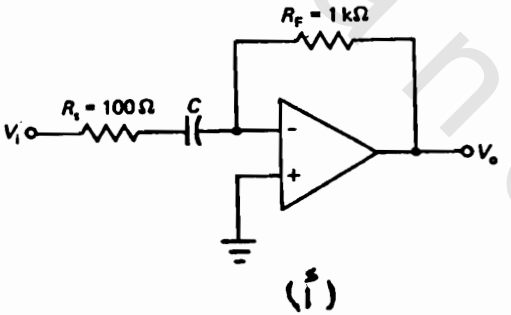
ويلاحظ أن الموجة الجيبية عند تفاضلها تكون جيبية ولكن بإزاحة 90° جهة اليمين، علماً بأن جهد الخرج الأقصى للمفاضل عندما يكون دخله موجة جيبية نحصل عليه من المعادلة 1.16 :

$$Vo\,(PK) = 2\,\pi\,FR_F\,CVi\,(PK) \rightarrow \quad 1.16$$

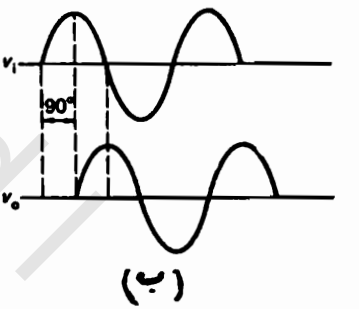
حيث إن :

جهد الخرج الأقصى	$Vo\,(PK)$	تردد الموجة الداخلة	F
جهد الدخل الأقصى	$Vi\,(PK)$	النسبة التقريبية	π

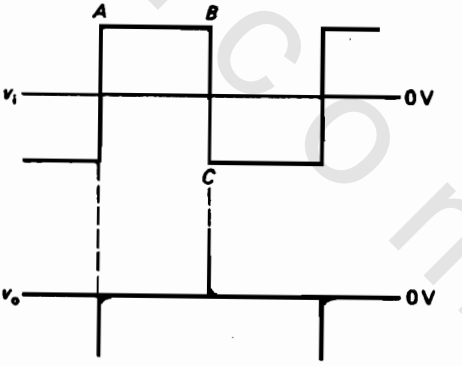
فى حين أن الموجة المربعة عند تفاضلها تتحول لنبضات موجبة ونبضات سالبة .



(أ)



(ب)

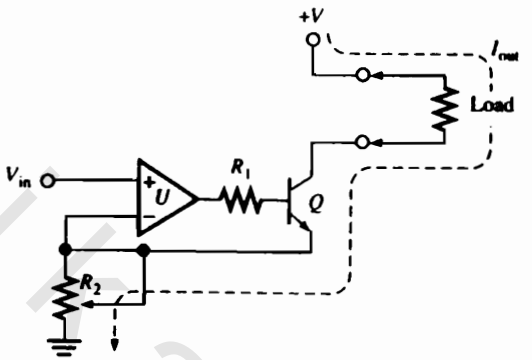


(جـ)

الشكل (١ – ٣١)

١ / ٦ / ٩ - دائرة محول الجهد لتيار

من المعلوم أن مكبرات العمليات هى مكبرات جهد وأكثر هذه المكبرات تكون لها خرج تيار محدد الأمر الذى جعلنا نحتاج إلى طريقة لتحويل الجهد لتيار، والشكل (١ - ٣٢) يبين دائرة محول جهد لتيار باستخدام مكبر عمليات.



الشكل (١ - ٣٢)

وهذه الدائرة تعطى تيار خرج يتناسب مع جهد الدخل، وعند التدقيق فى هذه الدائرة نجد أنها دائرة مكبر عاكس، حيث يتحكم جهد خرج المكبر فى الترانزستور Q، فكلما زاد جهد الخرج ازداد تيار مجمع الترانزستور Q. ويصل المكبر لحالة الاتزان عندما يكون الجهد الواقع على الرجل العاكسة (-) يساوى جهد الدخل على الرجل غير العاكسة، أى عندما يكون:

$$Vin = Iout\ R2$$

وبالتالى نحصل على قيمة تيار الخرج من المعادلة 1.17:

$$Iout = \frac{Vin}{R2} \rightarrow 1.17$$

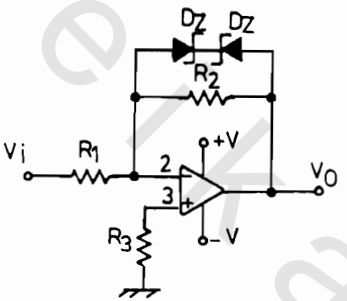
ويمكن التحكم فى شدة تيار الخرج المقابل لجهد الدخل بالتحكم فى قيمة المقاومة R2، ويجب اختيار R1 بحيث تكون كافية لتحديد تيار قاعدة الترانزستور.

والجدير بالذكر أن الترانزستور Q يعمل على زيادة مستوى تيار خرج المكبر، ولذلك يختار بحيث يكون قادراً على حمل التيار المطلوب، كما يجب أن يكون الجهد V+ كافياً لإمرار التيار المطلوب، فإذا كان التيار المطلوب 2mA ومقاومة الحمل 20KΩ فإن الجهد V+ يجب أن يكون أكبر من 40V.

١ / ٦ / ١٠ - دائرة مكبر القص Clipping

الشكل (١ - ٣٣) يعرض دائرة مكبر القص، حيث يعمل مكبر العمليات كمكبر عاكس بطريقة طبيعية إذا كان جهد الخرج Vo يحقق العلاقة 1.18 :

$$Vo < (Vz + 0.7) \rightarrow 1.18$$



الشكل (١ - ٣٣)

أى أن جهد الخرج يجب أن يكون أقل من جهد موحد الزينر مضافاً إليه 0.7V، أما إذا كان جهد الخرج لا يحقق العلاقة 1.18، فإن التغذية المرتدة السالبة تزداد بسرعة، ولا تتعدى القيمة القصوى للخرج (Vz+0.7V)±، والمعادلة 1.19 تعرف عمل دائرة مكبر القص إذا تحققت العلاقة 1.18 :

$$Av = \frac{Vo}{Vi} = \frac{R2}{R1} \rightarrow 1.19$$

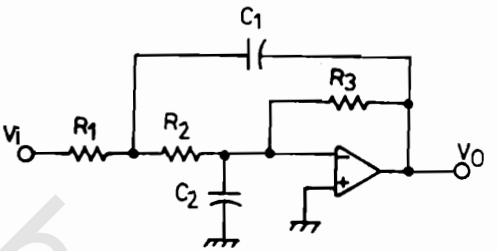
١ / ٧ - المرشحات الفعالة Active Filter

تبنى المرشحات الفعالة بمكبرات العمليات وذلك بعمل تغذية مرتدة موجبة وتغذية مرتدة سالبة، **ويوجد عدة أنواع من هذه المرشحات وهم كما يلى :**

١ - مرشح تمرير الترددات المنخفضة Active low pass Filter :

الشكل (١ - ٣٤) يعرض دائرة مرشح تمرير الترددات المنخفضة ويقوم هذا المرشح بتمرير الترددات التى تتراوح ما بين (0:Fc)، حيث إن Fc هو تردد القطع ويعين من المعادلة 1.20 :

$$Fc = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \rightarrow 1.20$$



علماً بأن قيمة المقاومة R3 تساوى مجموع قيم المقاومتين R1 , R2، ويكون جهد الخرج ثابتاً وصولاً لتردد القطع Fc عنده ينخفض جهد الخرج إلى 0.707 من القيمة العظمى للخرج.

الشكل (١ – ٣٤)

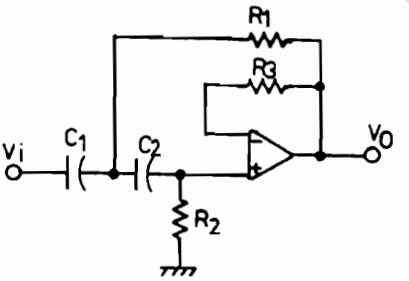
٢ – مرشح تمرير الترددات العالية Active high pass Filter :

الشكل (١ – ٣٥) يعرض دائرة مرشح تمرير الترددات العالية الفعال ويقوم هذا المرشح بإمرار الترددات الأكبر من Fc (تردد القطع)، والذى يمكن تعيينه من المعادلة 1.21 :

$$Fc = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \rightarrow 1.21$$

ويجب أن يكون :

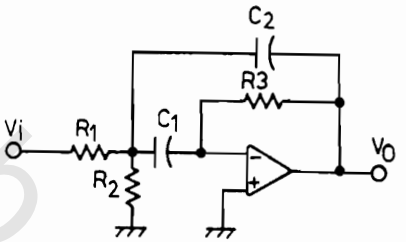
$$C_1 = C_2 \ , R_2 = 2R_1 \ , R_3 = R_2$$



الشكل (١ – ٣٥)

٣ - مرشح تمرير الحزمة الفعال Active band pass Filter :

الشكل (١ - ٣٦) يعرض دائرة مرشح تمرير الحزمة الفعال ويسمح هذا المرشح بتمرير مجموعة محددة من الترددات فى حين يمنع مرور باقى الترددات، ويكون خرج هذا المرشح أكبر ما يمكن عند تردد الرنين Fr والذى يعين من المعادلة 1.22 :



الشكل (١ - ٣٦)

$$Fr = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_P R_3 C_1 C_2}} \rightarrow 1.22$$

وتعين المقاومة R_P من المعادلة 1.23 :

$$R_P = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \rightarrow 1.23$$

ويعين عرض حزمة الترددات التى تمر فى هذا المرشح BW من المعادلة 1.24 :

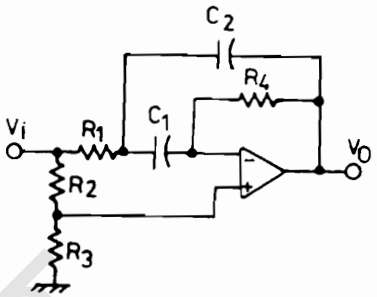
$$BW = \frac{Fr}{Q} \rightarrow 1.24$$

ويعين عامل الجودة Q من المعادلة 1.25 إذا كان $C_1 = C_2$:

$$Q = 0.5\sqrt{\frac{R_3}{R_P}} \rightarrow 1.25$$

٤ - مرشح رفض حزمة فعال Active band Reject Filter :

الشكل (١ - ٣٧) يعرض دائرة رفض حزمة فعال ويقوم هذا المرشح بإمرار كل الترددات عدا حزمة من الترددات يعين عرضها BW من المعادلة 1.26 :



الشكل (١ – ٣٧)

$$BW = \frac{Fr}{Q} \rightarrow 1.26$$

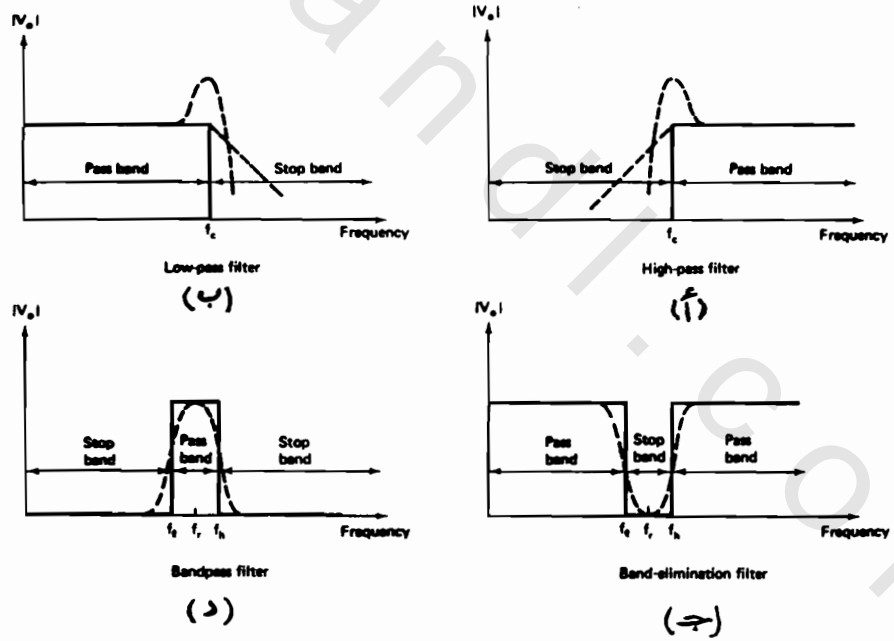
ويعين تردد الرنين Fr من المعادلة 1.27 :

$$Fr = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \rightarrow 1.27$$

ويعين عامل الجودة Q من المعادلة 1.28 :

$$Q = 0.5\sqrt{\frac{R_4}{R_1}} \rightarrow 1.28$$

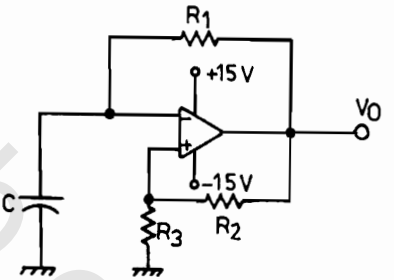
والشكل (١ – ٣٨) يعرض العلاقة بين جهد الخرج output والتردد Frequency للأنواع المختلفة للمرشحات .



الشكل (١ – ٣٨)

١ / ٨ - المذبذبات المرتكزة على مكبرات العمليات

أولاً: مولدات الموجة المربعة



الشكل (١ - ٣٩)

الشكل (١ - ٣٩) يعرض دائرة مولد موجة مربعة. ويعمل المكبر A كمكبر فرقي، فعند توصيل التيار الكهربى للدائرة يكون جهد المدخل العاكس (-) فى بادئ الأمر 0V ويكون جهد المدخل غير العاكس (+) أعلى من (0V)؛ نتيجة لمرور التيار الانحيازى عبر المقاومة R3 فيصبح خرج المكبر +Vsat (جهد التشبع الموجب) ويبدأ المكثف فى الشحن عبر المقاومة R1 ويصبح جهد المدخل غير العاكس (+) مساوياً جهد العتبة VT والذى يساوى:

$$V_T = +V_{sat} \left(\frac{R_3}{R_2 + R_3} \right) \rightarrow 1.29$$

وعندما يصبح جهد المدخل العاكس (-) أكبر من جهد المدخل غير العاكس (-) والذى يساوى جهد العتبة VT فى هذه الحالة يصبح خرج المكبر Vsat - وتباعاً يصبح جهد المدخل غير العاكس مساويا VT-، ويبدأ المكثف C فى تفريغ شحنته ثم الشحن فى الاتجاه المعاكس وعند وصول الجهد على المكثف أقل من VT- يصبح خرج المكبر +Vsat، وتتكرر دورة التشغيل ونحصل على تردد الخرج من المعادلة 1.30 :

$$F = \frac{1}{2 R_1 C} \rightarrow 1.30$$

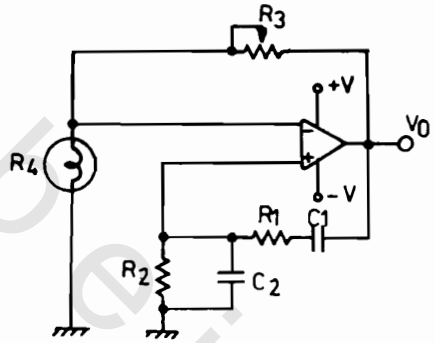
وذلك عندما يكون $R_3 = 0.86\ R_2$.

علما بأن جهد التشبع Vsat يساوى تقريباً 13V عندما جهد المصدر الكهربى +15V ويمكن الحصول على موجة مثلثة بإدخال الموجة المربعة الخارجة من هذا

المذبذب على مكامل كما بالشكل (١ – ٢٩).

ثانيا : مولدات الموجات الجيبية

سنتناول فى هذه الفقرة مذبذب قنطرة وين ، والذى يرتكز على مكبر عمليات، وذلك لتوليد مدى واسع من الموجات الجيبية، وبالشكل (١ – ٤٠) مذبذب قنطرة وين Wien، فتشكل المقاومات R4 , R3 ذراعين من قنطرة وين، فى حين أن الذراع الثالث يتشكل بواسطة C1 , R1 والذراع الرابع يتشكل بواسطة C2 , R2 وتوفر المقاومات R3 R4 , مسار التغذية المرتدة السالبة فى جميع الترددات فى حين أن C2 , R2 , C1 , R1 توفر مسار التغذية المرتدة الموجبة.



الشكل (١ – ٤٠)

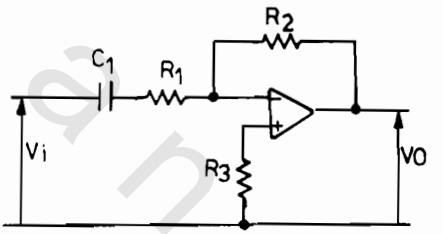
والجدير بالذكر أن R4 عادة تكون مصباحاً متوهجاً للمحافظة على جهد خرج ثابت، وذلك لأن المصباح ذ ف الفتيلة (المتوهج) له مقاومة لها معامل حرارى موجب PTC، أى أن مقاومته تزداد كلما ازدادت درجة الحرارة، فكلما ازداد جهد الخرج زادت مقاومة المصباح (لارتفاع درجة حرارتها) فيزداد جهد التغذية المرتدة السالبة فيقل جهد الخرج والعكس بالعكس، ويعين تردد الدائرة من المعادلة 1.31 :

$$F = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \rightarrow 1.31$$

ويمكن التحكم فى قيمة جهد الخرج بواسطة المقاومة المتغيرة R3، وهناك مشكلة فى تنفيذ هذه الدائرة، وهو أن المصباح ذو الفتيلة R4 يكو ذو قدرة عالية؛ وحيث أن معظم مكبرات العمليات غير قادرة لتشغيل هذا المصباح، لذلك يوجد بعض التقنيات للتغلب على هذه المشكلة سنتعرض لها فى بعض التطبيقات.

١ / ٩ - تشغيل مكبرات العمليات فى دوائر التيار المتردد

فى جميع الدوائر التى تناولناها فى الفقرات السابقة لمكبرات العمليات كانت إشارة الدخل تدخل مباشرة على مداخل مكبرات العمليات، وهذا يجعل هذه الدوائر تعمل عند ترددات تصل إلى الصفر (أى مع التيار المستمر)، ولكن ذلك ليس مرغوباً فى بعض التطبيقات عند دخول إشارة مترددة محملة على جهد مستمر، فى مثل هذه التطبيقات يمكن توصيل مكثف ذات قيمة مناسبة على التوالى مع مدخل المكبر كما هو مبين بالشكل (١ - ٤١). وينبغى اختيار هذا المكثف بحيث تكون معاوقته أصغر بكثير من مقاومة الدخل للمكبر عند التردد الأدنى المسلط على المدخل.



الشكل (١ - ٤١)

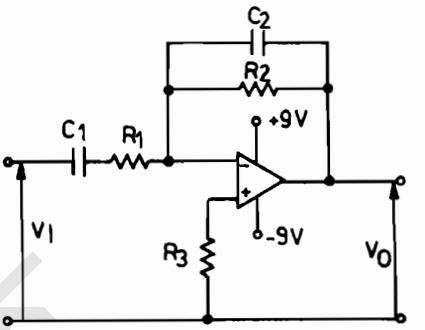
والجدير بالذكر أنه فى دوائر المكبرات غير العاكسة فإن مقاومة الدخل تكون عالية جداً؛ لذلك فإن مكثفاً غير الكتروليتى سعته 100nF يكون ملائم جداً. أما فى حالة دوائر مكبرات العاكسة والتى لها مقاومة دخل أقل بكثير فينبغى اختيار مكثفات لها سعات أكبر من 100nF، والشكل (١ - ٤٢) يعرض دائرة مكبر عاكس يستخدم فى دوائر التيار المتردد.

ويعين تردد القطع الأدنى FCL من المعادلة 1.32 :

$$Fcl = \frac{1}{2\pi\ C_1\ R_1}\ (HZ)\ \rightarrow\ 1.32$$

ويعين تردد القطع الأقصى FCH من المعادلة 1.33 :

$$FCH = \frac{1}{2\pi\ C_2\ R_2}\ (HZ) \rightarrow 1.33$$



الشكل (١ – ٤٢)

فعند استخدام العناصر التالية :

مقاومة كربونية 10KΩ	R1
مقاومة كربونية 100KΩ	R2
مقاومة كربونية 9.1KΩ	R3
مكثف بوليستر 150nF	C1
مكثف بوليستر 330pF	C2
دائرة متكاملة طراز TLO81	A

فإن تردد القطع الأقصى سيساوى 5KHZ وتردد القطع الأدنى سيساوى 100HZ .

ويكون معامل الكسب مساوياً :

$$Av = \frac{R_2}{R_1} = \frac{100}{10} = 10$$

ويكون معامل الكسب بالديسيبل مساوياً :

$$Av = 20 \log \frac{R_2}{R_1} = 20dB$$

ومقاومة الدخل تساوى R1 أى 10KΩ .

أى أن هذه الدائرة ستقوم بتكبير إشارات الجهد التى ترددها بتراوح ما بين (100HZ : 5KHZ) بمعامل كسب 20dB وخارج هذه الحدود لن تعمل هذه الدائرة، علماً بأن الكسب عند ترددات القطع 5KHZ , 100HZ يساوى (0.707Av) ويكون النطاق الترددى BW مساوياً :

$$BW = F_{CH} - F_{CL} \rightarrow 1.34$$

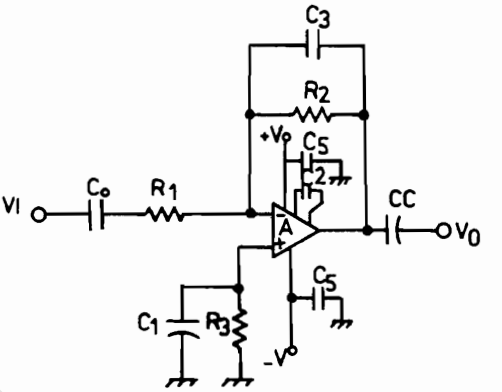
$$= 5000 - 100 = 4900\ HZ$$

والشكل (١ – ٤٣) يعرض دائرة مكبر عاكس آخر يستخدم فى دوائر التيار المتردد

حيث إن :

مقاومة كربونية 10KΩ	R_1
مقاومة كربونية 100KΩ	R_2
مقاومة كربونية 4.7KΩ	R_3
مكثف بوليستير 150nF	C_0
مكثف كيميائى 10µF	C_1
مكثف بوليستير 0.022µF	C_2
مكثف بوليستير 330PF	C_3
مكثف بوليستير 0.1µF	C_5
مكثف كيميائى 10µF	C_C
مكبر عمليات طراز TLO81	A

obeikandl.com



الشكل (١ - ٤٣)

والجدير بالذكر أن المقاومة R3 تعمل على إزالة الحيود الناتج عن تيارات الدخل الانحيازية وتساوى:

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

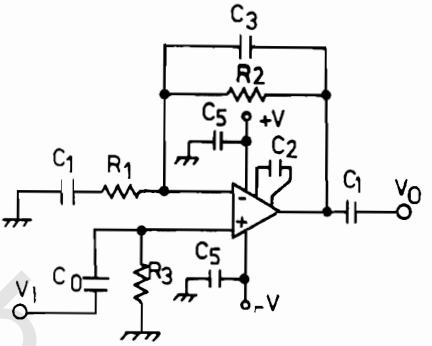
- والمكثف C3 يعمل على زيادة استقرار المكبر ويعين من المعادلة 1.35 :

$$C_3 = \frac{1}{2\pi R_1 F_{CH}} \text{ (HZ)} \rightarrow 1.35$$

حيث إن:

- التردد FCH هو تردد القطع الأقصى.
- المكثف C5 يوصل مع أطراف المصدر ويسمى بمكثف ربط المصدر.
- المكثف Co يعمل على منع دخول الإشارات المستمرة على المدخل العاكس.
- المكثف Cc يمنع ارتداد التيارات المستمر من المخرج إلى المدخل العاكس.
- المكثف C2 يعمل على تعويض التردد.

والشكل (١ – ٤٤) يعـــرض دائرة مكبر غير عاكس يعمل فى دوائر التيار المتردد .



الشكل (١ – ٤٤)

حيث إن : الكسب يساوى :

$$Av = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

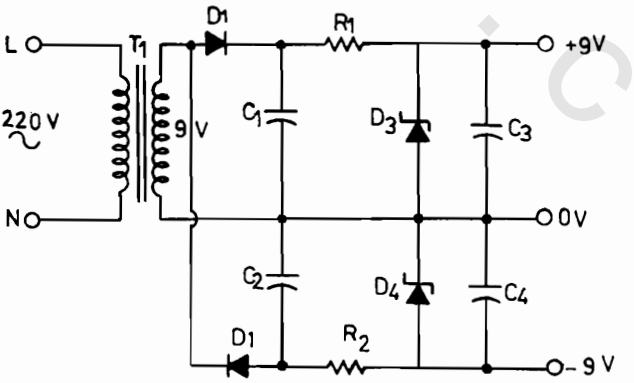
والجدير بالذكر أن جميع المكثفات المستخدمة فى هذه الدائرة لا تختلف عن المستخدمة فى الدائرة السابقة عدا أن المكثف C1 يعين من المعادلة 1.36 :

$$C_1 = \frac{1}{2\pi\ C_2\ F_{CL}} \rightarrow 1.36$$

علماً بأن FCL هو تردد القطع الأدنى .

١ / ١٠ – مصادر القدرة لمكبرات العمليات القياسية

تحتاج مكبرات العمليات القياسية لمصادر قدرة مزدوجة لها جهود تتراوح ما بين (±20V : ±5V)، وأكثر الجهود المتعارف عليها هى ±15V، والشكل (١ – ٤٥) يعرض مصدر قدره مزدوج ومنتظم يعطى جهد خرج يساوى (9V- , 0V , 9V+) .

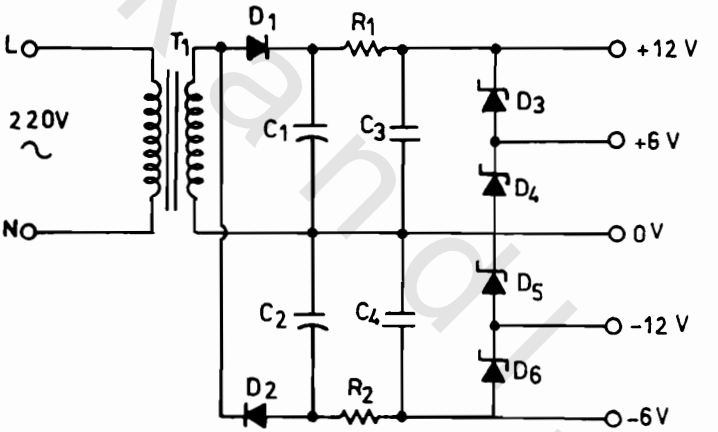


الشكل (١ – ٤٥)

عناصر الدائرة:

مقاومات قيمتها 120 Ω وقدرتها 5W	R_1 , R_2
مكثفات كيميائية 1000µF/25V	C_1 , C_2
مكثفات كيميائية 470µF/16V	C_3 , C_4
موحدات سليكونية طراز EM4005	D_1 , D_2
موحدات زينر طراز BZX70	D_3 , D_4
محول 220/9V وتياره 1A	T_1

والشكل (١ – ٤٦) يعرض دائرة أخرى لمصدر قدرة مزدوج ومنتظم لمكبرات العمليات يعطى الجهود الآتية (12V- ,6- ,0 ,6+ ,12+).



الشكل (١ – ٤٦)

عناصر الدائرة:

مقاومة قيمتها 100Ω وقدرتها 5W	R_1 , R_2
مكثف كيميائى 1000µF/25V	C_1 , C_2
مكثف سيراميك سعته 0.1µF	C_3 , C_4
موحد سليكونى طراز DR - 50	D_1 , D_2

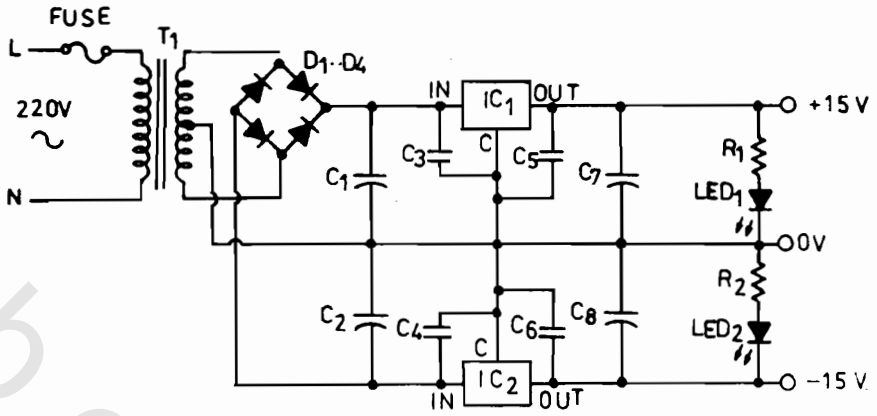
موحد زينر جهده 6V وقدرته 1W	D_3 , D_4
محول خفض 220/15V وتياره 1A	T_1

والشكل (١ – ٤٧) يعرض مصدر قدرة مزدوج ومنتظم لمكبرات العمليات القياسية يعطى الجهود الآتية V(15- ,0 ,15+) وتيار أقصى 1A .

عناصر الدائرة :

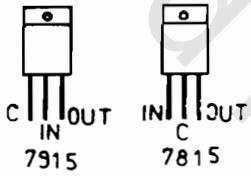
مقاومة كربونية 1.2KΩ	R_1 , R_2
مكثفات كيميائية 4700µF/40V	C_1 , C_2
مكثفات سيراميك قرصية 100nF	C_3 , C_4 , C_5 , C_6
مكثفات كيميائية 10µF/40V	C_7 , C_8
موحدات سليكونية طراز 1N5401	D_1 , D_4
دائرة متكاملة لمنظم جهد ثلاثى طراز 7815	IC_1
دائرة متكاملة لمنظم جهد ثلاثى طراز 7915	IC_2
محول (220/18 - 0 - 18) وتياره 1A	T_1
مصهر (50mA) بالقاعدة	Fuse
موحد باعث للضوء قياسى 10mA	LED_1 , LED_2
مبددات حرارة لتثبيت منظمات الجهد أبعادها	
(1.5 x 1cm) من الألومنيوم وسمكها 2mm	

obeikandl.com



الشكل (١ – ٤٧)

والشكل (١ – ٤٨) يعرض المسقط الرأسى لمنظم الجهد ذات الخرج الموجب والمساوى 15V+ طراز 7815، وكذلك المسقط الرأسى لمنظم الجهد ذات الخرج السالب والمساوى 15V- طراز 7915.



الشكل (١ – ٤٨)

١ / ١١ – تشغيل مكبرات العمليات من مصدر قدرة أحادى

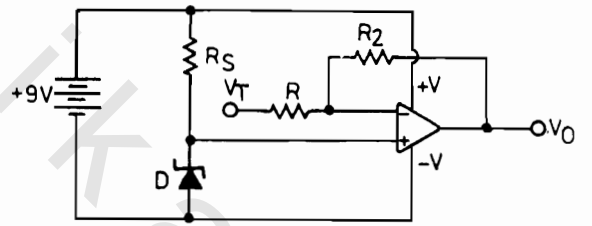
فى بعض التطبيقات يستخدم مصدر قدرة موجب أو سالب لتغذية مكبرات العمليات، والشكل (١ – ٤٩) يعرض طريقة توصيل مكبر عمليات من مصدر قدرة أحادى موجب باستخدام موحد زينر، ويجب أن يكون جهد موحد الزينر D مساوياً نصف جهد المصدر أى 4.5V فى هذه الحالة، ويجب أن يكون فقد الجهد فى

المقارمة Rs مساوياً نصف جهد المصدر أيضاً أى 4.5V أى أن :

$$Iz\ Rs = \frac{V_{DD}}{2} \rightarrow 1.37$$

حيث إن :

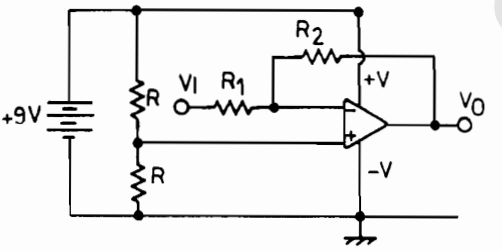
V_{DD} هو جهد المصدر الذى يساوى 9V فى هذه الحالة، أما Iz فهو تيار موحد الزينر، وبمعلومية تيار موحد الزينر Iz يمكن تعيين قيمة المقاومة Rs من المعادلة 1.37 .



الشكل (١ – ٤٩)

والشكل (١ – ٥٠) يعرض دائرة أخرى لتغذية مكبر العمليات من مصدر قدرة أحادى باستخدام مقاومتين متساويتين R يعملان كمنصف للجهد .

وعادة فإن قيمة المقاومة R تساوى ضعف مقاومة التغذية المرتدة، كما أنه يجب توصيل الطرف السالب لمكبر العمليات بالشاسيه .



الشكل (١ – ٥٠)

١ / ١٢ - اعتبارات خاصة عند تنفيذ دوائر مكبرات العمليات

بعد أن اكتسبنا بعض المعلومات العملية عن مكبرات العمليات جاء الدور لاستعراض بعض الملاحظات التى يجب مراعاتها عند التعامل مع مكبرات العمليات، خصوصاً وأنها ذات كسب كبير، وأن حجم الدوائر المتكاملة لمكبرات العمليات صغير، الأمر الذى يجعل أرجل الدخل والخرج قريبة من بعضها، وهذا يؤدى إلى حدوث تغذيات مرتدة غير مرغوبة تؤدى إلى إحداث تذبذب فى الخرج، ومن أجل تلافى هذه التذبذبات فى الخرج، **هناك بعض الملاحظات التى تراعى عند وضع العناصر المختلفة حول مكبر العمليات مثل:**

١ - يجب توصيل أطراف مكبر العمليات المتصلة بمصدر القدرة مع الأرضى بمكثفات لها قيم مناسبة، ويجب وضع هذه المكثفات قدر الإمكان بجوار أرجل مكبر العمليات وليس عند أطراف مصدر القدرة.

٢ - يجب أن تكون خطوط الدخل والخرج للمكبر أقصر ما يمكن مع استخدام أطراف مدرعة Shielded leads قدر الإمكان.

٣ - يجب استخدام نقطة أرضى واحدة بجوار مكبر العمليات، وذلك نتيجة لاحتمال تكون دوائر رنين فى حالة عدم جودة التأريض.

٤ - يجب استخدام قاعدة مناسبة لمكبر العمليات، ويجب تثبيت مكبر العمليات على قاعدته بعد الانتهاء من جميع التوصيلات اللازمة.

وهناك تحذيرات من الأتى:

١ - حدوث زيادة فى جهد مصدر القدرة أو حالات الانتقال العابر Transient.

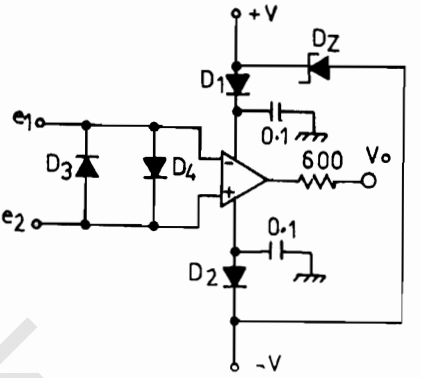
٢ - انعكاس أطراف مصدر القدرة.

٣ - زيادة جهد مرحلة الدخل.

٤ - زيادة الحمل على مرحلة الخرج.

والجدير بالذكر أن مكبرات العمليات المتطورة مثل 741 فإنها تكون مزودة داخلياً بجميع أنواع الحمايات اللازمة، أما بعض مكبرات العمليات مثل 709 فهى تحتاج

لأخذ الحمايات اللازمة فى الاعتبار، وسوف نستعرض باختصار جميع الحمايات اللازمة لمكبرات العمليات، والشكل (١ – ٥١) يعرض جميع الحمايات اللازمة لمكبرات العمليات.



الشكل (١ – ٥١)

فالموحدات D1 , D2 تحمى مكبر العمليات من انعكاس أطراف مصدر القدرة، فعند انعكاس أطراف مصدر القدرة يصبح D1 , D2 فى حالة قطع لأنهم سيكونا فى حالة انحياز عكسى.

أما موحد الزينر فيعمل على حماية مكبر العمليات من ارتفاع الجهد الناتج عن الجهود العابرة، والناتجة عن مكثفات التعويض، ارجع للشكل (١ – ٤١)، وذلك لتفريغ شحنتها بعد فصل التيار الكهربى عن الدائرة.

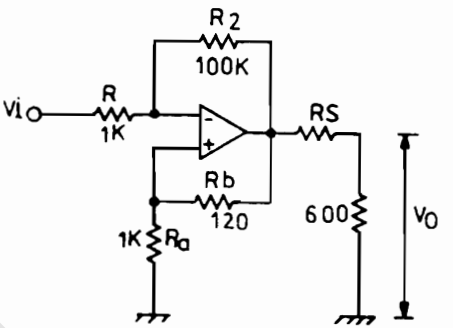
ويجب اختيار موحد الزينر بحيث يتحول إلى ON فى حالات العبور Transient، الأمر الذى يساعد على منع تعدى جهد أطراف مصدر القدرة أقصى جهد تشغيل لمكبر العمليات.

وتوصل الموحدات D3 , D4 بالتوازى خلفاً لخلف، وذلك من أجل منع فرق الجهد بين إشارتى الدخل e1 , e2 يتعدى 0.6V، وهو جهد الانحياز الأمامى للموحد السليكونى.

وتوصل مقاومة مقدارها 600Ω على خرج مكبر العمليات لتحديد تيار الخرج للمكبر، ولكن نظراً لأن وضع مقاومة بهذه الطريقة يؤدى إلى زيادة استهلاك القدرة

obeikandl.com

الكهربية، لذلك ينصح بعمل تغذية مرتدة موجبة وسالبة لمكبر العمليات بالطريقة المبينة بالشكل (١ – ٥٢).



الشكل (١ – ٥٢)

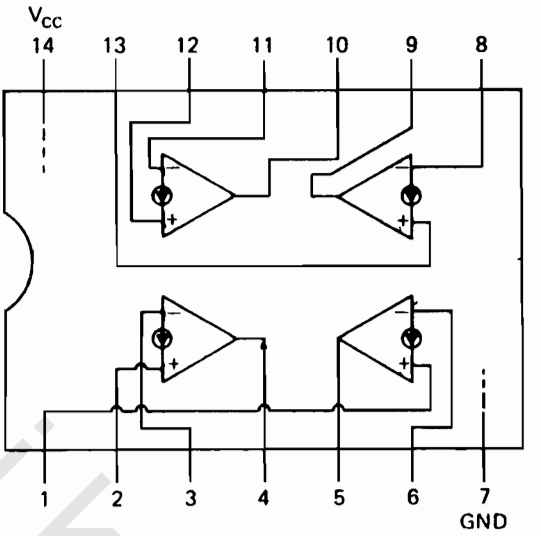
حيث إن :

مقاومة كربونية 1KΩ	R1 , Ra
مقاومة كربونية 100KΩ	R2
مقاومة كربونية 100Ω	Rs
مقاومة كربونية 120Ω	Rb

وذلك من أجل زيادة معاوقة الخرج وبالتالى يقل تدفق تيار الحمل.

١ / ١٣ – مكبرات التيار الفرقية Current Differencing Amplifier

من المعروف أن مكبرات العمليات القياسية تحتاج عادة إلى مصدر قدرة مزدوج وله جهد عالى مقارنة بجهد الدوائر الرقمية، وهذا فى الحقيقة يمثل كثيراً من المتاعب لتوفير هذا المصدر؛ لذلك قامت الشركات المصنعة بتوفير مكبرات عمليات تعمل من مصدر قدرة أحادى تسمى بمكبرات التيار الفرقية (CDA) وأحياناً يطلق عليها مكبرات نورتون Norton Amplifiers، وأشهر الدوائر المتكاملة لمكبرات نورتون هم LM2900 , LM3900 والمصنعة بشركة National، والشكل (١ – ٥٣) يعرض المسقط الأفقى لهاتين الدائرتين.



الشكل (١ – ٥٣)

وفيما يلى أهم المواصفات الفنية لهذه الدوائر :

مصدر القدرة (36V : 4) أو (18V± : 2±)

تيار الانحياز لكل مكبر 1.3mA

كسب الدائرة المفتوحة عندما تكون مقاومة الحمل 10KΩ يساوى 70dB

تردد كسب الوحدة يساوى 2.5MHZ

مقاومة الدخل تساوى 1MΩ

مقاومة الخرج تساوى 8MΩ

جهد الخرج يساوى جهد الدخل مطروح منه 1

تيار الدخل الانحيازى 30nA

معدل الإمالة يساوى (0.5V/μS) .

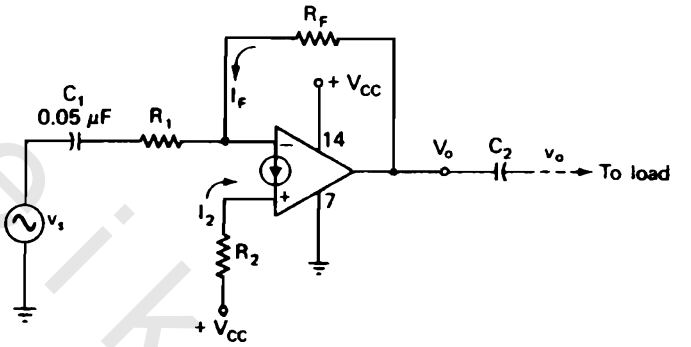
والجدير بالذكر أن خواص هذه المكبرات لا تتغير إلا قليلاً عند تغيير جهد المصدر وتستخدم مكبرات نورتون فى تطبيقات كثيرة تماماً كمكبرات العمليات القياسية،

obeikandl.com

وسوف نتناول بعض هذه التطبيقات فى الفقرات القادمة.

١ / ١٣ / ١ - دائرة المكبر العاكس

الشكل (١ - ٥٤) يعرض دائرة مكبر عاكس باستخدام مكبر نورتون طراز LM3900.



الشكل (١ - ٥٤)

وتستخدم هذه الدائرة كدائرة مكبر عاكس، ولكن لإشارات التيار المتردد فقط، وذلك لاستخدام المكثف C1 لمنع التيار المستمر للذهاب للأرضى خلال المقاومة R_1 ومصدر جهد الإشارة Vs ويعين كسب جهد الدائرة من المعادلة 1.38 :

$$Av = \frac{Vo}{Vs} \simeq \frac{-R_F}{R_1} = \rightarrow 1.38$$

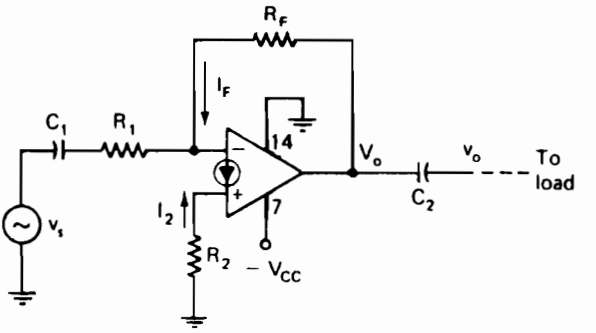
فإذا كان :

$$R_1 = 100K\Omega \quad , \quad R_2 = 1M\Omega$$

فإن كسب الدائرة سيساوى 10-.

وتختار R2 مساوية 2RF حتى يكون جهد الخرج المستمر مساوياً $\frac{+Vcc}{2}$

والشكل (١ - ٥٥) يوضح طريقة استخدام مكبر نورتون فى دائرة مكبر عاكس تغذى من مصدر قدرة أحادى سالب.

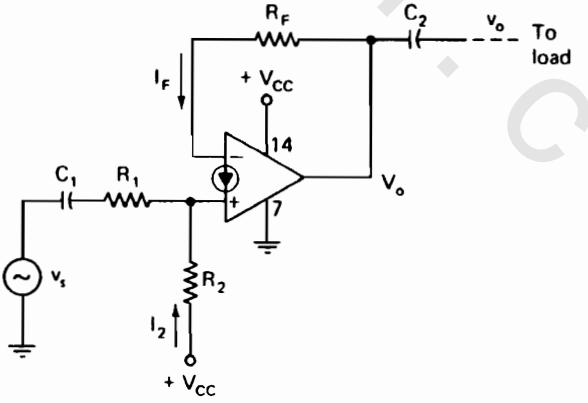


الشكل (١ – ٥٥)

ويعين معامل كسب الدائرة من المعادلة 1.38، ويكون جهد الخرج المستمر مساوياً $\frac{-V_{CC}}{2}$ إذا تحقق الشرط التالى ($R_2 = 2R_F$).

١ / ١٣ / ٢ – دائرة المكبر غير العاكس

الشكل (١ – ٥٦) يعرض دائرة مكبر غير عاكس باستخدام مكبر نورتون ويستخدم هذا المكبر كمكبر غير عاكس لإشارات التيار المتردد فقط، وفى هذه الدائرة يتم تغذية المكبر من مصدر قدرة أحادى موجب.



الشكل (١ – ٥٦)

ويعين كسب الدائرة من المعادلة 1.39 :

$$Av = \frac{Vo}{Vs} = \frac{R_F}{R_1} = \rightarrow 1.39$$

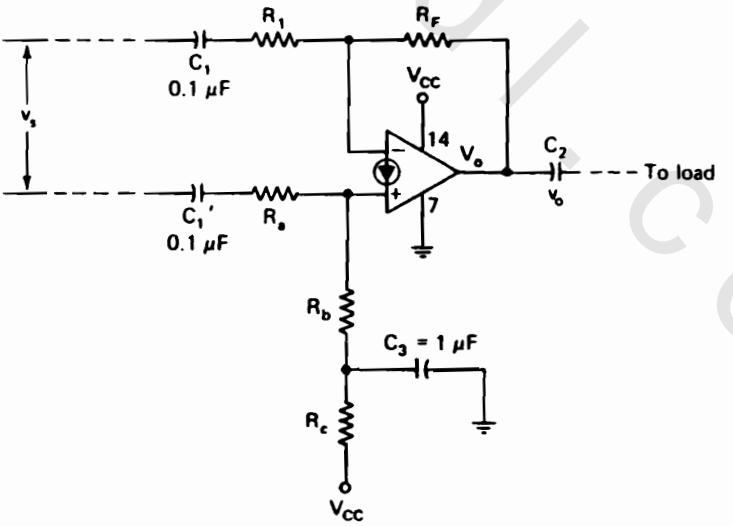
ولكى يكون جهد الخرج المستمر مساوياً تقريباً نصف جهد المصدر ($Vo = \frac{Vcc}{2}$) يجب أن يتوفر الشرط التالى ($R2 = 2RF$) .

١ / ١٣ / ٣ - دائرة المكبر الفرقى

الشكل (١ – ٥٧) يعرض دائرة مكبر فرقى باستخدام مكبر نورتون يتم تغذيته من مصدر قدرة أحادى موجب .

ويعين كسب الدائرة من المعادلة 1.40 :

$$Av = \frac{Vo}{Vs} \cong \frac{-RF}{R1} = \rightarrow 1.40$$



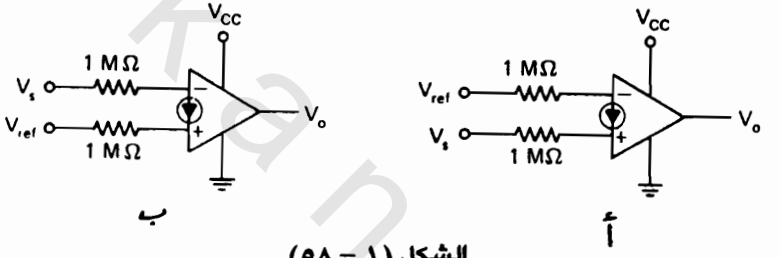
الشكل (١ – ٥٧)

ولكى يكون جهد الخرج المستمر مساوياً ($Vo = \frac{Vcc}{2}$) يجب أن يتحقق الشرط التالى ($Rb + RC = 2RF$).

ومن أجل الوصول إلي أداء جيد للمكبر يجب أن يتحقق الشرط التالى ($\frac{R_F}{R1} = \frac{R_b}{Ra}$).

١ / ١٣ / ٤ - دوائر المقارنات

الشكل (١ – ٥٨) يعرض دائرتين للمقارنات باستخدام مكبر نورتون.



الشكل (١ – ٥٨)

ففى الشكل أ يكون جهد الخرج Vo مساوياً صفراً عندما يكون Vs > Vref، ويكون جهد الخرج Vo مساوياً Vcc عندما يكون Vs < Vref وفى هذه الحالة يسمى المقارن بمقارن غير عاكس لدخول جهد الدخل Vs على المدخل غير العاكس (+).

وفى الشكل (ب) يكون جهد الخرج Vo مساوياً صفراً، عندما يكون Vs < Vref، ويكون جهد الخرج Vo مساوياً Vcc؛ عندما يكون Vs > Vref، ويسمى المقارن فى هذه الحالة بمقارن عاكس لدخول جهد الدخل Vs على المدخل العاكس (–)؛ علماً بأن Vref تعنى جهد الأساس.

١ / ١٤ - دوائر مقارنات الجهد المتكاملة

قامت بعض الشركات المصنعة بتصنيع بعض الدوائر المتكاملة التى تعمل

كمقارنات جهد، والشكل (١ – ٥٩) يعرض المسقط الأفقى لعدة أنواع من هذه الدوائر المتكاملة، فالشكل (أ) للدوائر المتكاملة التالية :

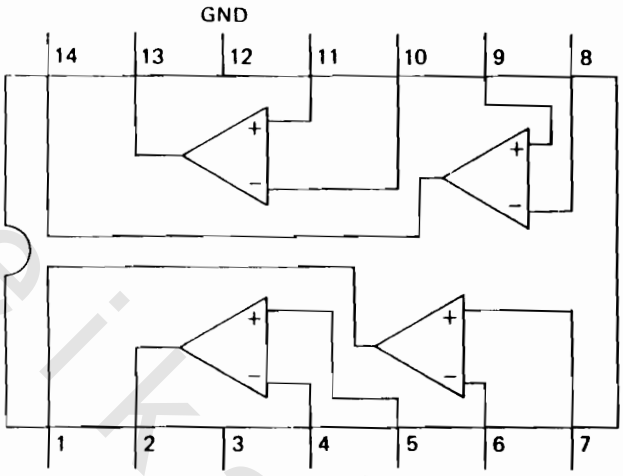
LM339A , LM239A , LM139A , LM 2901

والمصنعة بشركة National وكذلك شركة Signetics .

والشكل (ب) للدوائر المتكاملة التالية HA4905 , HA4900 والمصنعة بشركة Harris .

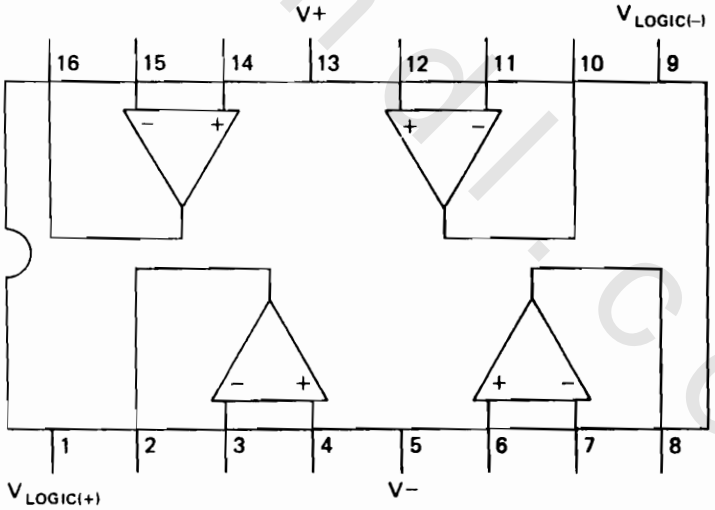
والجدير بالذكر أن جميع الدوائر المتكاملة للمقارنات تكون بمجمع مفتوح؛ لذلك فهى تحتاج لمقاومة جذب Pull up Resistor، ولمزيد من المعلومات عن طريقة استخدام دوائر مقارنات الجهد المتكاملة إرجع للباب الثالث الدائرة رقم ٦ .

obeikandl.com



(أ)

(a)



(ب)

الشكل (١ – ٥٩)