

الباب الأول

مكبرات العمليات OP. Amp.

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 حيناً 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

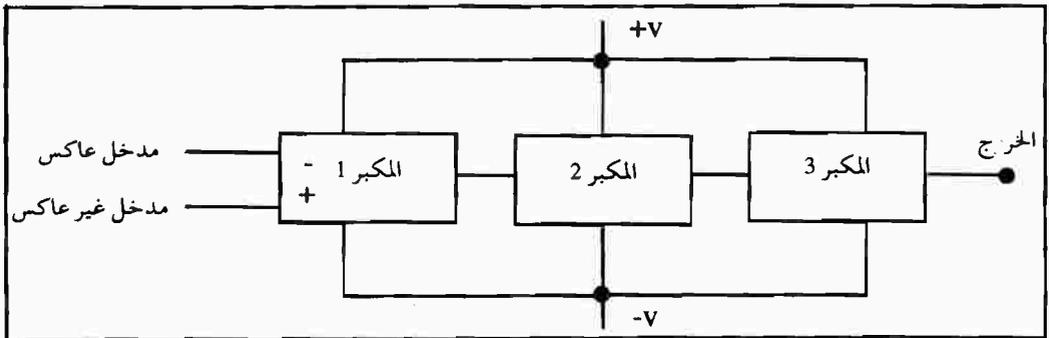
فيما يلى أهم المواصفات الفنية لمكبر العمليات المثالى:

- 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 متعدمة.
- ٤ - معاوقة صفيرية للخرج: فيجب ألا يتغير جهد الخرج عندما تنخفض مقاومة الحمل للصفرى.
- 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 المثالي لم يصنع إلى الآن إلا أن تكنولوجيا أشباه
الموصلات استطاعت أن تصل بخواص مكبرات العمليات إلى مواصفات تقترب
من تلك الخاصة بمكبر العمليات المثالي .

وفيما يلي خواص مكبرات العمليات الحديثة المتوفرة في الأسواق :

- ١ - كسب عال جداً للجهد المستمر يصل إلى $(10^3:10^6)$.
 - ٢ - عرض حزمة ترددات يبدأ عند التيار المستمر dc وينتهي عند كسب الوحدة
. unity gain
 - ٣ - جهد خرج موجب أو سالب يتراوح ما بين $\pm 100 \text{ V} : \pm 10 \text{ V}$.
 - ٤ - معاوقة دخل كبيرة بحيث يكون تيار الدخل مهماً .
 - ٥ - حيود قليل جداً للخروج عند تغيير درجة الحرارة .
- والشكل (١ - ١) يبين المخطط الصندوقي لمكبر العمليات .



الشكل (١ - ١)

ويلاحظ أن مكبر العمليات يتكون من :

- ١ - مكبر رقم 1 وهو مكبر تفاضلي له معاوقة دخل كبيرة، وله مدخلان أحدهما
ياخذ إشارة سالبة، ويسمى مدخل عاكس Inverting input والآخر ياخذ 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 في ثلاث صور مبينة بالشكل

(١ - ٢) وهم كما يلي :

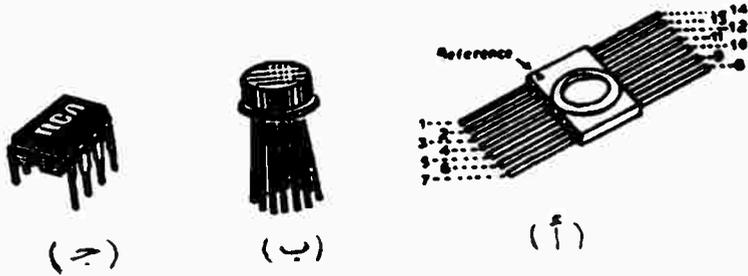
- دوائر متكاملة مبططة Flat Package (الشكل ا) .

- دوائر متكاملة على شكل اسطوانة معدنية Metal Cane Package

(الشكل ب) .

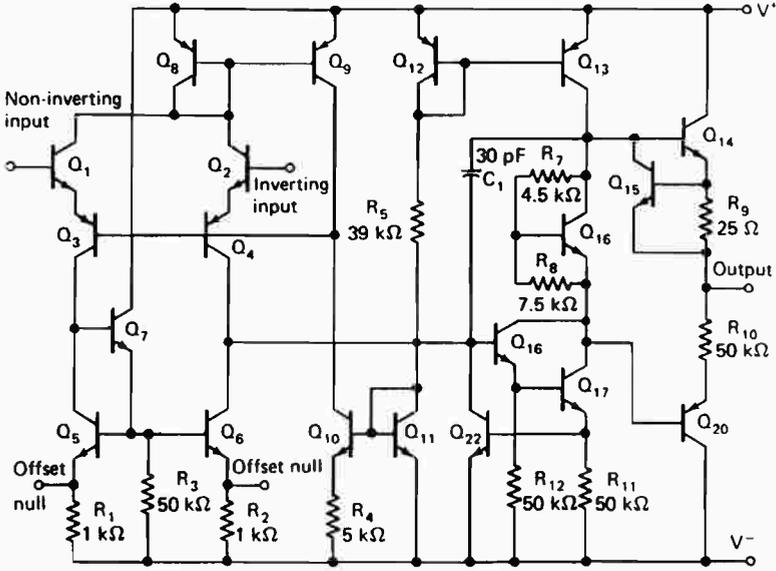
- دوائر متكاملة على شكل شريحة بصفتين من الأرجل Dual in Line (DIL)

(الشكل ج) .



الشكل (١ - ٢)

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



الشكل (١ - ٣)

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

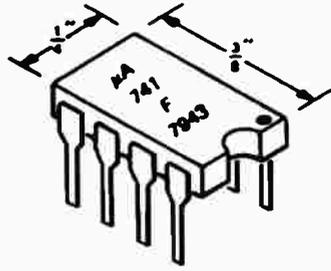
التعريف بوظائف أرجل مكبر العمليات 741 :

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 15 V - .

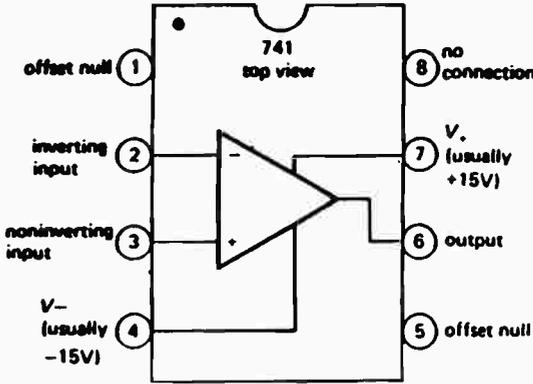


الرجل (5) تستخدم لضبط الخرج عند الصفر.

الرجل (6) تمثل الخرج.

الرجل (7) توصل بالجهد الموجب للمصدر ويساوي +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:

R₁, R₂, R₄

مقاومة كربونية 6.8 K Ω

R₃

مقاومة كربونية 47 K Ω

R₅

مقاومة كربونية 4.7 K Ω

RV₁

مقاومة متغيرة 100 Ω

C₁

مكثف بوليسير 0.01 μ F

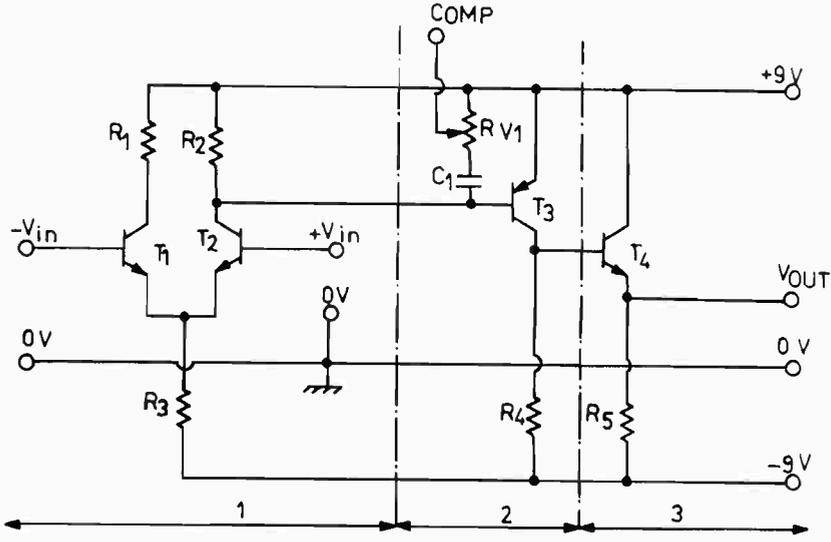
T₁, T₂, T₄

ترانزستور NPN طراز BC 148

T₃

ترانزستور NPN طراز BC 158

مصدر قدرة (+9V, 0, -9V)



الشكل (١ - ٥)

نظرية عمل الدائرة:

تشكل الترانزستورات T₁, T₂ مرحلة الدخل الفرقى وتوصل المقاومة الكبيرة R₃ بالتوالى مع T₁, T₂، وتعمل كمصدر تيار ثابت. أما الترانزستور T₃ فيعمل كمرحلة تكبير بينية فى حين أن الترانزستور T₄ يشكل مرحلة خرج ذات معاوقة صغيرة. وعند وصول إشارة للمدخل غير العاكس (+) يتم تكبيرها بواسطة T₂ مع عكس الإشارة ثم تكبيرها مرة أخرى بواسطة T₃ مع عكس الإشارة والنتيجة أن يكون خرج T₃ متفق فى الإشارة مع إشارة الدخل أما T₄ فيعمل كمكبر غير عاكس.

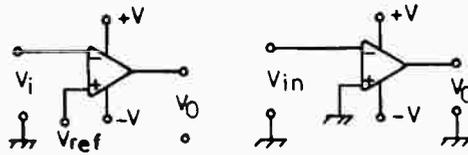
وعند وصول إشارة إلى المدخل العاكس (-) والذى يمثل قاعدة T₁ فإنه بنفس الطريقة السابقة يحدث تكبير لإشارة الدخل بنفس معامل التكبير ولكن بإشارة مخالفة.

وتعمل المقاومة R_{V1} والمكثف $C1$ على تحسين استجابة المكبر ويسمى طرف المقاومة المتغيرة R_{V1} بطرف التعويض .

٤ / ١ - 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 .



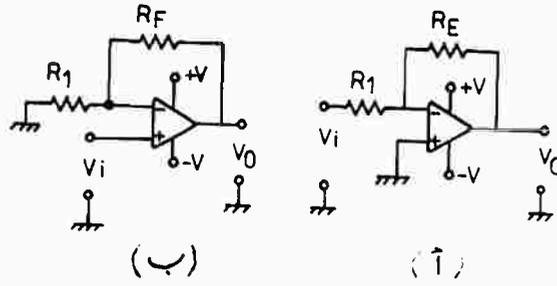
ب

أ

الشكل (١ - ٦)

والشكل (أ) يبين طريقة استخدام مكبر العمليات فى مقارنة إشارة جهد الدخل V_i بجهد الأرضى . والشكل (ب) يبين طريقة استخدام مكبر العمليات فى مقارنة جهد إشارة الدخل V_i بجهد أساس V_{ref} . 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) .



الشكل (١-٧)

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

والجدير بالذكر أن كسب الدائرة يعتمد في 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 سالباً أي أن الإزاحة الوجهية بين الخرج والدخل تكافئ 180° درجة كهربية، ولكن في حالة إشارات الدخل المتردد فكلما ازداد التردد ازدادت الإزاحة

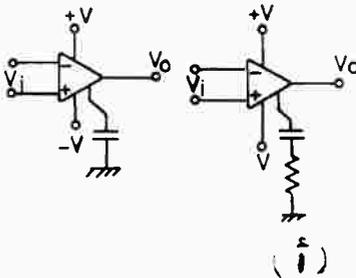
الوجهية لتصل إلى 360° ؛ الأمر الذي يؤدي إلى حدوث تذبذب في خرج

المكبر، لأن الإشارة المرتدة أصبحت متفقة في الوجه مع إشارة الدخل (لأن

إزاحة 360° تعنى اتفاق في الوجه) ولعلاج هذه المشكلة فإن بعض مكبرات

العمليات غير المزودة بتعويض داخلي للتردد تزود برجل إضافية لتعديل الوجه،

وذلك لإحداث تأخير في الوجه Lag أو



الشكل (١-٨)

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

والجدير بالذكر أن مكبر العمليات 741 لا يحتاج لتعويض في التردد لأنه مزود داخلياً بدائرة تعويض .

١ / ٤ / ٣ - عرض حزمة الترددات Band Width

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

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

والمعادلة 1.1 تستخدم لإيجاد عرض حزمة الترددات BW :

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

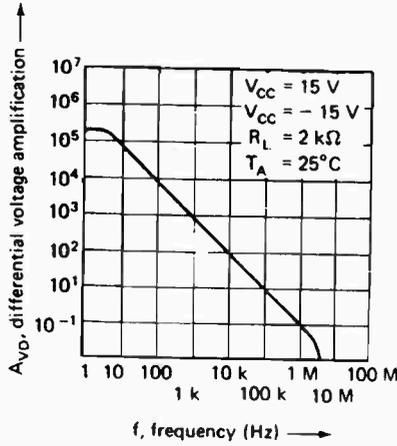
حيث إن :

GBW حاصل ضرب الكسب في عرض حزمة الترددات

Av كسب الجهد

BW عرض حزمة الترددات

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



الشكل (١ - ٩)

Common mode rejection ratio العام النمط العام - ٤ / ٤ / ١

لنسبة استبعاد النمط العام CMRR عدة تعريفات لعل أيسرها يفهم من

المعادلة 1.2 .

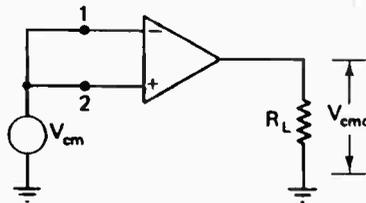
$$CMRR = \frac{A_v}{A_{cm}} \rightarrow 1.2$$

حيث إن :

A_v معامل كسب الجهد للحلقة المغلقة

A_{cm} معامل كسب النمط العام

والشكل (١ - ١٠) يبين طريقة تعيين معامل كسب النمط العام A_{cm} .



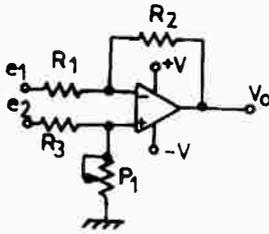
الشكل (١٠ - ١)

$$A_{cm} = \frac{V_{cmo}}{V_{cm}} \rightarrow 1.3$$

وعادة فإن A_{cm} تكون أقل كثيراً من الواحد .

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

حيث إن :



R_1, R_2, R_3 مقاومة كربونية $100\text{ K } \Omega$

P_1 مقاومة متغيرة $100\text{ K } \Omega$

فعندما يكون $e_1=e_2$ فإن الخرج يكون قريباً من الصفر، وذلك بضبط P_1 . وكلما ازدادت قيمة

$CMRR$ ؛ دل على جودة المكبر، وأحياناً تعين $CMRR$ بالديسيبل (dB). وذلك من المعادلة 1.4

$$CMRR = 20 \text{ Log } \frac{A_v}{A_{cm}} \rightarrow 1.4$$

١ / ٤ / ٥ - إزالة الحمود الناتج عن تيار الدخل الانحيازي

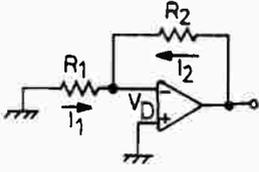
Offset due to input bias Current

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). ففي حالة عدم تواجد إشارة دخل فإن تيارات الدخل الصغيرة يمكن أن تولد فرق جهد V_0 بين المدخل العاكس وغير العاكس لمكبر العمليات؛ وينتج عن ذلك جهد خرج كبير كما هو مبين بالشكل (١ - ١٢).

حيث إن: جهد الخرج V_0 يساوى:

$$V_0 = I_1 R_1 \rightarrow 1.5$$

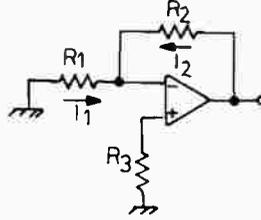
وحتى نزيل الحيوود الناتج في الخرج نتيجة لتيار الدخل الانحيازى توصل مقاومة R3 بين المدخل غير العاكس والارضى كما هو مبين بالشكل (١ - ١٣) .



وتعين المقاومة R3 من المعادلة 1.6

الشكل (١ - ١٢)

$$R3 = \frac{R1 R2}{R1 + R2} \rightarrow 1.6$$



الشكل (١ - ١٣)

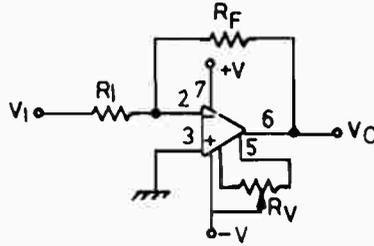
١ / ٤ / ٦ - جهد الدخل المزبل للحيوود Input Offset Voltage

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

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

ويلاحظ أن مكبر العمليات 741 مزود بالأرجل 1.5 لإزالة الحيوود، وذلك بواسطة مقاومة متغيرة RV1 توصل بينهما وتغذى النقطة المنزلفة للمقاومة المتغيرة مع الجهد

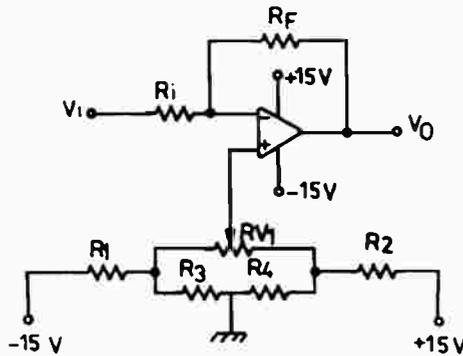
السالب $-V$ - للمصدر الكهربى .



الشكل (١ - ١٤)

أما فى حالة مكبرات العمليات غير المزودة بأرجل لإزالة الحيوود مثل المكبر 709
فيعتم إزالة الحيوود فيها بالطريقة المبينة بالشكل (١ - ١٥) .

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



الشكل (١ - ١٥)

١ / ٤ / ٧ - معدل الإمالة Slew rate

ويعرف على أنه سرعة تغيير جهد الخرج المقابل لموجة مربعة عندما تكون مقاومة الحمل $2K\Omega$ ووحدتها (V/S) أو $(V/\mu S)$.

وتتراوح ما بين $(0.2V/\mu S : 20V/\mu S)$. ويسبب معدل الإمالة مشاكل في حالة الموجات العريضة الاتساع (التي لها زمن دورى كبير) ويعين معدل الإمالة SR من المعادلة 1.7 من

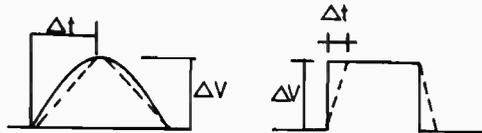
$$SR = \frac{\Delta V_o}{\Delta t} \rightarrow 1.7$$

حيث إن :

ΔV_o التغيير فى جهد الخرج الحادث فى زمن Δt

Δt التغيير فى الزمن

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



الشكل (١ - ١٦)

١ / ٥ - مصطلحات فنية شائعة الاستخدام

١ - كسب الجهد للحلقة المفتوحة A_{vo} : وهى النسبة بين جهد الخرج وجهد الدخل فى حالة عدم وجود تغذية مرتدة وتصل هذه القيمة إلى 100000 وتتغير من مكبر لآخر.

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

٣ - مقاومة الدخل R_i : وهي المقاومة بين المدخلين والأرضى.

٤ - مقاومة الخرج R_o : وهي المقاومة بين الخرج والأرضى.

٥ - جهد الدخل الملائم للحيود V_{IO} (Input offset voltage drift): وهو الجهد الواجب تطبيقه بين المدخلين للحصول على خرج صفري.

٦ - تيار الدخل الملائم للحيود I_{IO} (Input offset current): وهو الفرق بين تيارات المدخلين عندما يكون الخرج في حالة جهد صفري.

٧ - تيار الدخل الانحيازي I_{IB} (Input bias current): وهو متوسط تيارات المدخلين عندما يكون الخرج في حالة جهد صفري.

٨ - جهد الدخل التفاضلي V_{ID} (Differential Input voltage): وهو فرق الجهد الأقصى المسموح به بين المدخلين العاكس وغير العاكس.

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

١٠ - المستوى العالي لجهد الخرج V_{oh} .

١١ - المستوى المنخفض لجهد الخرج V_{ol} .

١٢ - المستوى العالي لتيار الخرج I_{oh} .

١٣ - المستوى المنخفض لتيار الخرج I_{ol} .

١٤ - تيار التغذية I_{cc} .

١٥ - جهد التغذية V_{cc} .

١٦ - عرض حزمة الترددات عند كسب الوحدة GBW ويساوي حاصل ضرب الكسب في عرض حزمة الترددات.

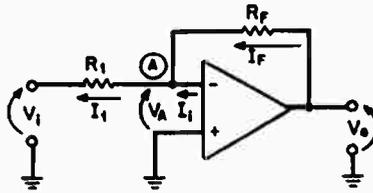
٦ / ١ - الدوائر الأساسية لمكبرات العمليات

حيث إن: معامل تكبير الحلقة المفتوحة Avo لمكبرات العمليات يكون كبيراً ويصل إلى 200000؛ لذا فإن مكبرات العمليات عادة لا تستخدم في الحلقات المفتوحة، ولكن تستخدم في حلقات مغلقة Closed Loop، ولكي يكون المكبر في 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 في الفقرات التالية.

١ / ٦ / ١ - دائرة المكبر العاكس Inverting amplifier

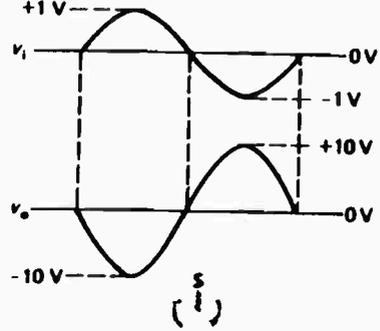
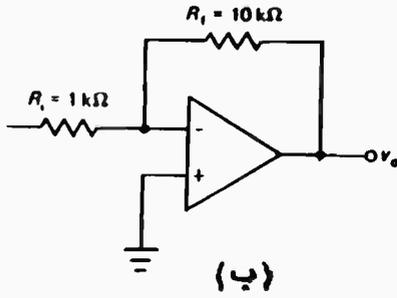
الشكل (١٧ - ١) يعرض دائرة مكبر عاكس وتسمى المقاومة R_F بمقاومة التغذية الخلفية أما المقاومة R_1 فهي مقاومة توالى وتوصل بين المدخل السالب (-) للمكبر وإشارة الدخل المطلوب تكبيرها، ونحصل على معامل كسب الجهد Av من المعادلة 1.8:

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-R_F}{R_1} \rightarrow 1.8$$



الشكل (١٧ - ١)

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



الشكل (١ - ١٨)

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

حيث إن:

$$V_o = \frac{-R_f}{R_1} V_i$$

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

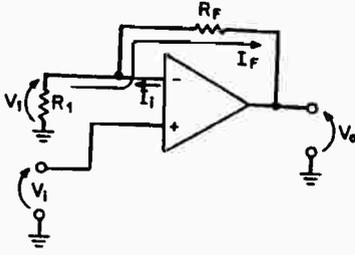
ويجب ملاحظة أن جهد الخرج V_o في هذه الحالة لا يمكن أن يتعدى جهد مصدر القدرة، فإذا كان جهد مصدر القدرة $\pm 15V$ فإن جهد الخرج لن يتعدى $\pm 15V$ لأن المكبر سيكون في حالة تشبع.

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 يلي معادلة كسب الجهد للمكبر غير العاكس:

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_f}{R_1} \rightarrow 1.9$$



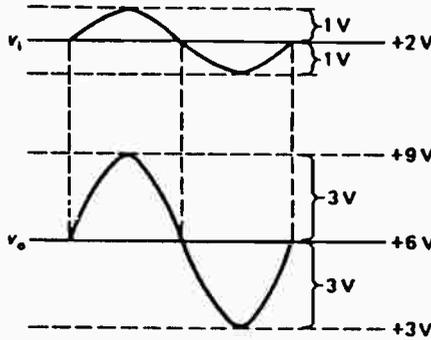
الشكل (١ - ١٩)

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

$$V_o = A_v V_i = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) V_i$$

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

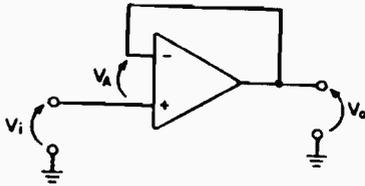
والشكل (١ - ٢٠) يبين العلاقة بين V_i مع الزمن، وكذلك V_o مع الزمن فى هذه الحالة ويلاحظ أنه لا يوجد إزاحة وجهية بين V_i و V_o .



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 V_o مساوٍ تقريباً لجهد الدخل V_i فى القيمة والقطبية، لذلك سمي مكبر الوحدة ويستخدم مكبر الوحدة عادة فى العزل. وفيما يلى معادلة كسب الجهد لمكبر الوحدة:



الشكل (١ - ٢١)

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = 1 \rightarrow 1.10$$

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

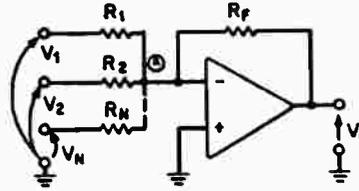
يعتبر المكبر الجامع العاكس هو أحد تطبيقات المكبر العاكس، ويجرى المكبر الجامع عملية جمع لجهود الدخول المختلفة، ولكن مع عكس الإشارة.

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

$$V_o = - \left(\frac{R_F}{R_1} V_1 + \frac{R_F}{R_2} V_2 + \frac{R_F}{R_3} V_3 \right) \rightarrow 1.11$$

فإذا كانت: $R_1 = R_2 = R_3 = R_F$

تصبح $V_o = - (V_1 + V_2 + V_3)$



الشكل (١ - ٢٢)

مثال:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_F = 10K\Omega$$

إذا كان قيم المقاومات كما يلي

$$V_1 = 5V, V_2 = 6V, V_3 = 8V$$

وكانت جهود الدخل كالتالى:

$$V_0 = -(5 + 6 + 8) - 19V$$

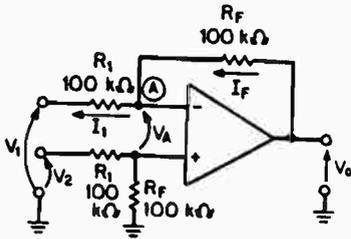
فإن جهد الخرج سيساوى :

فإذا كان جهد مصدر القدرة مساوياً $\pm 15V$ فإن المكبر سوف يتشبع، وبالتالي يصبح مساوياً جهد التشبع V_{sat} - والذي يساوى $13V$ - فى هذه الحالة .

٥ / ٦ / ١ - 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 الطراح) .

والشكل (١ - ٢٣) يعرض دائرة المكبر الفرقى ويمكن الحصول على قيمة جهد الخرج V_0 للمكبر الفرقى من المعادلة 1.12 :



$$V_0 = \frac{R_F}{R_1} (V_2 - V_1) \rightarrow 1.12$$

الشكل (١ - ٢٣)

والجدير بالذكر أن المقاومة الموصلة بين المدخل غير العاكس والأرضى تقوم بضبط أى حيود للخروج عن الصفر فى حالة تساوى الجهدين V_1 و V_2 أو مساواتهما للصفر .

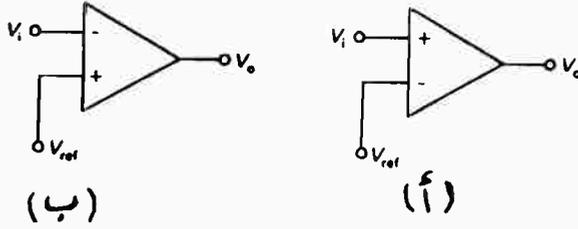
٦ / ٦ / ١ - دائرة مقارن الجهد Voltage comparator

يوجد نوعان من دوائر مقارنات الجهد وهما :

١ - دائرة مقارن الجهد العاكس .

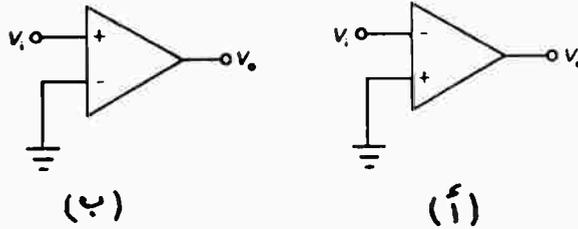
٢ - دائرة مقارن الجهد غير العاكس .

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 .



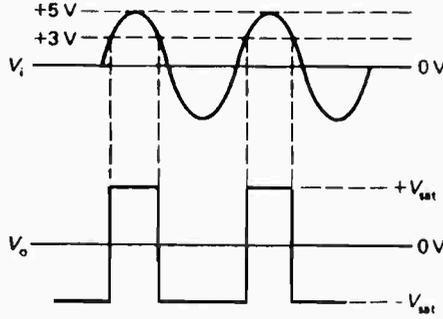
الشكل (١ - ٢٤)

حيث إن: معامل الكسب لمكبر العمليات التي يعمل في حلقة مفتوحة كما هو الحال في المقارن كبير جداً؛ لذا فإن جهد إشارة بالملي فولت يكفي لتشبع المكبر؛ لذا فإن خرج مقارن الجهد دائماً جهد التشبع موجباً أو سالباً $\pm V_{sat}$ ، وفي حالة قيام المقارن بمقارنة إشارة جهد مع $0V$ (جهد الأرضي) 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 جيبيية جهدها الأقصى $5V$ بجهد أساس مستمر يساوي $3V$.



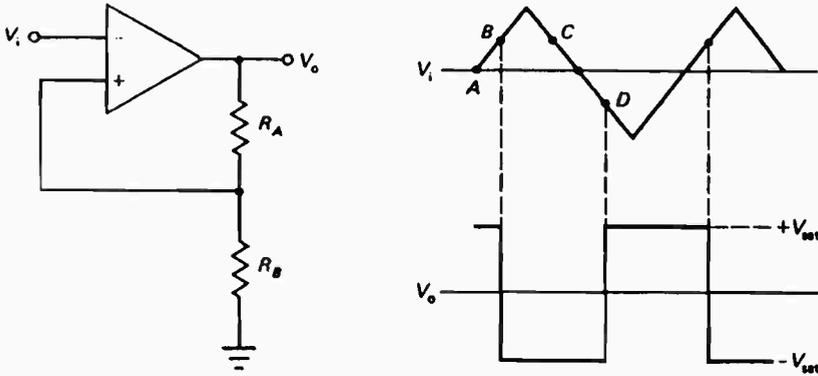
الشكل (١ - ٢٥)

فإذا افترضنا أن مقارن غير عاكس يقارن موجة جيبيية جهدها الأقصى $5V$ مع جهد أساس مستمر يساوي $3V$ 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 $+V_{sat}$ ، وعندما يكون جهد الدخل أصغر من $3V$ فإن خرج المقارن يكون مساوياً $-V_{sat}$ ؛ علماً بأن V_{sat} تساوي $\pm 13V$ تقريباً عندما يكون جهد مصدر القدرة $\pm 15V$.



الشكل (١ - ٢٦)

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



الشكل (١ - ٢٧)

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

السابقة وهكذا.

ويمكن تحديد حدود الرجوعية من المعادلة 1.13 :

$$V_{ref} = \frac{R_B}{R_A + R_B} (\pm V_{sat}) \rightarrow 1.13$$

حيث إن :

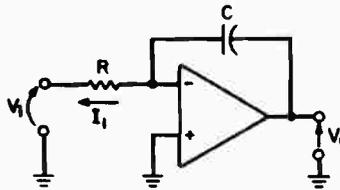
V_{ref} جهد الأساس وهو جهد النقطة B أو النقطة A

V_{sat} جهد التشبع لمكبر العمليات

٧ / ٦ / ١ - دائرة المكبر المكامل Integrator

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

$$V_o = \frac{-1}{RC} \int_0^t V_i dt \rightarrow 1.14$$



الشكل (١ - ٢٨)

وعادة توصل مقاومة بالتوازي مع مكثف دائرة المكامل للأسباب التالية :

- ١ - منع المكبر من تكامل الجهود المستمرة حتى ولو كانت صغيرة والتي قد تؤدي 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 هي قيمة المقاومة الموصلة بالمكثف على التوازي، أما R_1 فهي مقاومة الدخل .

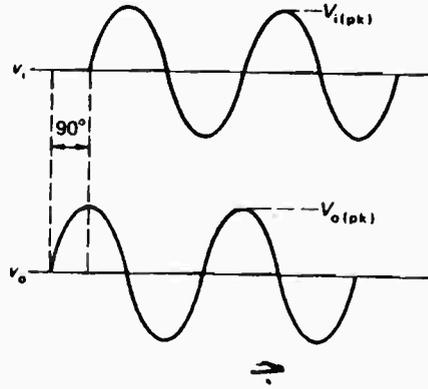
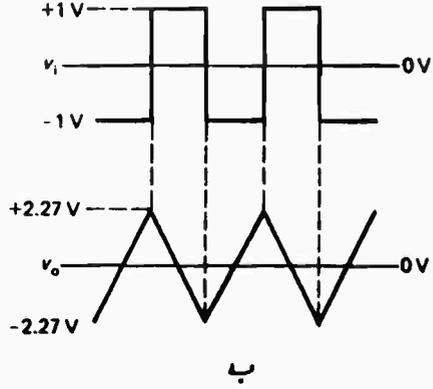
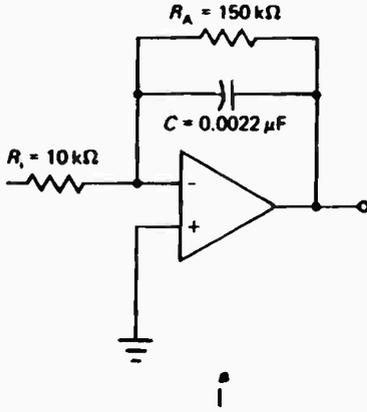
والشكل (١ - ٢٩) يبين دائرة مكامل (أ) وشكل موجة الدخل والخرج عندما تكون موجة الدخل مربعة (ب)، وعندما تكون موجة الدخل جيبيية (ج).

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

$$V_o (PK) = \frac{V_i (PK)}{2\pi F R_1 C} \rightarrow 1.15$$

حيث إن :

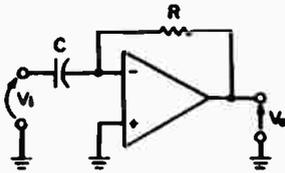
$V_o (PK)$	جهد الخرج الأقصى
$V_i (PK)$	جهد الدخل الأقصى
F	تردد موجة الدخل
π	النسبة التقريبية



الشكل (١ - ٢٩)

١ / ٦ / ٨ - دائرة المكبر المفاضل The differentiator

الشكل (١ - ٣٠) يعرض دائرة المكبر المفاضل وهي تشبه دائرة المكبر الكامل مع تبديل وضع المكثف والمقاومة، والمعادلة 1.15 تعرف العملية التي تجريها هذه الدائرة:



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

الشكل (١ - ٢٠)

وعادة توصل مقاومة RS على التوالي مع المكثف C للمحافظة على الكسب في الترددات العالية

$$\frac{-R}{R_s} \text{ مساوياً .}$$

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

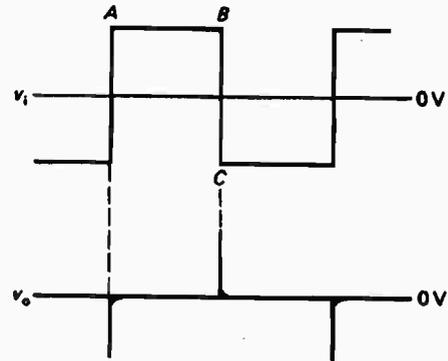
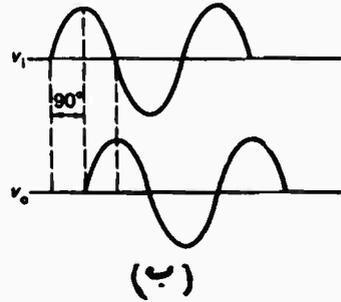
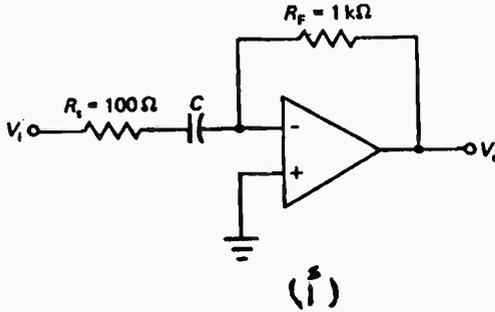
١ - عندما تكون الموجة الداخلة جيبيية . ٢ - عندما تكون الموجة الداخلة مربعة .
ويلاحظ أن الموجة الجيبيية عند تفاضلها تكون جيبيية ولكن بإزاحة 90° جهة اليمين، علماً بأن جهد الخرج الأقصى للمفاضل عندما يكون دخله موجة جيبيية نحصل عليه من المعادلة 1.16:

$$V_o (PK) = 2 \pi F R_F C V_i (PK) \rightarrow 1.16$$

حيث إن:

F	تردد الموجة الداخلة	$V_o (PK)$	جهد الخرج الأقصى
π	النسبة التقريبية	$V_i (PK)$	جهد الدخل الأقصى

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

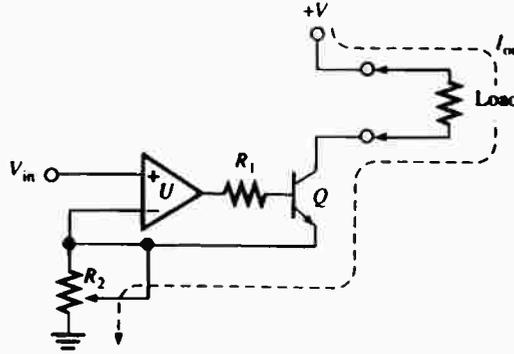


الشكل (١ - ٣١)

(ج)

١ / ٦ / ٩ - دائرة محول الجهد لتيار

من المعلوم أن مكبرات العمليات هي مكبرات جهد وأكثر هذه المكبرات تكون لها خرج تيار محدد الأمر الذي 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 في هذه الدائرة نجد أنها دائرة مكبر عاكس، حيث يتحكم جهد خرج المكبر في 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:

$$V_{in} = I_{out} R_2$$

وبالتالى نحصل على قيمة تيار الخرج من المعادلة 1.17:

$$I_{out} = \frac{V_{in}}{R_2} \rightarrow 1.17$$

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

والجددير 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 .

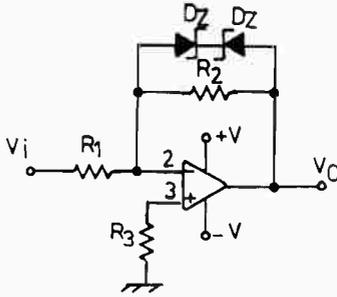
١٠ / ٦ / ١ - دائرة مكبر القص Clipping

الشكل (١ - ٣٣) يعرض دائرة مكبر القص، حيث يعمل مكبر العمليات

كمكبر عاكس بطريقة طبيعية إذا كان جهد

الخروج V_o يحقق العلاقة 1.18 :

$$V_o < (V_z + 0.7) \rightarrow 1.18$$



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

القصى للخرج $\pm(V_z + 0.7V)$ ، والمعادلة 1.19

تعرف عمل دائرة مكبر القص إذا تحققت العلاقة 1.18 :

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_2}{R_1} \rightarrow 1.19$$

٧ / ١ - المرشحات الفعالة Active Filter

تبني المرشحات الفعالة بمكبرات العمليات وذلك بعمل تغذية مرتدة موجبة

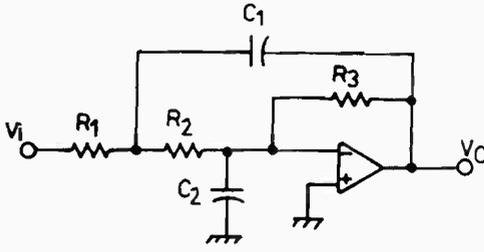
وتغذية مرتدة سالبة، ويوجد عدة أنواع من هذه المرشحات وهم كما يلي :

١ - مرشح تمرير الترددات المنخفضة Active low pass Filter :

الشكل (١ - ٣٤) يعرض دائرة مرشح تمرير الترددات المنخفضة ويقوم هذا

المرشح بتمرير الترددات التي تتراوح ما بين (0:Fc)، حيث إن Fc هو تردد القطع ويعين

من المعادلة 1.20 :



الشكل (١ - ٣٤)

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

علماً بأن قيمة المقاومة R_3 تساوى مجموع قيم المقاومتين R_1, R_2 ، ويكون جهد الخرج ثابتاً وصولاً لتردد القطع F_c عنده ينخفض جهد الخرج إلى 0.707 من القيمة العظمى للخروج.

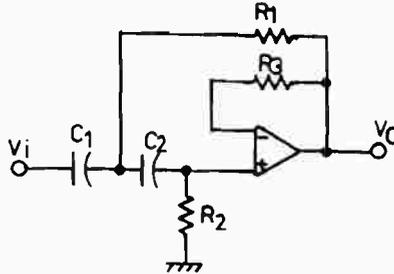
٢ - مرشح تمرير الترددات العالية **Active high pass Filter** :

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

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

ويجب أن يكون :

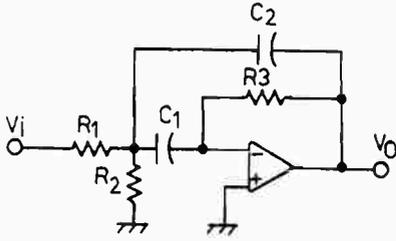
$$C_1 = C_2, R_2 = 2R_1, R_3 = R_2$$



الشكل (١ - ٣٥)

٣ - مرشح تمرير الحزمة الفعال Active band pass Filter :

الشكل (١ - ٣٦) يعرض دائرة مرشح تمرير الحزمة الفعال ويسمح هذا المرشح



الشكل (١ - ٣٦)

بتمرير مجموعة محددة من الترددات في حين يمنع مرور باقي الترددات، ويكون خرج هذا المرشح أكبر ما يمكن عند تردد الرنين F_r والذي يعين من المعادلة 1.22 :

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

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 التي تمر في هذا المرشح BW من المعادلة 1.24 :

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

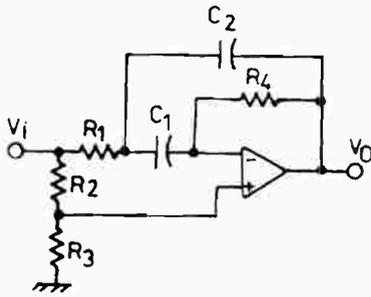
ويعين عامل الجودة Q من المعادلة 1.25 إذا كان $C_1 = C_2$:

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

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 :



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

ويعين تردد الرنين Fr من المعادلة 1.27 :

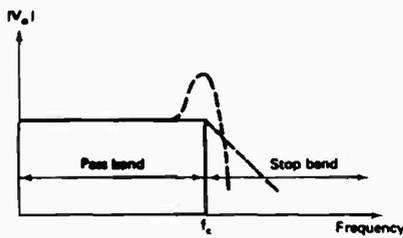
$$Fr = \frac{1}{2\pi \sqrt{R1 R2 C1 C2}} \rightarrow 1.27$$

الشكل (١ - ٣٧)

ويعين عامل الجودة Q من المعادلة 1.28 :

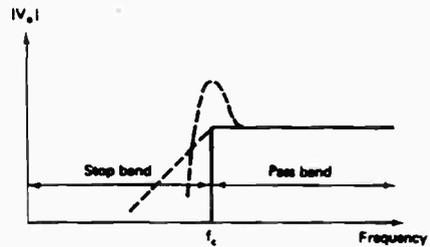
$$Q = 0.5 \sqrt{\frac{R4}{R1}} \rightarrow 1.28$$

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



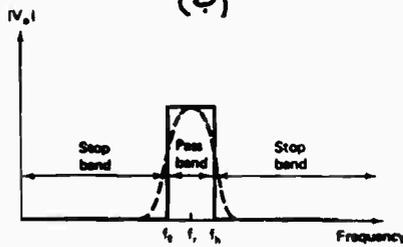
Low-pass filter

(ب)



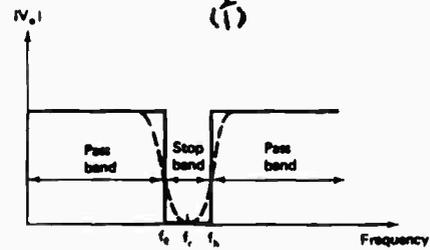
High-pass filter

(أ)



Bandpass filter

(د)



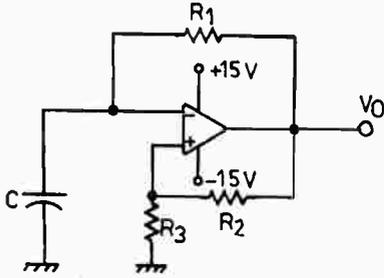
Band-elimination filter

(ج)

الشكل (١ - ٣٨)

٨ / ١ - المذبذبات المرتكزة على مكبرات العمليات

أولاً: مولدات الموجة المربعة



الشكل (١ - ٣٩)

الشكل (١ - ٣٩) يعرض دائرة مولد موجة مربعة. ويعمل المكبر A كمكبر فرقى، فعند توصيل التيار الكهربى للدائرة يكون جهد المدخل العاكس (-) فى بادئ الأمر 0V ويكون جهد المدخل غير العاكس (+) أعلى من (0V)؛ نتيجة مرور التيار الانحيازى عبر

المقاومة R3 فيصبح خرج المكبر $+V_{sat}$ (جهد التشبع الموجب) ويبدأ المكثف فى الشحن عبر المقاومة R1 ويصبح جهد المدخل غير العاكس (+) مساوياً لجهد العتبة V_T 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 V_T فى هذه الحالة يصبح خرج المكبر $-V_{sat}$ - وتباعاً يصبح جهد المدخل غير العاكس مساوياً $-V_T$ ، ويبدأ المكثف C فى تفريغ شحنته ثم الشحن فى الاتجاه العاكس وعند وصول الجهد على المكثف أقل من $-V_T$ يصبح خرج المكبر $+V_{sat}$ ، وتكرر دورة التشغيل ونحصل على تردد الخرج من المعادلة 1.30:

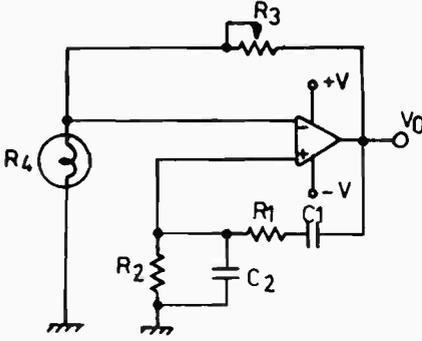
$$F = \frac{1}{2 R_1 C} \rightarrow 1.30$$

وذلك عندما يكون $R_3 = 0.86 R_2$.

علما بأن جهد التشبع V_{sat} 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) .

ثانياً : مولدات الموجات الجيبية



الشكل (١ - ٤٠)

سنتناول في هذه الفقرة مذبذب قنطرة وين ، والذي يتركز على مكبر عمليات ، وذلك لتوليد مدى واسع من الموجات الجيبية ، وبالشكل (١ - ٤٠) مذبذب قنطرة وين Wien ، فتشكل المقاومات R_3 , R_4 ذراعين من قنطرة وين ، فى حين أن الذراع الثالث يتشكل بواسطة R_1 , C_1 والذراع الرابع يتشكل بواسطة R_2 , C_2 وتوفر المقاومات R_3

R_4 , مسار التغذية المرتدة السالبة فى جميع الترددات فى حين أن R_2 , C_2 , R_1 , C_1 توفر مسار التغذية المرتدة الموجبة .

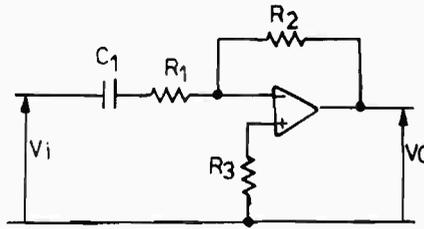
والجدير بالذكر أن R_4 عادة تكون مصباحاً متوهجاً للمحافظة على جهد خرج ثابت ، وذلك لأن المصباح ذو الفتيلة (المتوهج) له مقاومة لها معامل حرارى موجب PTC ، أى أن مقاومته تزداد كلما ازدادت درجة الحرارة ، فكلما ازداد جهد الخرج زادت مقاومة المصباح (لارتفاع درجة حرارتها) فيزداد جهد التغذية المرتدة السالبة فيقل 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 R_3 ، وهناك مشكلة فى تنفيذ هذه الدائرة ، وهو أن المصباح ذو الفتيلة R_4 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 .

٩ / ١ - تشغيل مكبرات العمليات في دوائر التيار المتردد

في جميع الدوائر التي تناولناها في 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 في بعض التطبيقات عند دخول إشارة مترددة محملة على جهد مستمر، في مثل هذه التطبيقات يمكن توصيل مكثف ذات قيمة مناسبة على التوالى مع مدخل المكبر كما هو مبين بالشكل (١ - ٤١). وينبغي اختيار هذا المكثف بحيث تكون معاوقته أصغر بكثير من مقاومة الدخل للمكبر عند التردد الأدنى المسلط على المدخل.



الشكل (١ - ٤١)

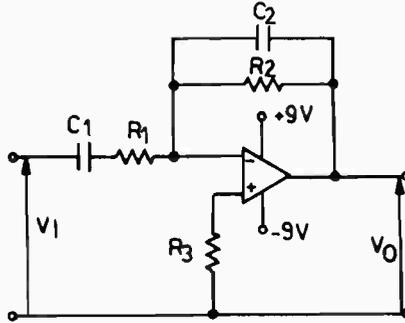
والجدير بالذكر أنه في دوائر المكبرات غير العاكسة فإن مقاومة الدخل تكون عالية جداً؛ لذلك فإن مكثفاً غير الكتروليتي سعته 100nF يكون ملائم جداً. أما في حالة دوائر مكبرات العاكسة والتي لها مقاومة دخل أقل بكثير فينبغي اختيار مكثفات لها سعرات أكبر من 100nF، والشكل (١ - ٤٢) يعرض دائرة مكبر عاكس يستخدم في دوائر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

ويعين تردد القطع الأدنى FCL من المعادلة 1.32:

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

ويعين تردد القطع الأقصى FCH من المعادلة 1.33 :

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



الشكل (١ - ٤٢)

ف عند استخدام العناصر التالية :

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

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

ويكون معامل الكسب مساوياً :

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

ويكون معامل الكسب بالديسيبل مساوياً:

$$A_v = 20 \log \frac{R_2}{R_1} = 20\text{dB}$$

ومقاومة الدخل تساوى R_1 أى $10\text{K}\Omega$.

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

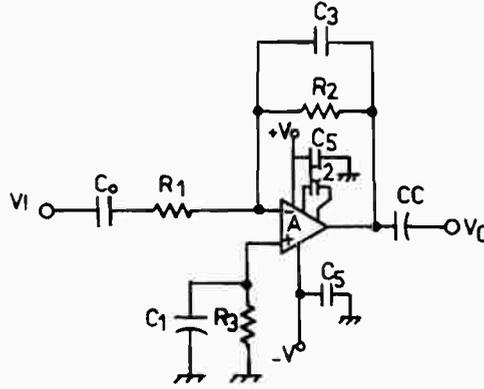
$$BW = F_{CH} - F_{CL} \rightarrow 1.34$$

$$= 5000 - 100 = 4900 \text{ HZ}$$

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

حيث إن :

R1	مقاومة كربونية $10\text{K}\Omega$
R2	مقاومة كربونية $100\text{K}\Omega$
R3	مقاومة كربونية $4.7\text{K}\Omega$
C0	مكثف بوليستير 150nF
C1	مكثف كيميائى $10\mu\text{F}$
C2	مكثف بوليستير $0.022\mu\text{F}$
C3	مكثف بوليستير 330PF
C5	مكثف بوليستير $0.1\mu\text{F}$
Cc	مكثف كيميائى $10\mu\text{F}$
A	مكبر عمليات طراز TLO81



الشكل (١ - ٤٣)

والجدير بالذكر أن المقاومة R_3 تعمل على إزالة الحيوود الناتج عن تيارات الدخل الانحيازية وتساوى:

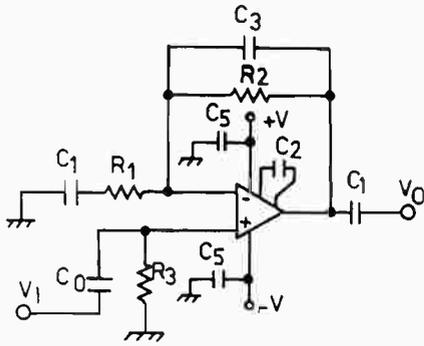
$$R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

– المكثف C_3 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 F_{CH} هو تردد القطع الأقصى .
- المكثف C_5 يوصل مع أطراف المصدر ويسمى بمكثف ربط المصدر .
- المكثف C_0 يعمل على منع دخول الإشارات المستمرة على المدخل العاكس .
- المكثف C_C يمنع ارتداد التيارات المستمر من المخرج إلى المدخل العاكس .
- المكثف C_2 يعمل على تعويض التردد .



والشكل (٤٤ - ١) يعرض دائرة مكبر غير عاكس يعمل في دوائر التيار المتردد.

حيث إن: الكسب يساوى:

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

الشكل (٤٤ - ١)

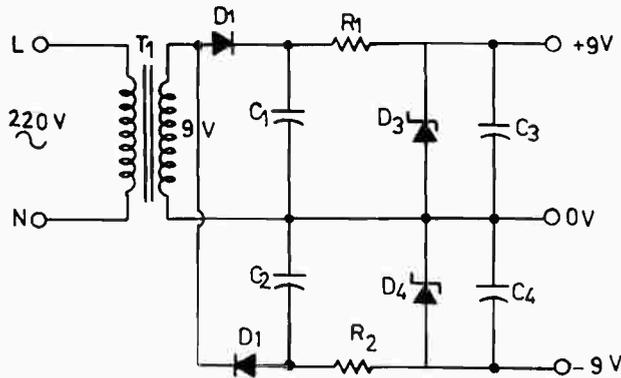
والجدير بالذكر أن جميع المكثفات المستخدمة في هذه الدائرة لا تختلف عن المستخدمة في الدائرة السابقة عدا أن المكثف C_1 يعين من المعادلة 1.36:

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

علماً بأن F_{CL} هو تردد القطع الأدنى.

١٠ / ١ - مصادر القدرة لمكبرات العمليات القياسية

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

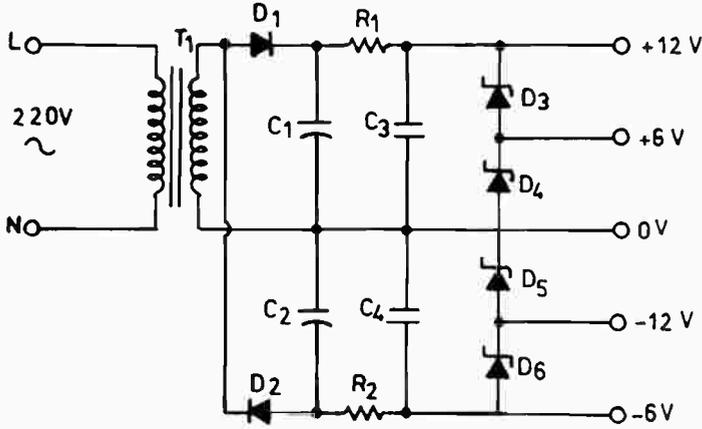


الشكل (٤٥ - ١)

عناصر الدائرة:

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

والشكل (١ - ٤٦) يعرض دائرة أخرى لمصدر قدرة مزدوج ومنتظم لمكبرات العمليات يعطي الجهود الآتية ($+12, +6, 0, -6, -12\text{V}$).



الشكل (١ - ٤٦)

عناصر الدائرة:

R_1, R_2	مقاومة قيمتها 100Ω وقدرتها 5W
C_1, C_2	مكثف كيميائي $1000\mu\text{F}/25\text{V}$
C_3, C_4	مكثف سيراميك سعته $0.1\mu\text{F}$
D_1, D_2	موحد سليكوني طراز DR - 50

D3 , D4 موحد زينر جهده 6V وقدرته 1W

T1 محول خفض 220/15V وتياره 1A

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

عناصر الدائرة:

R1 , R2 مقاومة كربونية 1.2K Ω

C1 , C2 مكثفات كيميائية 4700 μ F/40V

C3 , C4 , C5 , C6 مكثفات سيراميك قرصية 100nF

C7 , C8 مكثفات كيميائية 10 μ F/40V

D1 , D4 موحّدات سليكونية طراز 1N5401

IC1 دائرة متكاملة لمنظم جهد ثلاثى طراز 7815

IC2 دائرة متكاملة لمنظم جهد ثلاثى طراز 7915

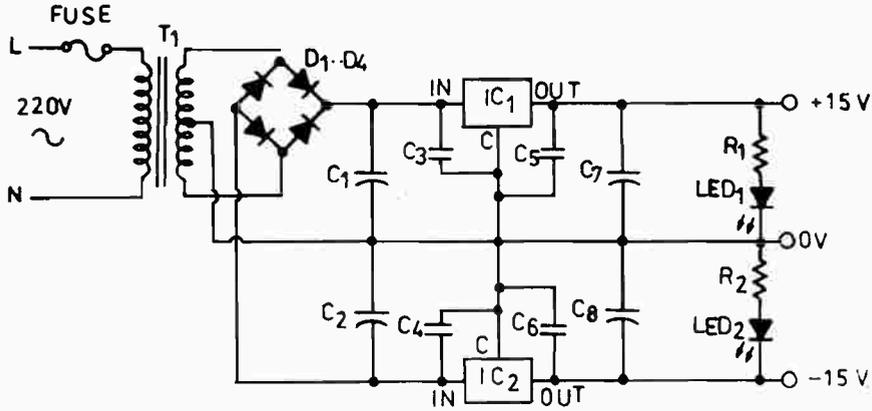
T. محول (18 - 0 - 220/18) وتياره 1A

Fuse مصهر (50mA) بالقاعدة

LED1 , LED2 موحد باعث للضوء قياسي 10mA

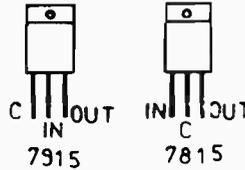
مبددات حرارة لتثبيت منظمات الجهد أبعادها

(1.5 x 1cm) من الألومنيوم وسمكها 2mm



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)

١١ / ١ - تشغيل مكبرات العمليات من مصدر قدرة أحادى

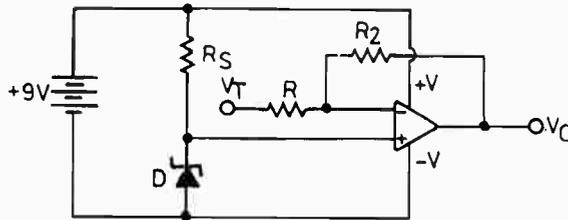
فى بعض التطبيقات يستخدم مصدر قدرة موجب أو سالب لتغذية مكبرات العمليات، والشكل (١ - ٤٩) يعرض طريقة توصيل مكبر عمليات من مصدر قدرة أحادى موجب باستخدام موحد زينر، ويجب أن يكون جهد موحد الزينر D مساوياً نصف جهد المصدر أى 4.5V فى هذه الحالة، ويجب أن يكون فقد الجهد فى

المقاومة R_S مساوياً نصف جهد المصدر أيضاً أى $4.5V$ أى أن :

$$I_Z R_S = \frac{V_{DD}}{2} \rightarrow 1.37$$

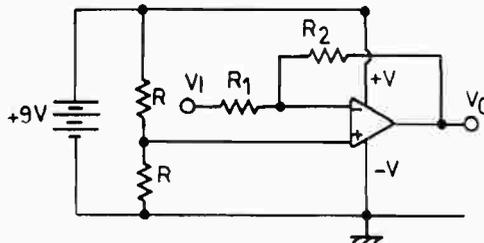
حيث إن :

V_{DD} هو جهد المصدر الذى يساوى $9V$ فى هذه الحالة، أما I_Z فهو تيار موحد الزنير، وبمعلومية تيار موحد الزنير I_Z يمكن تعيين قيمة المقاومة R_S 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)

١٢ / ١ - اعتبارات خاصة عند تنفيذ دوائر مكبرات العمليات

بعد أن اكتسبنا بعض المعلومات العملية عن مكبرات العمليات جاء الدور لاستعراض بعض الملاحظات التي يجب مراعاتها عند التعامل مع مكبرات العمليات، خصوصاً وأنها ذات كسب كبير، وأن حجم الدوائر المتكاملة لمكبرات العمليات صغير، الأمر الذي يجعل أرجل الدخل والخرج قريبة من بعضها، وهذا يؤدي إلى حدوث تغذيات مرتدة غير مرغوبة تؤدي إلى إحداث تذبذب في الخرج، ومن أجل تلافى هذه التذبذبات في الخرج، هناك بعض الملاحظات التي 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 في حالة عدم جودة التأسيس.

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 في جهد مصدر القدرة أو حالات الانتقال العابر Transient.

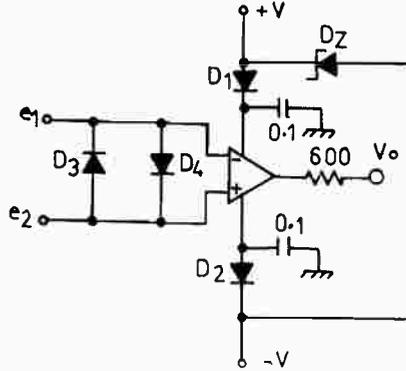
٢ - انعكاس أطراف مصدر القدرة.

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 الحماية اللازمة، أما بعض مكبرات العمليات مثل 709 فهي تحتاج

لأخذ الحماية اللازمة في الاعتبار، وسوف نستعرض باختصار جميع الحماية اللازمة لمكبرات العمليات، والشكل (١ - ٥١) يعرض جميع الحماية اللازمة لمكبرات العمليات .



الشكل (١ - ٥١)

فالموحدات $D1$, $D2$ تحمي مكبر العمليات من انعكاس أطراف مصدر القدرة، فعند انعكاس أطراف مصدر القدرة يصبح $D1$, $D2$ في حالة قطع لأنهم سيكونوا في حالة انحياز عكسي .

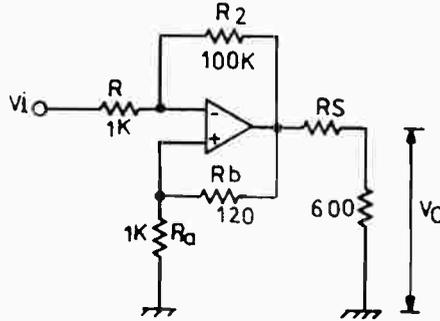
أما موحد الزينر فيعمل على حماية مكبر العمليات من ارتفاع الجهد الناتج عن الجهود العابرة، والناتجة عن مكثفات التعويض، ارجع للشكل (١ - ٤١)، وذلك لتفريغ شحناتها بعد فصل التيار الكهربى عن الدائرة .

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

وتوصل الموحدات $D3$, $D4$ بالتوازي خلفاً لخلق، 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 يؤدي إلى زيادة استهلاك القدرة

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



الشكل (١ - ٥٢)

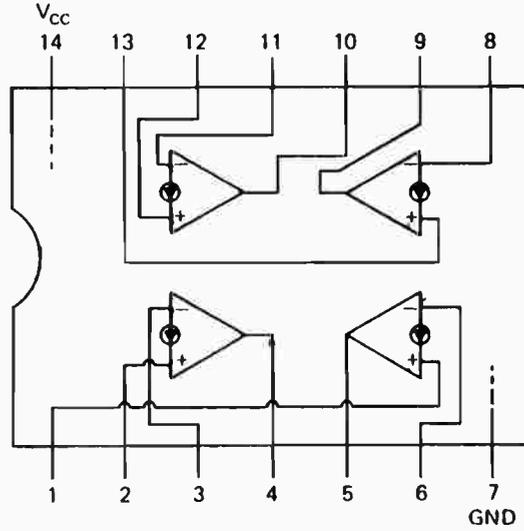
حيث إن:

R_1, R_a	مقاومة كربونية $1K\Omega$
R_2	مقاومة كربونية $100K\Omega$
R_s	مقاومة كربونية 100Ω
R_b	مقاومة كربونية 120Ω

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

١٣/١ - مكبرات التيار الفرقية Current Differencing Amplifier

من المعروف أن مكبرات العمليات القياسية تحتاج عادة إلى مصدر قدرة مزدوج وله جهد عالي مقارنة بجهد الدوائر الرقمية، وهذا في الحقيقة يمثل كثيراً من المتاعب لتوفير هذا المصدر؛ لذلك قامت الشركات المصنعة بتوفير مكبرات تعمل من مصدر قدرة أحادي 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 الأفقي لهاتين الدائرتين.



الشكل (١ - ٥٣)

وفيما يلي 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 $10K\Omega$ يساوي 70dB

تردد كسب الوحدة يساوي 2.5MHZ

مقاومة الدخل تساوي $1M\Omega$

مقاومة الخرج تساوي $8M\Omega$

جهد الخرج يساوي جهد الدخل مطروح منه 1

تيار الدخل الانحيازي 30nA

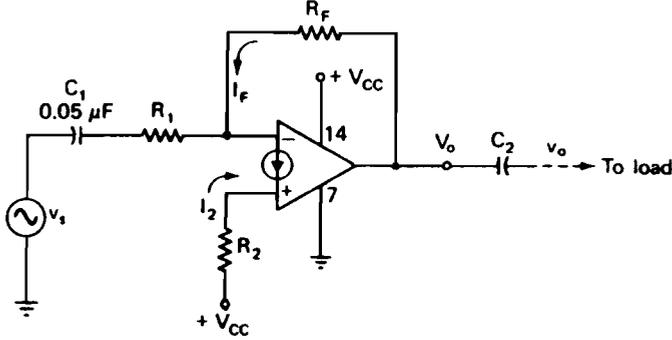
معدل الإمالة يساوي (0.5V/ μ S).

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

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 R1 ومصدر جهد الإشارة Vs ويعين كسب جهد الدائرة من المعادلة 1.38 :

$$A_v = \frac{V_o}{V_s} \simeq \frac{-R_F}{R_1} = \rightarrow 1.38$$

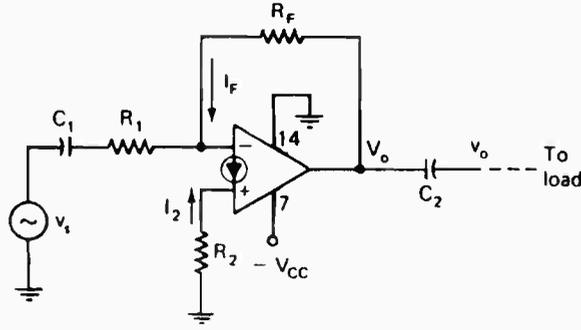
فإذا كان :

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

فإن كسب الدائرة مساوى 10 - .

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

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



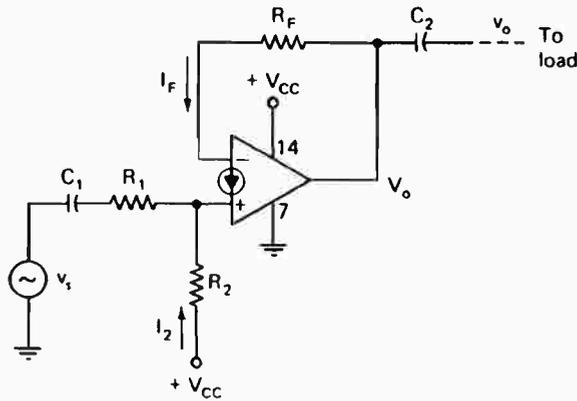
الشكل (١ - ٥٥)

ويعين معامل كسب الدائرة من المعادلة 1.38، ويكون جهد الخرج المستمر مساوياً

$$\frac{-V_{CC}}{2} \text{ إذا تحقق الشرط التالي } (R_2 = 2R_F).$$

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، وفي هذه الدائرة يتم تغذية المكبر من مصدر قدرة أحادي موجب.



الشكل (١ - ٥٦)

ويعين كسب الدائرة من المعادلة 1.39 :

$$A_v = \frac{V_o}{V_s} = \frac{R_F}{R_1} = \rightarrow 1.39$$

ولكى يكون جهد الخرج المستمر مساوياً تقريباً نصف جهد

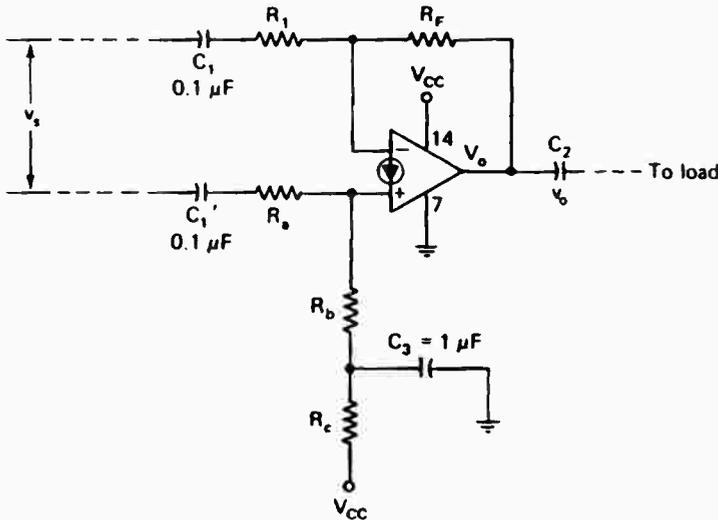
$$\text{المصدر (} V_o = \frac{V_{CC}}{2} \text{) يجب أن يتوفر الشرط التالي (} R_2 = 2R_F \text{).}$$

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 :

$$A_v = \frac{V_o}{V_s} \cong \frac{-R_F}{R_1} = \rightarrow 1.40$$



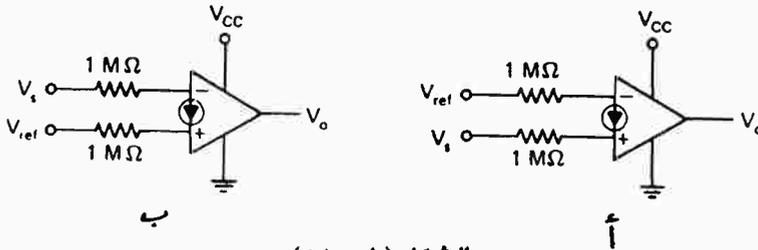
الشكل (١ - ٥٧)

ولكى يكون جهد الخرج المستمر مساوياً ($V_O = \frac{V_{CC}}{2}$) يجب أن يتحقق الشرط التالي ($R_b + R_C = 2R_F$).

ومن أجل الوصول إلي أداء جيد للمكبر يجب أن يتحقق الشرط التالي ($\frac{R_F}{R_1} = \frac{R_b}{R_a}$).

١ / ١٣ / ٤ - دوائر المقارنات

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



الشكل (١ - ٥٨)

ففي الشكل أ يكون جهد الخرج V_O مساوياً صفراً عندما يكون $V_S < V_{ref}$ ، ويكون جهد الخرج V_O مساوياً V_{CC} عندما يكون $V_S > V_{ref}$ وفي هذه الحالة يسمى المقارن بمقارن غير عاكس لدخول جهد الدخل V_S على المدخل غير العاكس (+).

وفي الشكل (ب) يكون جهد الخرج V_O مساوياً صفراً، عندما يكون $V_S > V_{ref}$ ، ويكون جهد الخرج V_O مساوياً V_{CC} عندما يكون $V_S < V_{ref}$ ، ويسمى المقارن في هذه الحالة بمقارن عاكس لدخول جهد الدخل V_S على المدخل العاكس (-)؛ علماً بأن V_{ref} تعني جهد الأساس.

١ / ١٤ - دوائر مقارنات الجهد المتكاملة

قامت بعض الشركات المصنعة بتصنيع بعض الدوائر المتكاملة التي تعمل

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

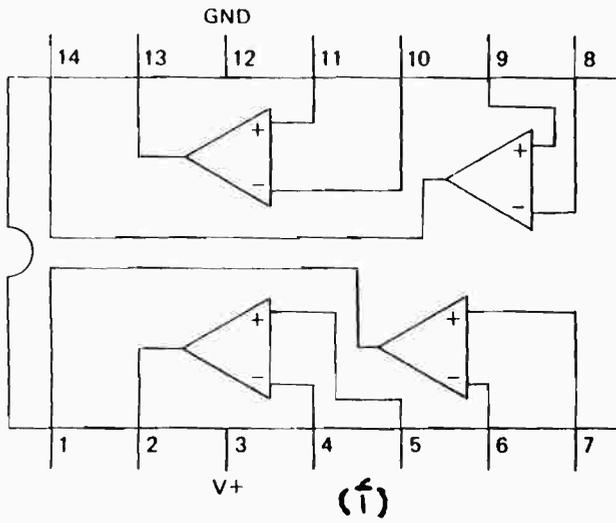
LM339A , LM239A , LM139A , LM 2901

والمصنعة بشركة National وكذلك شركة Signetics .

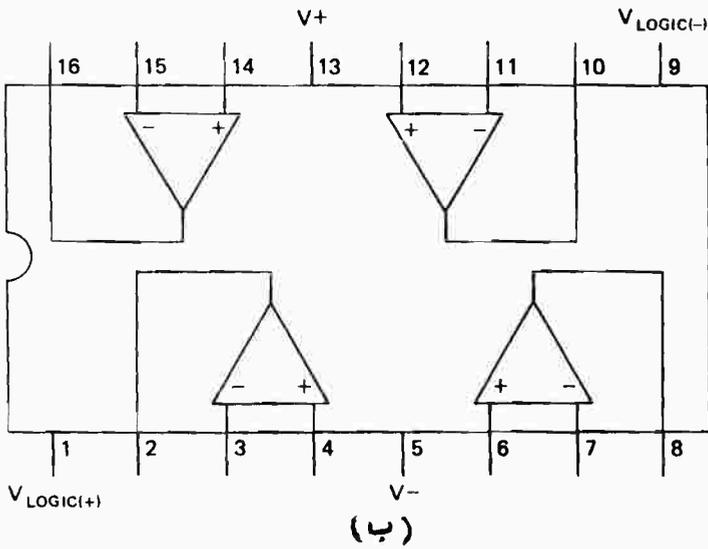
والشكل (ب) للدوائر المتكاملة التالية HA4905 , HA4900 والمصنعة بشركة

.Harris

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



(a)



الشكل (١ - ٥٩)