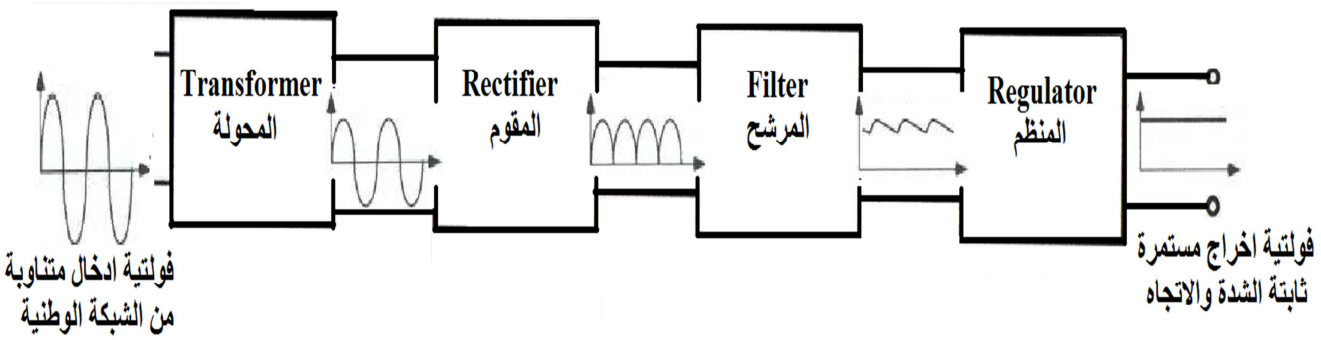
١.٣ التقويم الموجي

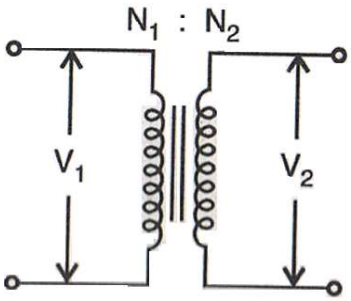
ان معظم الأجهزة الإلكترونية (مثل التلفاز، الحاسوب، مشغل الأقراص المدمجة، الهواتف النقالة، مصابيح الإنارة الاقتصادية، وغيرها) تكون بحاجة إلى فولتية مستمرة للقيام بعملها، وحيث ان الشبكة الوطنية تجهز الدور بفولتية متناوبة (قيمتها الفعالة في العراق $V_{rms}=220V$ وترددها $f=50Hz$، بينما في أمريكا $V_{rms}=120V, f=60Hz$, اما في اوربا فهي $V_{rms}=240V, f=60Hz$) ، لذلك فلتشغيل تلك الأجهزة لا بد من تحويل الفولتية المتناوبة إلى فولتية مستمرة، ويسمى الجهاز الذي يقوم بهذه العملية بمجهز القدرة المستمر (DC Power Supply). ان مجهز القدرة المستمر يتكون من عدة مراحل، كما موضح بالمخطط (٣-١):



شكل ٣-١: مخطط لمجهز القدرة المستمر

كما نلاحظ من المخطط ان مجهز القدرة المستمر يتكون من أربعة مراحل تبدأ بالمحولة ومن ثم المقوم والمرشح وأخيرا دائرة المنظم، وسنورد الآن بعض المفاهيم الأساسية المتعلقة بالمحولة الكهربائية، اما الأجزاء الثلاثة المتبقية فسيفرد لكل منها فقرة خاصة بها.

الشكل (٣-٢) يمثل رمز المحولة وتمثل N_1 عدد لفات الملف الابتدائي، بينما تمثل N_2 عدد لفات الملف الابتدائي، والعلاقة التي تربط بين القيمة الفعالة لفرق الجهد على طرفي الملف الابتدائي V_1 والقيمة الفعالة لفرق الجهد على طرفي الملف الثانوي V_2 هي:



شكل ٣-٢: رمز المحولة

$$\frac{V_2}{V_1}=\frac{N_2}{N_1}\Rightarrow V_2=\frac{N_2}{N_1}V_1 \qquad (3-1)$$

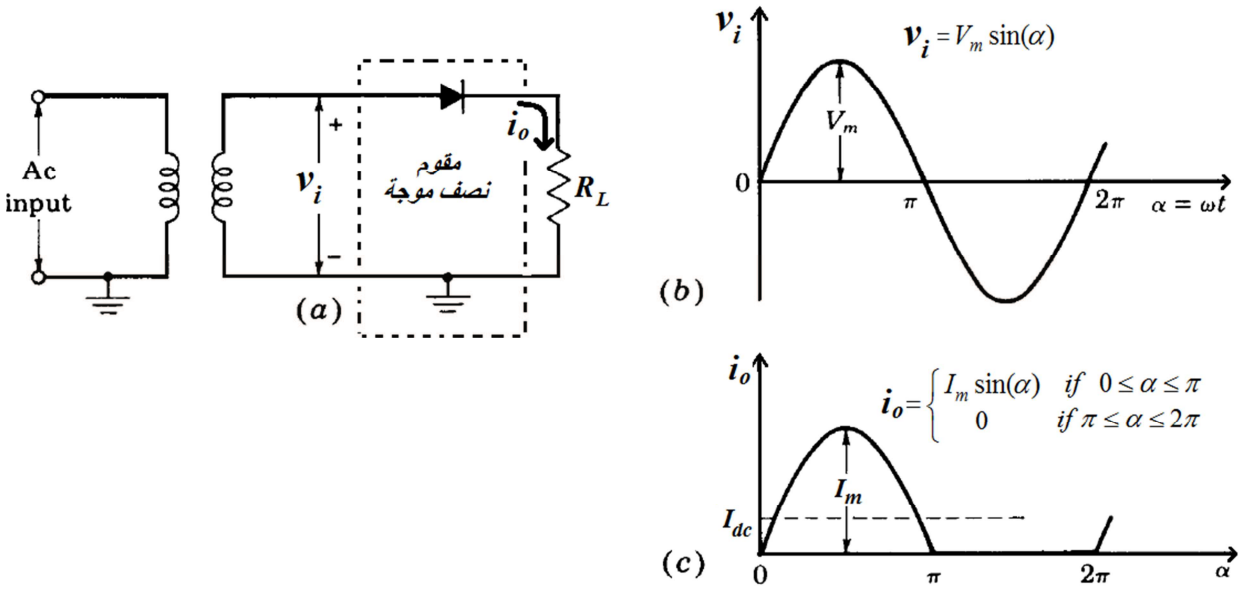
ان استعمال المحولة في دائرة مجهز القدرة هو لسببين هما:

١. لخفض (أو رفع) الفولتية لقيمة مناسبة لعمل بقية أجزاء المجهز ووفقاً للفولتية المستمرة المطلوبة.
٢. لعزل الدائرة عن خط القدرة (الشبكة الوطنية) مما يقلل من احتمال الإصابة بالصدمة الكهربائية.

تعرف دوائر التقويم الموجي بانها دوائر تقوم على تحويل الفولتية المتناوبة (متغيرة الشدة والاتجاه) إلى فولتية مستمرة نبضية (متغيرة الشدة وثابته الاتجاه). يكون للثنائي البلوري دور أساسي في دوائر التقويم الموجي وذلك لامتلاكه الخاصية بكونه يُبدي مقاومة قليلة لسريان التيار في اتجاه معين (عندما ينحاز أماميا) ولا يسمح لسريان التيار بالاتجاه المعاكس (عندما ينحاز عكسياً)، وبعبارة أخرى انه يسمح بمرور التيار باتجاه واحد. بشكل عام هناك نوعان من دوائر التقويم الموجي وهي مقوم نصف الموجة ومقوم الموجة الكاملة.

١.١.٣ مقوم نصف الموجة (Half-Wave Rectifier):

الشكل (٣–٣) يوضح مقوم نصف موجة وشكل الموجة الداخلة للمقوم والخارجة منه.



شكل ٣–٣: دائرة مقوم نصف الموجة

خلال النصف الأول من فولتية الإدخال للمقوم يكون الثنائي منحاز أماميا ويسمح الثنائي بمرور التيار من خلاله، وبأخذ المقاومة الأمامية للثنائي بنظر الاعتبار وتطبيق قانون كيرشوف الخاص بفروق الجهد نحصل على:

$$v_i - i_o r_B - i_o R_L = 0$$

$$i_o = \frac{v_i}{R_f + R_L}, \quad But \quad v_i = V_m \sin(\alpha) \ \ for \quad 0 \le \alpha \le \pi$$

$$i_o = \left(\frac{V_m}{R_f + R_L}\right)\sin(\alpha) \quad for \quad 0 \le \alpha \le \pi$$

$$\boxed{i_o = I_m \sin(\alpha)} \quad , \quad \boxed{I_m = \frac{V_m}{R_f + R_L}} \qquad for\ 0 \le \alpha \le \pi$$

$$\boxed{v_o = i_o R_L}$$

حيث v_i تمثل القيمة الآنية لفولتية الإدخال، i_o تمثل القيمة الآنية لتيار الإخراج، V_m اقصى قيمة يمكن ان تصل اليها فولتية الإدخال، I_m اقصى قيمة يمكن ان تصل اليها تيار الإخراج، R_L مقاومة الحمل، R_f مقاومة الثنائي في حالة الانحياز الأمامي، v_o فولتية الإخراج (فرق الجهد على طرفي مقاومة الحمل). وفي حالة اخذ تأثير جهد الحاجز للوصلة فان قيمة ذروة الإخراج تصبح بالصورة:

$$I_m = \frac{V_m - V_B}{R_f + R_L} \quad \text{for } 0 \le \alpha \le \pi$$

خلال النصف السالب من فولتية الإدخال يكون الثنائي محازاً عكسياً ولا يسمح بمرور التيار وعندها يكون:

$$i_o = v_o = o \qquad \text{for} \qquad \pi \le \alpha \le 2\pi$$

نلاحظ من الشكل الخاص بمقوم نصف الموجة ان زمن الإخراج هو نفسه زمن الإدخال أي ان:

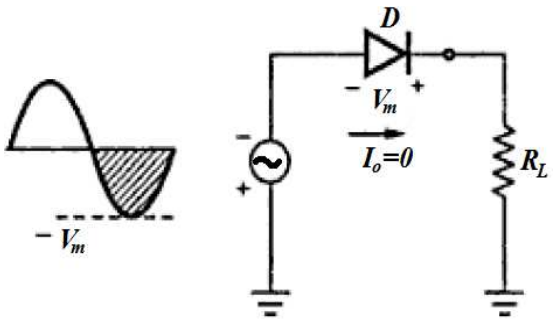
$$T_o = T_i \quad so, \ \boxed{f_o = f_i} \ \text{for Half – Wave Rectifier}$$

أي انه في حالة مقوم نصف الموجة فان تردد الإخراج هو نفسه تردد الإدخال.

في حالة الانحياز العكسي يجب ان لا تتجاوز الفولتية العكسية المسلطة على طرفي الثنائي فولتية الانهيار التهدمي الخاصة به، وتسمى اعظم قيمة للفولتية العكسية التي يجب ان يتحملها الثنائي بفولتية الذروة العكسية (PIV) (Peak Inverse Voltage).

الشكل المجاور يوضح ان اعظم فولتية الذروة العكسية في حالة مقوم نصف الموجة هي:

$$\boxed{PIV = V_m} \ \text{for Half – Wave Rectifier}$$



من الأمور المهمة في أي مقوم هو مقدار المركبة المستمرة (معدل القيمة المستمرة) التي تخرج من المقوم و يعبر عنها بالعلاقة التالية:

$$I_{dc}=\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} i_o\, d\alpha \quad , i_o=\begin{cases} I_m\sin(\alpha) & for\ 0\le\alpha\le\pi \\ 0 & for\ \pi\le\alpha\le 2\pi \end{cases}$$

وبالتعويض عن قيمة التيار نجد:

$$I_{dc}=\frac{1}{2\pi}[\int_0^{\pi} I_m\sin(\alpha)\,d\alpha+\int_{\pi}^{2\pi}(0)\,d\alpha]=\frac{I_m}{2\pi}[-\cos(\alpha)]_0^{\pi}=\frac{I_m}{2\pi}[-(-1-1)]$$

$$\boxed{I_{dc}=\frac{I_m}{\pi}}\ \text{for Half}-\text{Wave Rectifier}$$

وبنفس الطريقة يكون :

$$\boxed{V_{dc}=\frac{V_m}{\pi}}\ \text{for Half}-\text{Wave Rectifier}$$

اما القيمة الفعالة للفولتية الخارجة من مقوم نصف الموجة فتعطى بالعلاقة:

$$I_{rms}=\sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}(i_o)^2 d\alpha}=\sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi}[I_m\sin(\alpha)]^2 d\alpha+\frac{1}{2\pi}\int_{\pi}^{2\pi}[0]^2 d\alpha}$$

$$I_{rms}=\sqrt{\frac{I_m^2}{2\pi}\int_0^{\pi}\sin^2(\alpha)d\alpha}$$

بالاستفادة من المتطابقة المثلثية $\sin^2\alpha=\frac{1}{2}(1-\cos 2\alpha)$ وحل التكامل نحصل على:

$$I_{rms}=I_m\sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi}\frac{1}{2}(1-\cos 2\alpha)d\alpha}=I_m\sqrt{\frac{1}{4\pi}[\int_0^{\pi}d\alpha-\int_0^{\pi}\cos 2\alpha d\alpha]}$$

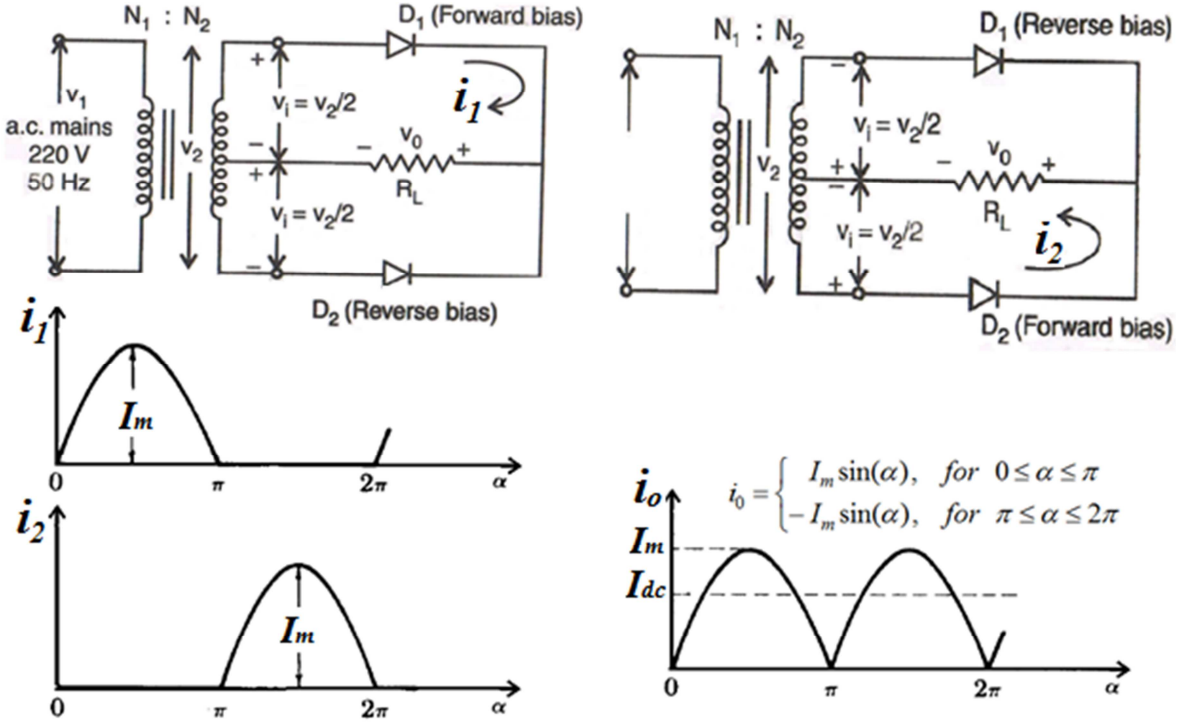
$$\boxed{I_{rms}=\frac{I_m}{2}}\quad \text{for Half}-\text{Wave Rectifier}$$

٢.١.٣ مقوم الموجة الكاملة (Full-Wave Rectifier):

هنالك نوعان من مقومات الموجة الكاملة وهما:

أولا: مقوم الموجة الكاملة باستعمال محولة التفرع المركزي

الشكل (٣-٤) يوضح تركيب وعمل مقوم الموجة الكاملة الذي يستخدم محولة ذات تفرع مركزي (center-tapped transformer)، حيث يتكون هذا النوع من المقومات من ثنائيين (D_1, D_2) ومحولة تفرع مركزي والتي تختلف عن المحولات الاعتيادية بكون ملفها الثانوي مقسوم على ملفين متساويين، وبالتالي تكون الفولتية الخارجة منه مقسمة إلى جزئيين متساويين.



شكل ٣-٤: دائرة مقوم الموجة الكاملة

خلال النصف الأول من الموجة الداخلة يكون الثنائي (D_1) منحاز أماميا ويمر تيار (i_1) وبالاتجاه المبين بالشكل، اما الثنائي (D_2) فيكون منحازاً عكسياً ولا يسمح بمرور التيار من خلاله. وخلال النصف السالب من موجة الإدخال (حيث تنقلب قطبية اطراف المحولة) يصبح الثنائي (D_1) منحازاً عكسياً اما الثنائي (D_2) فيكون منحازاً أماميا فيمر تيار (i_2) عبره وبنفس الاتجاه التيار (i_1)، وبالنتيجة نلاحظ مرور تيار في الحمل خلال النصف الأول والثاني وبنفس الاتجاه، أي ان مقوم الموجة الكاملة يعمل على الاستفادة من نصفي الموجة في حين كان مقوم نصف الموجة يستفاد من نصف واحد فقط.

بنفس الطريقة السابقة يمكننا ان نجد قيمة ذروة تيار الحمل عند اخذ قيمة المقاومة الأمامية للثنائي بالصورة:

$$\boxed{I_m = \frac{V_m}{R_f + R_L}}$$

وفي حالة اخذ تأثير جهد الحاجز للثنائي نجد:

$$\boxed{I_m = \frac{V_m - V_B}{R_f + R_L}}$$

من ملاحظة شكل الموجة الخارجة من مقوم الموجة الكاملة نجد ان زمن الموجة الخارجة هو نصف زمن الموجة الداخلة وبالتالي يكون تردد الفولتية الخارجة من مقوم الموجة الكاملة هو ضعف تردد الإدخال أي ان:

$$T_o = \frac{T_i}{2} \quad so, \boxed{f_o = 2 f_i} \quad \text{for Full-Wave Rectifier}$$

بنفس الطريقة المتبعة في مقوم نصف الموجة يمكننا ان نجد المركبة المستمرة والقيمة الفعالة للتيار الخارج من مقوم التفرع المركزي وكما يلي:

$$I_{dc} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} i_o \, d\alpha \quad , \quad i_o = \begin{cases} I_m \sin(\alpha) & for \ 0 \le \alpha \le \pi \\ -I_m \sin(\alpha) & for \ \pi \le \alpha \le 2\pi \end{cases}$$

$$I_{dc} = \frac{1}{2\pi}[\int_0^{\pi} I_m \sin(\alpha) d\alpha + \int_{\pi}^{2\pi} (-I_m \sin(\alpha) d\alpha)\,]$$

$$= \frac{I_m}{2\pi}[-\cos(\alpha)]_0^{\pi} + \cos(\alpha)]_{\pi}^{2\pi} = \frac{I_m}{2\pi}[-(-1-1)+1-(-1)]$$

$$\boxed{I_{dc} = \frac{2I_m}{\pi}} \quad \text{for Full-Wave Rectifier}$$

وبنفس الطريقة يكون ($V_{dc} = \frac{2V_m}{\pi}$).

من النتيجة السابقة تستنتج ان قيمة المركبة المستمرة الخارجة من مقوم الموجة الكاملة باستعمال محولة التفرع المركزي هي ضعف قيمة المركبة المستمرة الخارجة من مقوم نصف الموجة.

اما القيمة الفعالة للتيار الخارج من مقوم الموجة الكاملة فتكون:

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}(i_o)^2 d\alpha} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi}[I_m \sin(\alpha)]^2 d\alpha + \frac{1}{2\pi}\int_{\pi}^{2\pi}[-I_m \sin(\alpha)]^2 d\alpha}$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{I_m^2}{2\pi}\int_0^{\pi}\sin^2(\alpha)d\alpha + \frac{I_m^2}{2\pi}\int_{\pi}^{2\pi}\sin^2(\alpha)d\alpha}$$

$$\boxed{I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}}$$

أي ان القيمة الفعالة للتيار الخارج من مقوم الموجة الكاملة هو اكبر من القيمة الفعالة للمركبة الخارجة من مقوم نصف الموجة (وذلك لان مقوم الموجة الكاملة يمرر تيار في الحمل خلال نصفي الموجة)، كما نلاحظ ان العلاقة الخاصة بالقيمة الفعالة هي ذاتها للإشارة المتناوبة.

ذكرنا سابقاً ان محولة التفرع المركزي تعمل على تجزئة الفولتية الخارجة منه إلى نصفين وبالقطبية الموضحة في الشكل (راجع الشكل السابق) لذا فانه خلال النصف الموجب من موجة الإدخال فان الثنائي (D_2) يتعرض إلى جهد عكسي مقداره ($2V_m$) ، ونفس الأمر ينطبق على الثنائي (D_1) خلال النصف السالب، أي ان:

$\boxed{PIV = 2V_m}$ for Full – Wave Center Tapped Rectifier

من ذلك نجد ان جهد الذروة العكسية (PIV) في حالة مقوم الموجة الكاملة الذي يستعمل محولة التفرع المركزي هو ضعف جهد الذروة العكسية لمقوم نصف الموجة ولذلك يجب اختيار الثنائي هنا بحذر اكبر (بتعبير آخر ان جهد الانهيار التهدمي للثنائي المستعمل يجب ان يكون اكبر من ضعف جهد ذروة الإدخال).

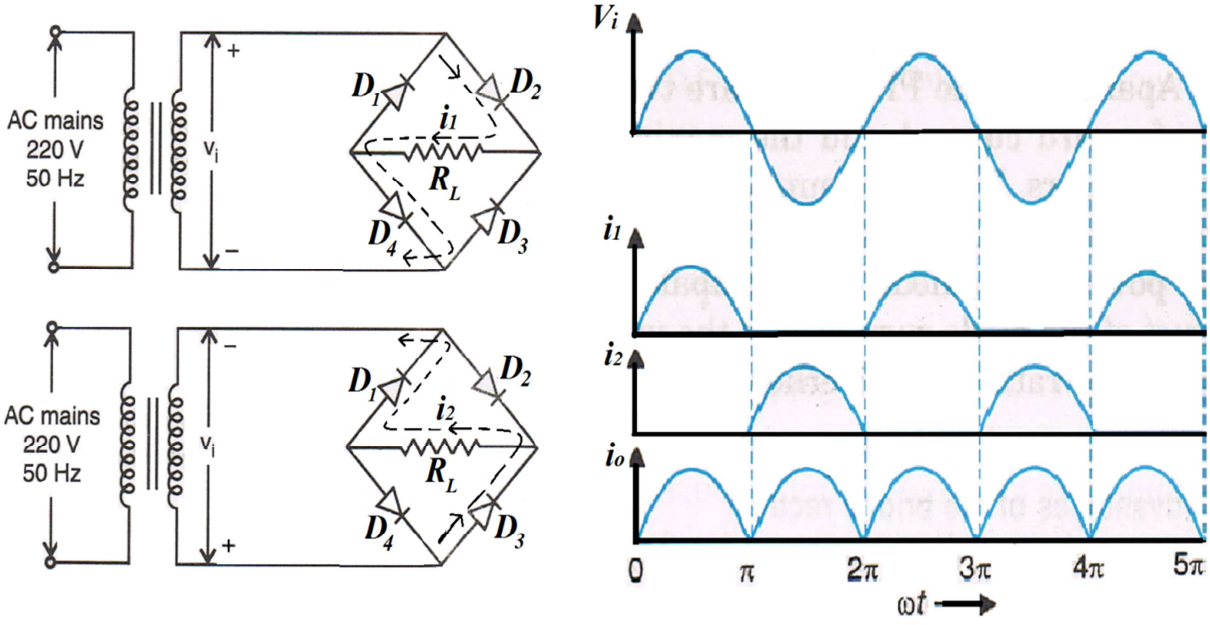
ثانيا: مقوم القنطرة (Bridge Rectifier)

على الرغم من الكفاءة العالية التي تتمتع بها دائرة مقوم الموجة الكاملة باستعمال محولة التفرع المركزي بالمقارنة مع مقوم نصف الموجة، إلا ان هناك بعض المساوئ التي تعاني منها وهي:

أ- عدم توفر محولة التفرع المركزي في كل الأوقات، فضلاً عن ان تعيين نقطة المنتصف على الملف الثانوي ليست سهلة، وكذلك فان استعمال محولة التفرع المركزي يعني زيادة حجم الدائرة وزيادة تكاليفها.

ب- الثنائيات أشباه الموصلات المستعملة يجب ان تمتلك جهد انهيار تهدمي عالي (اكبر من ضعف ذروة الإدخال).

للتغلب على تلك الصعوبات وجد نوع آخر من مقومات الموجة الكاملة وهو مقوم القنطرة الذي يستعمل اربع ثنائيات وكما هو موضح بالشكل (٣-٥).



شكل ٣–٥: دائرة مقوم القنطرة

خلال النصف الموجب من فولتية الإدخال يكون كل من الثنائي (D_2) و (D_4) منحازين أماميا ويمر التيار عبر الحمل بالاتجاه الموضح بالشكل، بينما يكون الثنائيان (D_1, D_3) في حالة انحياز عكسي، اما خلال النصف السالب من موجة الإدخال فيكون الثنائيان (D_2, D_4) في حالة انحياز عكسي والثنائيان (D_3,D_1) في حالة انحياز أمامي، فيمر عبرهما تيار في الحمل وبنفس اتجاه التيار الأول. وبالمحصلة يمر بالحمل تيار بنفس الاتجاه للنصف الموجب والسالب من موجة الإدخال.

نلاحظ ان شكل الموجة الخارجة عن مقوم القنطرة لا يختلف عن شكل الموجة الخارجة من مقوم الموجة الكاملة باستعمال محولة التفرع المركزي، ومنه يمكن ان تستنتج ان:

$$\left.\begin{array}{c} f_o = 2f_i \\ I_{dc} = \dfrac{2I_m}{\pi}, V_{dc} = \dfrac{2V_m}{\pi} \\ I_{rms} = \dfrac{I_m}{\sqrt{2}}, V_{rms} = \dfrac{V_m}{\sqrt{2}} \end{array}\right\} \text{for Bridge Rectifier}$$

من ملاحظة الشكل السابق نجد ان اقصى جهد عكسي يمكن ان يتعرض له الثنائي في حالة مقوم القنطرة هو:

$$\boxed{PIV = V_m} \text{ for Bridge Rectifier}$$

بتطبيق قانون كيرشوف الخاص بفروق الجهد, وبأخذ المقاومة الأمامية للثنائيات بنظر الاعتبار نحصل على:

$$I_m = \frac{V_m}{2R_f + R_L}$$ for Bridge Rectifier

وفي حالة اخذ تأثير جهد الحاجز بنظر الاعتبار يكون:

$$I_m = \frac{V_m - 2V_B}{2R_f + R_L}$$ for Bridge Rectifier

ان مقوم القنطرة يعتبر من اكثر المقومات استعمالاً اما عيبه الرئيسي فهو امتلاكه لأربعة ثنائيات يقوم اثنان منها بالتوصيل في نصف ذبذبة ويقوم الاثنان الآخران بالتوصيل بالنصف الآخر من الذبذبة وهذا يؤدي إلى مشكلة عندما تكون الفولتية المراد تقويمها صغيرة، ففي حالة استعمال ثنائيات السليكون يكون هبوط الفولتية على الثنائيان ($2V_B$=1.4V) وهي قيمة مؤثرة، ولهذا السبب فان مقوم التفرع المركزي يفضل في التطبيقات ذات الفولتية المنخفضة لوجود هبوط فولتية واحد (0.7V) على ثنائي واحد. في بعض التطبيقات ذات الفولتية المنخفضة يستعمل ثنائيان من مادة الجرمانيوم في مقوم التفرع المركزي حيث يؤدي ذلك إلى هبوط بالفولتية على الثنائي مقداره (0.3V) فقط.

لتحديد كفاءة وجودة أي دائرة تقويم موجي هناك عاملين أساسيين وهما كفاءة التعديل وعامل التموج وفيما يلي شرح لكل منها:

أولا: كفاءة التعديل (η) (Rectification Efficiency)

تعرف كفاءة التعديل لأي دائرة مقوم بانها النسبة بين القدرة المستمرة التي يجهزها المقوم لمقاومة الحمل إلى القدرة المتناوبة التي تدخل إلى دائرة التقويم ويرمز لها بالرمز (η) أي ان:

$$\eta = \frac{\text{D.C.power delivered to the load}}{\text{A C.input power from the transformer secondary}}$$

$$\eta = \frac{P_{dc}}{P_{ac}}$$

وتعرف القدرة المستمرة المجهزة للحمل بالصيغة: $P_{dc} = I_{dc}^2 \times R_L$

اما القدرة المتناوبة التي يستلمها المقوم فتعطى بالصيغة: $P_{ac} = I_{rms}^2 \times (R_L + R_f)$

وبالنتيجة يمكننا كتابة الصيغة النهائية لكفاءة التعديل لأي مقوم بالصورة:

$$\eta = \frac{I_{dc}^2 \times R_L}{I_{rms}^2 (R_L + R_f)}$$

بالاعتماد على العلاقة الأخيرة يمكننا إيجاد كفاءة التعديل لكل من مقوم نصف الموجة ومقوم الموجة الكاملة بنوعيه، وكما يلي:

في حالة مقوم نصف الموجة سبق ان وجدنا ان($I_{dc} = \frac{I_m}{\pi}$, $I_{rms} = \frac{I_m}{2}$) وبالتعويض نحصل على:

$$\eta = \frac{(\frac{I_m}{\pi})^2 \times R_L}{(\frac{I_m}{2})^2 (R_L + R_f)} = \frac{4}{\pi^2} \times \frac{R_L}{(R_L + R_f)}$$

$$\eta = \frac{0.406}{1 + \frac{R_f}{R_L}} \quad \text{for Half} - \text{Wave Rectifier}$$

وتكون الكفاءة في قيمتها القصوى عندما تكون قيمة مقاومة الحمل اكبر بكثير من قيمة المقاومة الأمامية للثنائي ($R_L \rangle\rangle R_f$) وعندها يكون:

$$\eta_{\max} = 0.406 = 40.6 \times 100\%$$

$$\eta_{\max} = 40.6\% \quad \text{for Half} - \text{Wave Rectifier}$$

وعليه فان اقصى كفاءة يمكن الحصول عليها من مقوم نصف الموجة هي (40.6%)، أي انه في احسن الأحوال فان 40% فقط من الفولتية المتناوبة الداخلة للمقوم تتحول إلى فولتية مستمرة ، اما النسبة المتبقية (60%) فتتمثل بالمركبة المتناوبة التي تظهر على شكل تموج في فولتية الإخراج المستمرة. ان الانخفاض في كفاءة مقوم نصف الموجة عائد لكونه يستفاد فقط من نصف الموجة في حين لا يمر تيار بالدائرة خلال النصف الآخر. وبطبيعة الحال فان القيمة العملية لكفاءة مقوم نصف الموجة ستكون اقل من (40.6%) ويتحصل عليها بعد التعويض عن قيم مقاومة الحمل ومقاومة الثنائي الأمامية.

في حالة مقوم الموجة الكاملة باستعمال محولة التفرع المركزي لدينا ($I_{dc} = \frac{2I_m}{\pi}$, $I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$) وبالتعويض في معادلة كفاءة التعديل نحصل على:

$$\eta = \frac{(\frac{2I_m}{\pi})^2 \times R_L}{(\frac{I_m}{\sqrt{2}})^2 (R_L + R_f)} = \frac{8}{\pi^2} \times \frac{R_L}{(R_L + R_f)}$$

$$\boxed{\eta = \frac{0.812}{1 + \frac{R_f}{R_L}}} \text{ for Full} - \text{Wave Center Tapped Rectifier}$$

$$\eta_{\max} = 81.2\%$$

من النتيجة الأخيرة نجد ان اقصى كفاءة لمقوم الموجة الكاملة التي تستعمل محولة التفرع المركزي هي ضعف اقصى كفاءة لمقوم نصف الموجة. علماً بان الكفاءة العملية تكون اقل بعد التعويض عن قيم مقاومة الحمل والمقاومة الأمامية للثنائي.

في حالة مقوم القنطرة تكون العلاقة الخاصة بكفاءة التعديل هي ذاتها في حالة مقوم التفرع المركزي باختلاف واحد فقط وهو مقاومة الدائرة في حالة الانحياز الأمامي حيث تكون ($R_L + 2R_f$) وبالتالي تكون كفاءة تعديل مقوم القنطرة بالصورة:

$$\eta = \frac{0.812}{1 + \frac{2R_f}{R_L}} \quad \text{for Bridge Rectifier}$$

$$\eta_{\max} = 81.2\%$$

ثانيا: عامل التموج (Ripple Factor)

تقاس مدى فاعلية أي دائرة تقويم ومدى قدرتها على تقويم الموجات بواسطة كمية يطلق عليها عامل التموج (Ripple Factor) أو اختصاراً (r) الذي يعرف "بانه النسبة بين القيمة الفعالة للمركبة المتناوبة من الموجة الخارجة إلى معدل القيمة المستمرة لتلك الموجة الخارجة" ولذلك يعرف عامل التموج رياضياً بالصيغة:

$$r = \frac{V_{ac}}{V_{dc}} = \frac{I_{ac}}{I_{dc}}$$

ولإيجاد العلاقة التي تربط المركبة المستمرة بالمركبة المتناوبة نستفيد من العلاقة الخاصة بالقدرة المبددة في مقاومة الحمل (P) من دائرة المقوم والتي تعطى بالعلاقة:

$$P = I_{rms}^2 R_L$$

وحيث ان هذه القدرة الكلية هي مجموع القدرة المبددة الناتجة من مرور مركبتي التيار المتناوب والمستمر التي تحويها الموجة الخارجة من المقوم، أي ان:

$$P = I_{dc}^2 R_L + I_{ac}^2 R_L$$

من المعادلتين الأخيرتين نستنتج ان:

$$I_{rms}^2 = I_{dc}^2 + I_{ac}^2$$

وبالتالي يمكننا ان نجد العلاقة التي تربط بين المركبة المتناوبة والمستمرة بالصورة:

$$I_{ac} = \sqrt{I_{rms}^2 - I_{dc}^2}$$

وبالتعويض عن قيمة المركبة المتناوبة في معادلة عامل التموج نجد:

$$r = \frac{\sqrt{I_{rms}^2 - I_{dc}^2}}{I_{dc}} = \sqrt{\frac{I_{rms}^2}{I_{dc}^2} - \frac{I_{dc}^2}{I_{dc}^2}}$$

$$\boxed{r = \sqrt{\frac{I_{rms}^2}{I_{dc}^2} - 1}}$$

المعادلة الأخيرة تعطي قيمة عامل التموج لأي مقوم بدلالة المركبة المستمرة والقيمة الفعالة للموجة الخارجة من المقوم.

بالنسبة لدائرة مقوم نصف الموجة سبق ان وجدنا ($I_{dc} = \frac{I_m}{\pi}$) وان القيمة الفعالة كانت ($I_{rms} = \frac{I_m}{2}$) وبالتالي فان عامل التموج لمقوم نصف الموجة يكون:

$$r = \sqrt{\frac{(\frac{I_m}{2})^2}{(\frac{I_m}{\pi})^2} - 1} = \sqrt{\frac{\pi^2}{4} - 1}$$

$\boxed{r = 1.21}$ for Half – Wave Rectifier

وهذا يعني ان المركبة المتناوبة في الموجة الخارجة من دائرة مقوم نصف الموجة هي اكبر بـ (1.21) مرة من المركبة المستمرة لنفس الموجة، مما يشير إلى وجود تموج عالي في الموجة الخارجة من دائرة المقوم النصفي. ولهذا السبب فان مقوم نصف الموجة لا يعتبر فعالاً في تقويم الموجات.

اما في حالة مقوم الموجة الكاملة (مقوم التفرع المركزي والقنطرة) فقد سبق ان وجدنا ان المركبة المستمرة الخارجة من المقوم كانت ($I_{dc}=\frac{2I_m}{\pi}$) بينما القيمة الفعالة لها كانت ($I_{rms}=\frac{I_m}{\sqrt{2}}$) وبالتالي فان عامل التموج لمقوم الموجة الكاملة يكون:

$$r=\sqrt{\frac{(\frac{I_m}{\sqrt{2}})^2}{(\frac{2I_m}{\pi})^2}-1}=\sqrt{\frac{\pi^2}{8}-1}$$

$$\boxed{r=0.483}\ \text{for Full}-\text{Wave Rectifier}$$

وعليه فان المركبة المستمرة في الموجة الخارجة من مقوم الموجة الكاملة تكون اكبر من المركبة المتناوبة في نفس الموجة وبالتالي فان التموج في هذه الموجة يكون اقل مما هو عليه في الموجة الناتجة من مقوم نصف الموجة، وبشكل عام كلما قل عامل التموج كانت فاعلية الدائرة في التقويم افضل. وللحصول على تقويم افضل (عامل تموج اقل) تستعمل دوائر الترشيح وهذا ما سنتناوله في الفقرة التالية.

الجدول (٣-١) يلخص بعض العلاقات المهمة التي تخص مقوم نصف الموجة ومقومي الموجة الكاملة.

الجدول ٣-١: مقارنة بين مقوم نصف الموجة ومقوم الموجة الكاملة

	مقوم نصف الموجة	مقوم موجة كاملة	
		مقوم التفرع المركزي	مقوم القنطرة
الحاجة إلى محولة التفرع المركزي	كلا	نعم	كلا
عدد الثنائيات المستعملة	1	2	4
تردد الإخراج f_o	f_i	$2f_i$	$2f_i$
القيمة المستمرة للتيار I_{dc}	I_m/π	$2I_m/\pi$	$2I_m/\pi$
هبوط الجهد على الثنائيات	V_B	V_B	$2V_B$
اقصى جهد عكسي PIV	V_m	$2V_m$	V_m
اقصى كفاءة تعديل η_{max}	40.6%	81.2%	81.2%
عامل التموج r	1.21	0.483	0.483

لتحسين عمل دوائر التقويم الموجي تلحق بها دائرة الترشيح، وهي كالتالي:

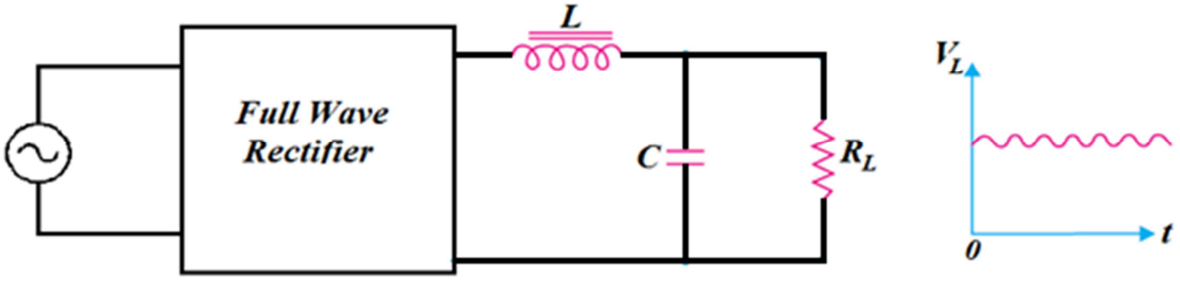
دوائر الترشيح (Filter Circuits)

ان استخدامات الفولتية المستمرة النبضية يقتصر على شحن البطاريات وتحريك المحركات المستمرة وعلى تطبيقات قليلة أخرى. اما ما نحتاجه فعلاً فهي فولتية مستمرة ثابتة القيمة تشبه الفولتية التي نحصل عليها من البطارية. وعليه لا يمكن الاعتماد على دوائر التقويم وحدها كمصادر للجهد المستمر ما لم يضاف اليها دوائر أخرى تعمل على إزالة (ترشيح) الأجزاء المتناوبة من جهد الإخراج وتسمح للمركبة المستمرة بالمرور وتسمى تلك الدوائر بدوائر الترشيح (Filter Circuits) و أحيانا بدوائر التنعيم (تسوية) (Smoothing Circuits).

تستعمل دوائر الترشيح عادة، المتسعات والملفات وتُوظف قدرة تلك العناصر الكهربائية على خزن الطاقة في أجراء عملية تنعيم الجهد الخارج ومن ثم الحصول على جهد مستقر (ثابت القيمة) مع الزمن. وهناك عدة أنواع من دوائر الترشيح وهي كالتالي:

أولا: مرشح الإدخال الخانق (Choke-Input Filter)

يبين الشكل (٣-٦) مقوم موجة كاملة يغذي ملفاً خانقاً Choke (ملف محاثة ذو قلب حديدي ومتسعة ومقاومة حمل. ان الموجة الكاملة الخارجة من المقوم لها مركبة مستمرة (نريدها) ومركبة متناوبة (غير مرغوب فيها). يسمح الملف الخانق للمركبة المستمرة بالمرور فيه بسهولة لان ممانعة الملف ($X_L = 2\pi fL$) تساوي صفر بالنسبة للتيار المستمر (f=0) وكذلك فان المتسعة (حيث رادتها $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$) تمثل دائرة مفتوحة للتيار المستمر ($X_C = \infty$) ولذلك فان كل التيار المستمر الخارج من الخانق يمر خلال مقاومة الحمل (R_L). اما المركبة المتناوبة الخارجة من مقوم الموجة الكاملة فيكون لها تردد يساوي ضعف التردد الداخل للمقوم، ويقوم الملف الخانق بحجز تلك المركبة المتناوبة لان رادتها الحثية (X_L) تكون كبيرة عند تردد إخراج المقوم، إضافة إلى ذلك فان أية مركبة متناوبة استطاعت المرور خلال الخانق فانها ستمر خلال المتسعة (حيث تكون رادتها صغيرة للمركبة المتناوبة) بدلاً من مرورها خلال مقاومة الحمل.



شكل ٣-٦: دائرة مرشح الإدخال الخانق

ان الفولتية الخارجة من المرشح تحتوي على مركبة مستمرة كبيرة ومركبة متناوبة صغيرة. تعطى المركبة المستمرة بالمعادلة:

$$V_{DC} = \frac{R_L}{R + R_L} V'_{DC}$$

حيث V_{DC} تمثل الفولتية المستمرة على الحمل، R مقاومة الخانق المستمرة (مقاومة سلكه الاومية).

R_L مقاومة الحمل، V'_{DC} الفولتية المستمرة الخارجة من مقوم الموجة الكاملة.

وعادة تكون R اصغر بكثير من R_L وبالتالي فان معظم الفولتية المستمرة الخارجة من المقوم تصل إلى الحمل ($V_{DC} \approx V'_{DC}$). اما المركبة المتناوبة الخارجة من المرشح فتكون عبارة عن تذبذبات مركبة فوق المركبة المستمرة، ويعطي تموج الإخراج بالعلاقة:

$$V_r \approx \frac{X_C}{X_L} V'_r$$

حيث V_r هي القيمة الفعالة لتموج الاخراج و V'_r القيمة الفعالة لتموج الإدخال للمرشح. وعادة ما تكون X_L اكبر بكثير من X_C وبالتالي يكون تموج الإخراج اصغر بكثير من تموج الإدخال. ويمكن إيجاد القيمة الفعالة لتموج الإخراج لتردد مقداره (120Hz) لمقوم موجة كاملة بصورة مباشرة من العلاقة:

$$V_r = 5.28 \times 10^{-7} \frac{V_m}{LC}$$

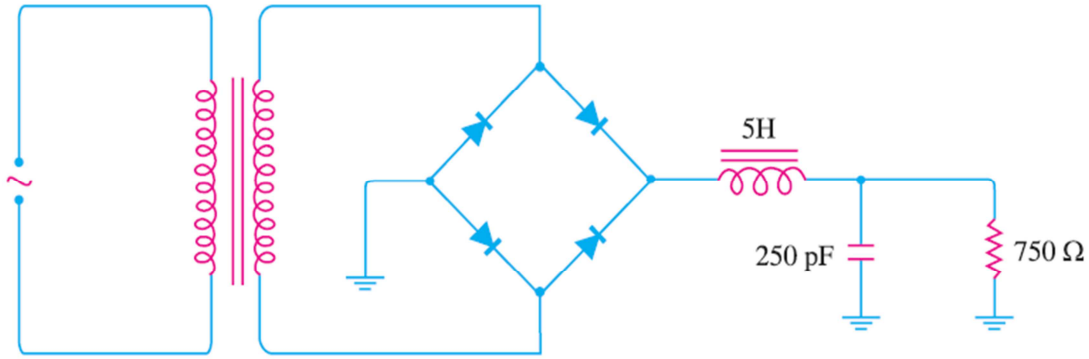
حيث V_m هي ذروة فولتية الإدخال للمرشح، L حثية الملف الخانق بالهنري، C سعة المتسعة بالفاراد. وتعطى القيمة الصغرى لحثية الملف الخانق (المحاثة الحرجة) عند تردد خط قدرة مقداره (60Hz) بالعلاقة:

$$L_{critical} = \frac{R_L}{1000}$$

وكلما كانت قيمة الحثية اكبر من المحاثة الحرجة يكون الترشيح افضل.

مثال (٣-١):

الملف الخانق في الشكل التالي له مقاومة مستمرة قيمتها (25Ω)، اوجد الفولتية المستمرة على الحمل علماً بان ذروة الفولتية الخارجة من مقوم الموجة الكاملة هي (25.7V)، افرض ان الثنائيات مثالية.



الحل:

ان قيمة الفولتية المستمرة الخارجة من مرشح الإدخال الخانق (V_{DC}) تعطى بالعلاقة:

$$V_{DC} = \frac{R_L}{R + R_L} V'_{DC}$$

لذا نحتاج ان نجد قيمة الفولتية المستمرة الخارجة من مقوم الموجة الكاملة، والتي تعطى بالعلاقة:

$$V'_{DC} = \frac{2V_m}{\pi} = \frac{2 \times 25.7}{\pi}$$

$$V'_{DC} = 16.36V$$

وبالتعويض بالعلاقة الأولى نحصل على:

$$V_{DC} = \frac{750}{25 + 750} 16.36$$

$$V_{DC} = 15.83V$$

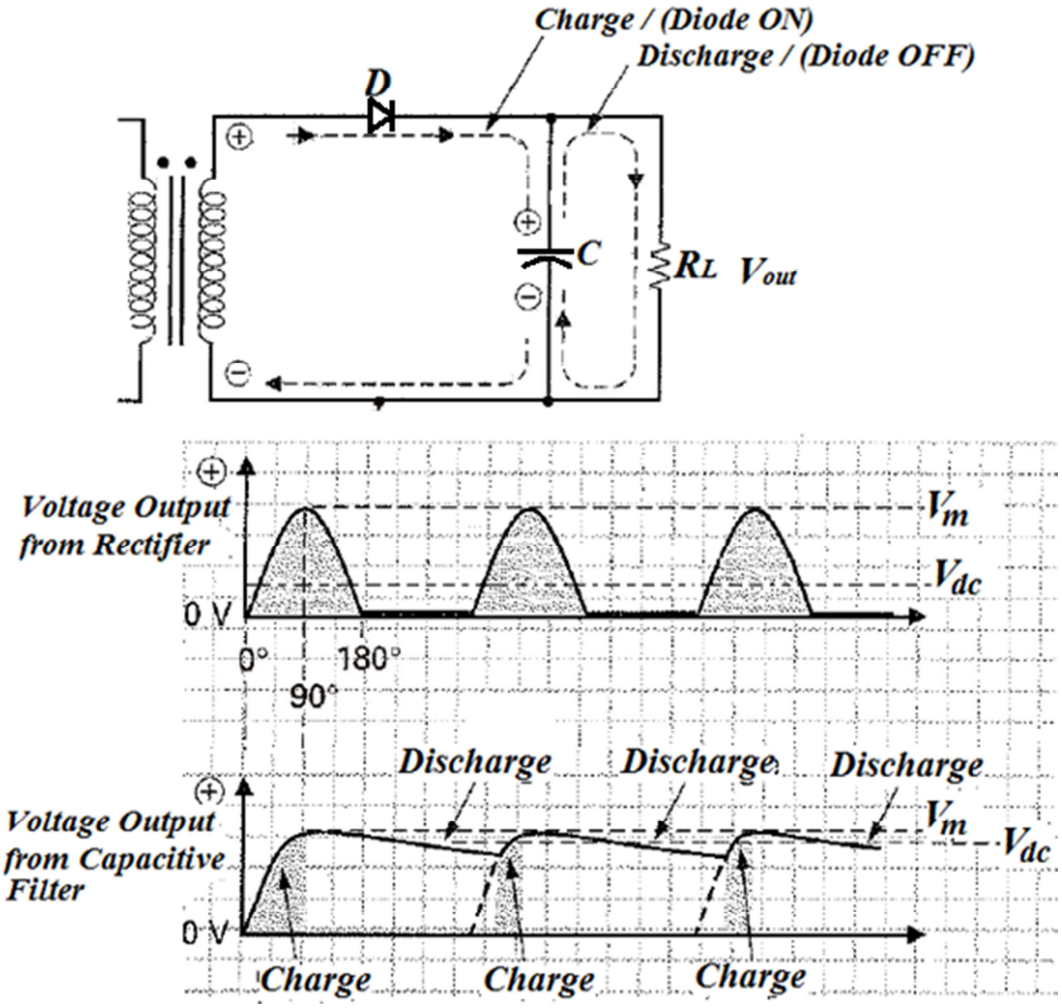
الفولتية المستمرة على الحمل هي (15.83V).

ثانيا: مرشح الإدخال السعوي (Capacitive-Input Filter)

على الرغم من كون مرشح الإدخال الخانق ممتازاً في توهين التموج ولكنه كبير الحجم وغالي الثمن، لذا وجدت مرشحات أخرى منها مرشح الإدخال السعوي الذي يمتاز بصغر الحجم ورخص الثمن ويكون بنوعين:

أ- مرشح الإدخال السعوي لمقوم نصف موجة:

الشكل (٣-٧) يوضح مرشح إدخال سعوي مع مقوم نصف موجة:



شكل ٣-٧: مرشح الإدخال السعوي لمقوم نصف الموجة

في خلال ربع الذبذبة الأول من فولتية الإدخال يكون الثنائي في وضع انحياز أمامي ويظهر مثالياً كانه مفتاح مغلق، وبما ان الثنائي يربط المصدر (الإدخال) على المتسعة مباشرة فانها تشحن إلى فولتية ذروة (V_m) ويكون ثابت الزمن ($R_f C$) للشحن قصير جداً (لكون مقاومة الثنائي الأمامية صغيرة). اما عند عبور الذروة الموجبة يتوقف الثنائي عن التوصيل (انحياز عكسي) وذلك لان المتسعة شُحنت لجهد الذروة (V_m) وعندما تصبح فولتية الإدخال اقل من جهد الذروة فان الثنائي يكون منحاز عكسياً (جهد الجهة N

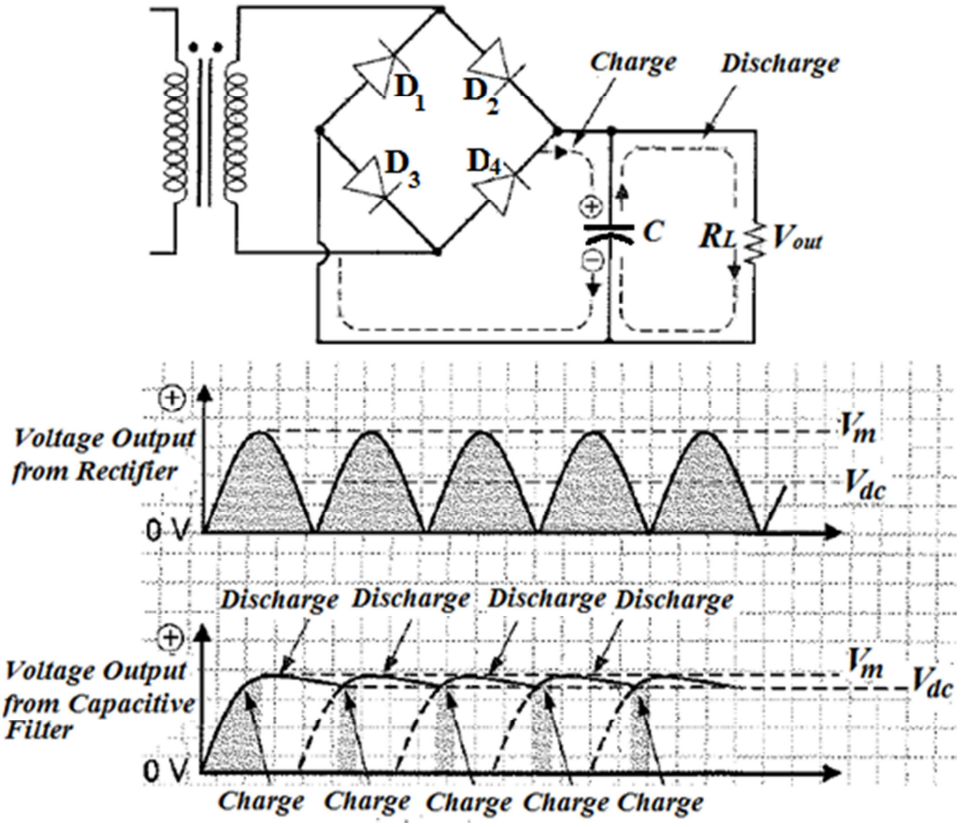
اكثر موجبية من جهد الجهة P)، وبما ان الثنائي في حالة عدم توصيل (انحياز عكسي)، تبدأ المتسعة بالتفريغ خلال مقاومة الحمل (R_L) ويكون ثابت الزمن (R_LC) اكبر بكثير من فترة ذبذبة إشارة الإدخال (T) ولهذا السبب فان المتسعة ستفقد جزءا صغيراً من شحنتها. وبالقرب من ذروة الإدخال التالية يتحول الثنائي إلى وضع التوصيل (انحياز أمامي) لمدة وجيزة ويعيد شحن المتسعة إلى جهد الذروة وهكذا تتكرر العملية.

يعطى عامل التموج لمرشح سعوي مع مقوم نصف الموجة بالصيغة:

$$r = \frac{1}{2\sqrt{3}fCR_L}$$

ب- مرشح الإدخال السعوي لمقوم موجة كاملة:

ان مقوماً بمأخذ وسطي أو قنطري المربوط مع متسعة ينتج ترشيح افضل لان المتسعة تشحن مرتين كما موضح بالشكل (٣-٨)، ونتيجة لذلك يكون التموج اصغر وتقترب فولتية الإخراج المستمرة من فولتية الذروة.



شكل ٣-٨: مرشح الإدخال السعوي لمقوم الموجة الكاملة

يعطى عامل التموج لمرشح سعوي مربوط مع مقوم موجة كاملة بالصيغة:

$$r = \frac{1}{4\sqrt{3}fCR_L}$$

وللحصول على ثابت زمن طويل، يجب ان يكون حاصل ضرب R_L في C أي (R_LC) اكبر بكثير (عشر مرات على الأقل) من الزمن الدوري (T) للفولتية الخارجة من مقوم الموجة الكاملة (أي ان الشرط هو

ان يكون ($R_L C \geq 10T, \text{or } R_L C \geq \frac{10}{2f_i}$)، وفي حالة تحقق هذا الشرط يمكننا استعمال التقريبات التالية في حالة كون التردد للفولتية الداخلة للمقوم الموجة الكاملة هو (60Hz):

حيث تعطى قيمة المركبة المتناوبة الخارجة من المرشح بالصيغة:

$$V_{DC} = (1 - \frac{0.00417}{R_L C}) V_m$$

وتعطى القيمة الفعالة للتموج بالعلاقة:

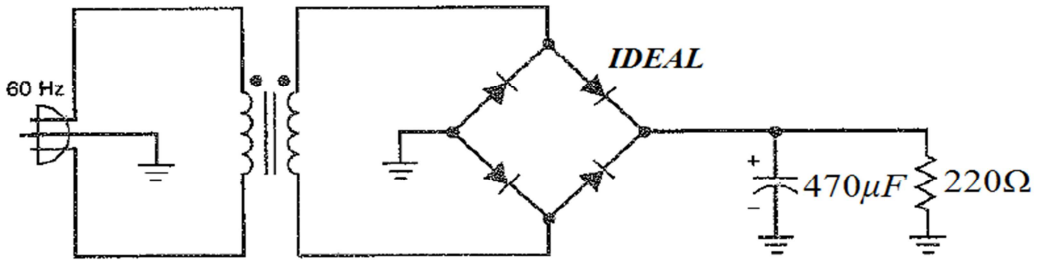
$$V_r = \frac{0.0024 V_m}{R_L C}$$

اما اصغر قيمة للمتسعة التي يمكن ان تقوم بعملية الترشيح بصورة صحيحة فتعطى بالعلاقة:

$$C_{\min} = \frac{0.24}{r R_L}$$

مثال (٣-٢):

اذا علمت ان ذروة الفولتية الثانوية تساوي (30V) وترددها (60Hz) في الشكل التالي، فما مقدار فولتية الإخراج المستمرة وما مقدار التموج؟ (اهمل هبوط الفولتية على الثنائي)



الحل: قبل تطبيق العلاقات التقريبية يجب علينا أولا ان نتحقق من تحقق الشرط ($R_L C \geq \frac{10}{2f_i}$) وكما يلي:

$$R_L C = 220 \times 470 \times 10^{-6}$$
$$R_L C = 0.1034 \text{sec} = 103.4 m\text{sec}$$
$$\frac{10}{2f_i} = \frac{10}{2 \times 60} = 0.0833 \text{sec} = 83.3 m\text{sec}$$
$$\therefore R_L C \rangle \frac{10}{2f_i}$$

من النتيجة السابقة نلاحظ تحقق الشرط، وبالتالي يمكننا استعمال العلاقات التقريبية، ومنها نجد قيمة الفولتية المستمرة الخارجة من المرشح باستعمال العلاقة:

$$V_{DC} = (1 - \frac{0.00417}{R_L C}) V_m$$

$$V_{DC} = (1 - \frac{0.00417}{220 \times 470 \times 10^{-6}}) \times 30$$

$$V_{DC} = 0.95967 \times 30$$

$$V_{DC} = 28.79V$$

اما القيمة الفعالة للمركبة المتناوبة الخارجة من المرشح فتعطى بالعلاقة: $V_r = \frac{0.0024 V_m}{R_L C}$

$$V_r = \frac{0.0024 \times 30}{220 \times 470 \times 10^{-6}}$$

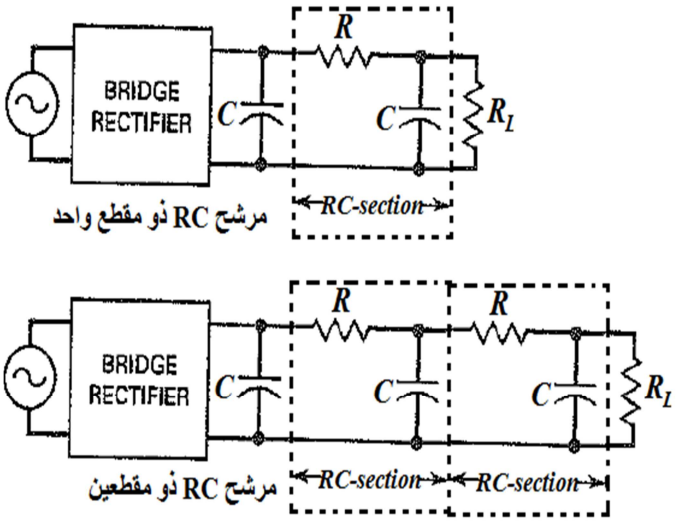
$$V_r = 0.696V$$

عندما يكون ثابت الزمن طويلاً (أي يتحقق الشرط $R_L C \geq 10/2f_1$) يمكن إهمال تموج الإخراج في مرشح الإدخال السعوي نتيجة صغره، ولكن عندما يكون ثابت الزمن قصيراً (لا يتحقق الشرط) فيجب ان نستخدم ترشيحاً إضافيا لتقليل التموج الذي يكون كبيراً، ومن تلك المرشحات مرشح RC ومرشح LC .

ثالثا: مرشح RC (RC-Filter)

يبين الشكل (٣-٩) مرشح RC يقع بين متسعة الإدخال ومقاومة الحمل.

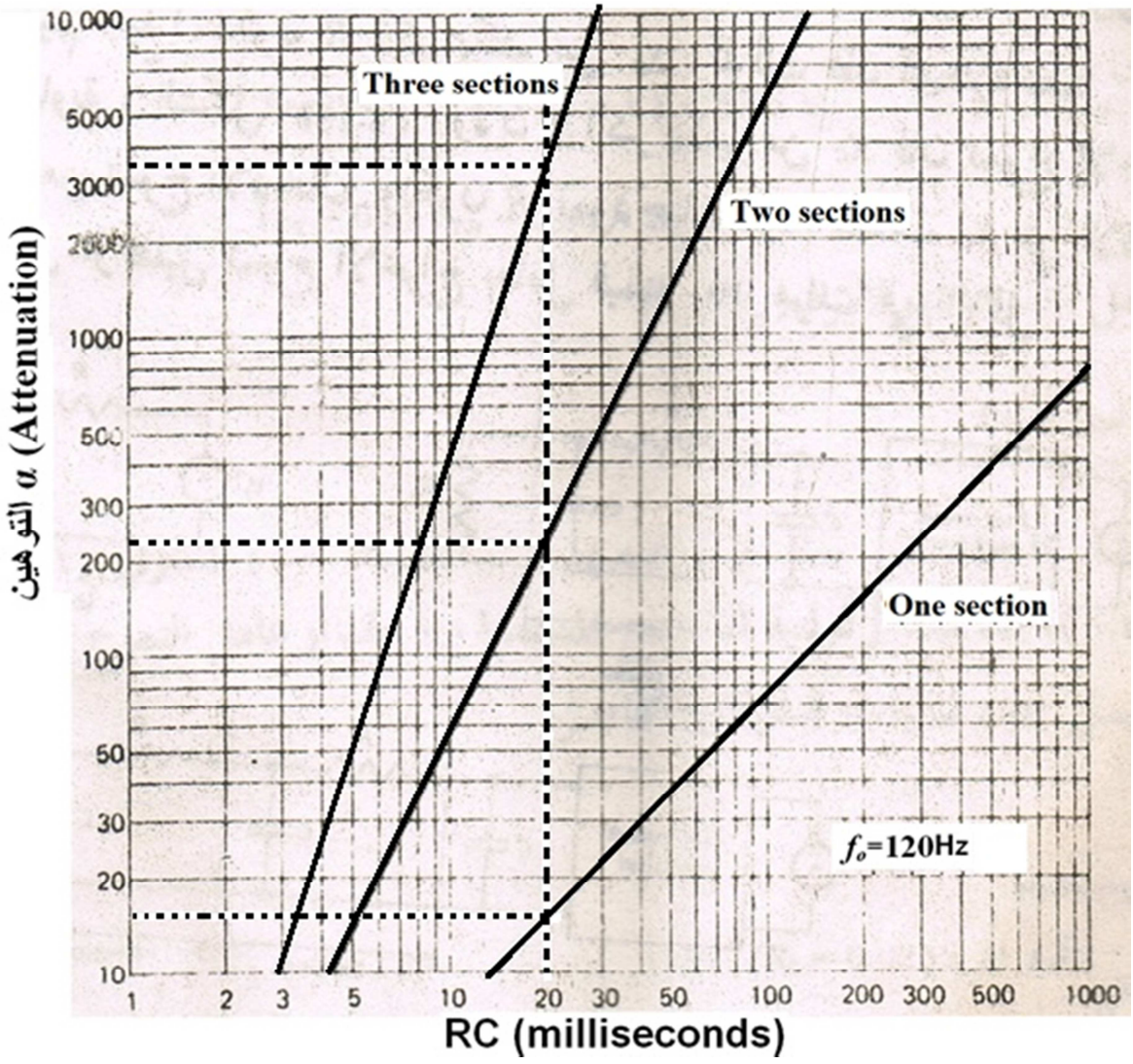
اذا كان التصميم جيداً تكون قيمة المقاومة R اكبر بكثير من X_C، لذلك تعمل الدائرة عمل مقسم فولتية متناوبة، ولان R اكبر بكثير من X_C فان تموج الإخراج يكون اقل من تموج الإدخال. وتكون R نموذجياً عشرة أضعاف X_C على الأقل، وهذا يعني توهين أو تقليل تموج الإخراج بعامل قيمته 10 مرات على الأقل.



شكل ٣-٩: دائرة مرشح RC

بالإمكان استعمال اكثر من مقطع واحد كما مبين في الشكل السابق، وبما ان كل مقطع يعمل عمل مقسم فولتية متناوبة فأن التوهين الكلي يساوي حاصل ضرب مقادير التوهين كافة، فلو قلل كل مقطع التوهين بعامل مقداره 15 مرة، فيكون التوهين الكلي لمرشح RC لمقطعين هو 225 ولثلاث مقاطع هو 3300 .

الشكل (٣–١٠) يمثل الرسم البياني للتوهين لمقطع واحد ولمقطعين ولثلاثة مقاطع.



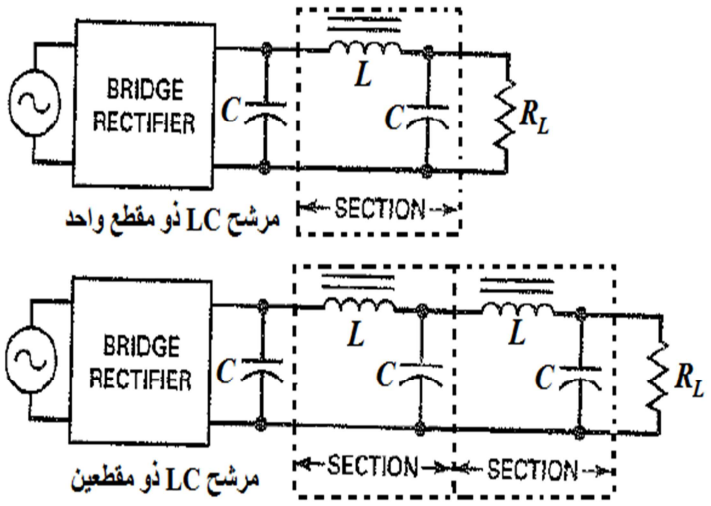
شكل ٣–١٠: التوهين لمرشح RC ذي مقطع واحد ومقطعين وثلاثة مقاطع

فعلى سبيل المثال، لو كان ثابت الزمن لمقطع واحد هو (20msec) بانزال المساقط على الرسم البياني السابق نجد ان مقدار التوهين لمقطع واحد هو (α=15) ولمقطعين هو (α=225) ولثلاثة مقاطع هو (α=3300)، وهذا يعني ان مقطعاً واحداً يقلل التموج بعامل قدره 15 مرة وان مقطعين يقللانه بعامل قدره 225 مرة وان ثلاثة مقاطع تقلله بمقدار 3300 مرة.

ان العيب الرئيسي في مرشح RC هو الخسارة في الفولتية المستمرة على المقاومة R، بما ان المقاومة R مربوطة على التوالي مع مقاومة الحمل R_L فانها تشكل معها مقسم للفولتية المستمرة. ولذلك فاننا نحتاج من جهة إلى R كبيرة (مقسم الفولتية المتناوبة) لنحصل على ترشيح جيد، كما اننا من الجهة الأخرى نحتاج إلى R صغيرة لنمنع الخسارة الكبيرة في الفولتية المستمرة (مقسم الفولتية المستمرة). ونظراً لهذين المطلبين المتناقضين يمكن استعمال مرشح RC عملياً عند تيارات الحمل القليلة (R_L كبيرة) فقط.

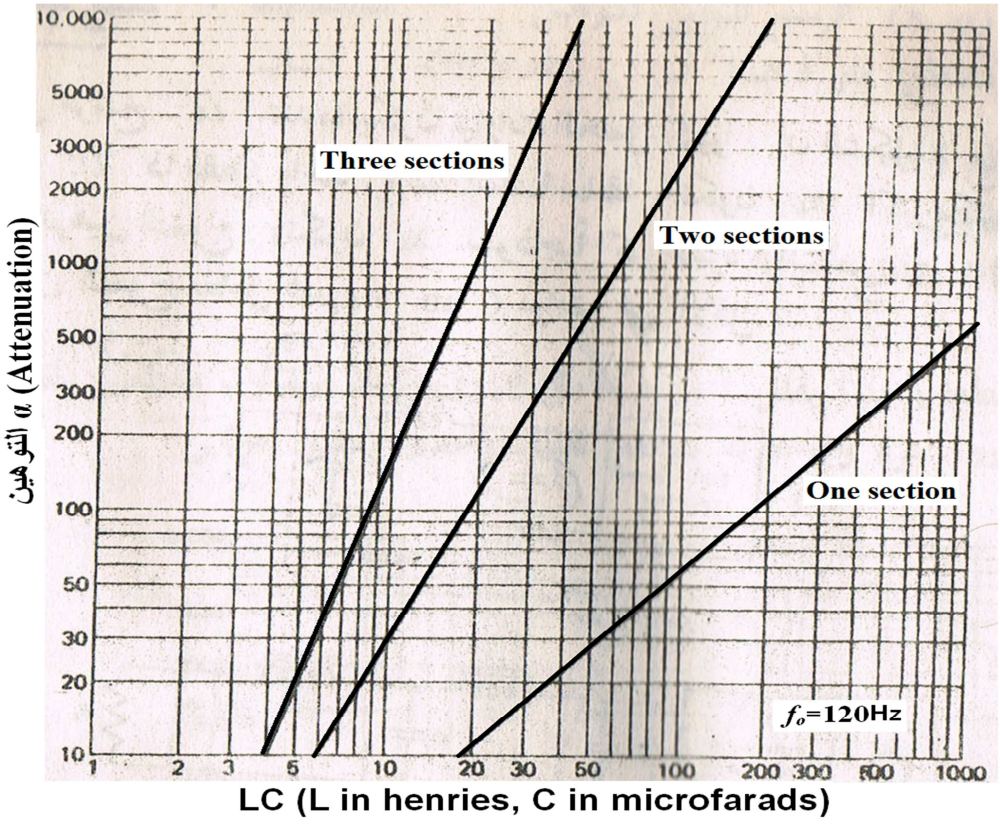
رابعا: مرشح LC (LC-Filter)

يفضل مرشح LC عندما يكون تيارات الحمل كبيرة (R_L صغيرة). الشكل (٣-١١) يوضح مرشح LC ذو مقطع واحد وذو مقطعين. كما هو الحال في مرشح الإدخال الخانق فان X_L اكبر بكثير من X_C ، نموذجياً تكون X_L اكبر عشرة مرات من X_C على الأقل، لذلك يتوهن التموج بعامل قدره 10 مرات على الأقل.



شكل ٣-١١: مرشح LC

بالإمكان استعمال اكثر من مقطع LC واحد كما موضح بالشكل السابق، وبما ان كل مقطع يعمل عمل مقسم فولتية متناوبة، يكون التوهين الكلي مساوياً لحاصل ضرب التوهينين، فمثلاً لو قلل كل مقطع التموج بعامل مقداره 20 فان التوهين الكلي لمقطعين يكون 400 وهكذا. الشكل (٣-١٢) يوضح التوهين لمقطع LC واحد ولمقطعين وثلاثة.



شكل ٣-١٢: التوهين لمرشح LC ذي مقطع واحد ومقطعين وثلاثة مقاطع

٢.٣ دوائر تشكيل الموجة

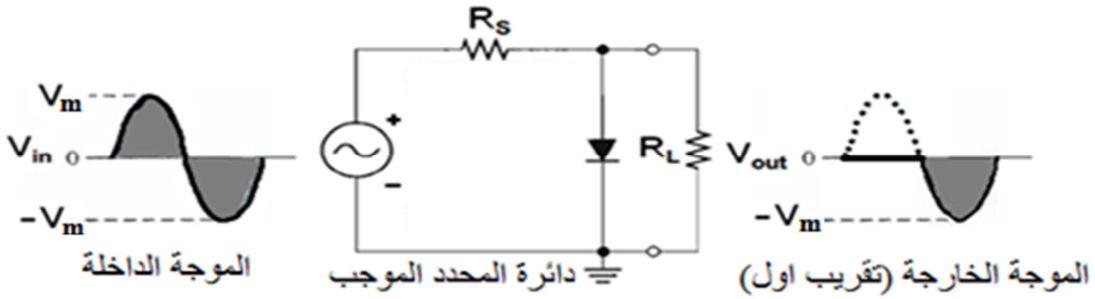
بالإضافة لاستعمال ثنائي أشباه الموصلات في دوائر التقويم الموجي، فان لها استعمالات أخرى في دوائر تعمل على تغيير شكل الموجة والتي تسمى بدوائر التشكيل الموجي، وهي كالتالي:

١.٢.٣ التحديد (Clipper) وأنواعه

هي دوائر لها القابلية على تحديد (قطع) جزء من إشارة الإدخال عند مستوى معين من دون إحداث أي تغيير في الجزء المتبقي من الإشارة. وتستعمل دوائر التحديد في تطبيقات مثل الرادار والحاسبات الرقمية ومنظومات الكترونية أخرى، وهي على عدة أنواع منها:

أ- المحدد (المُقلم) الموجب (The Positive Clipper)

يقوم المحدد الموجب بتحديد (قطع) الجزء الموجب من إشارة الإدخال، الشكل (٣-١٣) يوضح دائرة المحدد الموجب، والإشارة الداخلة والخارجة من المحدد الموجب.



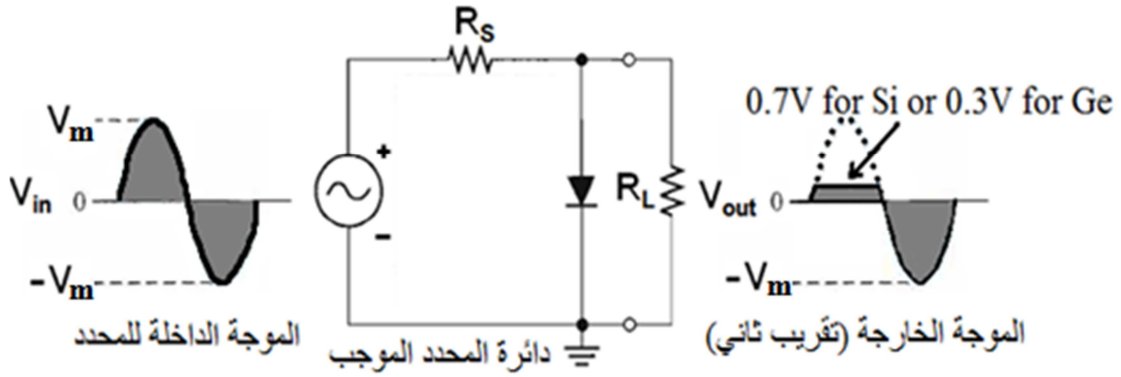
شكل ٣-١٣: دائرة المحدد الموجب باعتماد التقريب الأول للثنائي

عمل الدائرة يكون بالصورة التالية: خلال النصف الموجب من موجة الإدخال يكون الثنائي منحاز أماميا وفي حالة اعتبار الثنائي مثالي (تقريب أول) فانه يمكن اعتباره دائرة قصر (مقاومة أمامية صفر) وعندها تكون فولتية الإخراج (الفولتية على طرفي مقاومة الحمل R_L) تساوي صفر بينما تظهر فولتية الإدخال على المقاومة R_S (والتي وضعت أساسا لتحديد التيار الأمامي المار بالثنائي لكي لا يتجاوز اقصى تيار أمامي للثنائي). خلال النصف السالب من موجة الإدخال يكون الثنائي منحاز عكسياً ويكافئ دائرة مفتوحة وبالتالي فان الدائرة تصبح مقسم جهد وتعطى فولتية الإخراج بالعلاقة:

$$V_{out} = \frac{R_L}{R_S + R_L} V_{in} \qquad (3-3)$$

عادة ما تكون R_L اكبر بكثير من R_S وعندها يمكن استعمال التقريب ($V_{out} \approx V_{in}$)، ونتيجة لذلك تكون الفولتية الخارجة مطابقة تماماً لفولتية الإدخال في جزئها السالب. لذلك تظهر فولتية الإخراج قد تحددت بمقدار أقصاه (صفر فولت) كما هو موضح بالشكل السابق.

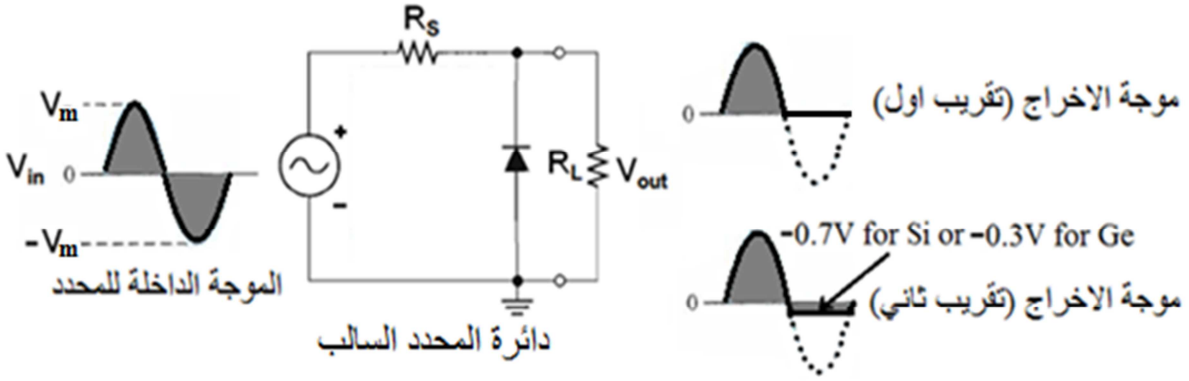
ان الشرح السابق قد اعتمد على التقريب المثالي للثنائي، ولتوخي الدقة اكثر يجب الأخذ بنظر الاعتبار تأثير جهد الحاجز للوصلة (التقريب الثاني)، فالثنائي في حالة الانحياز الأمامي لا يسمح بمرور التيار إلا بعد ان تتغلب الفولتية الأمامية على جهد الحاجز ولذلك فان الإشارة سوف تقطع بالقرب من جهد الحاجز (0.7V لثنائي السليكون و 0.3V لثنائي الجرمانيوم)، الشكل (٣-١٤) يوضح شكل الفولتية الداخلة والخارجة من المحدد الموجب باعتماد التقريب الثاني.



شكل ٣-١٤: دائرة المحدد الموجب باعتماد التقريب الثاني للثنائي

ب- المحدد (المُقلم) السالب (The Negative Clipper)

هي دائرة تقوم بتحديد (قطع) الجزء السالب من موجة الإدخال، الشكل (٣-١٥) يوضح دائرة المحدد السالب وشكل الفولتية الداخلة والخارجة في حالة التقريب الأول والثاني.



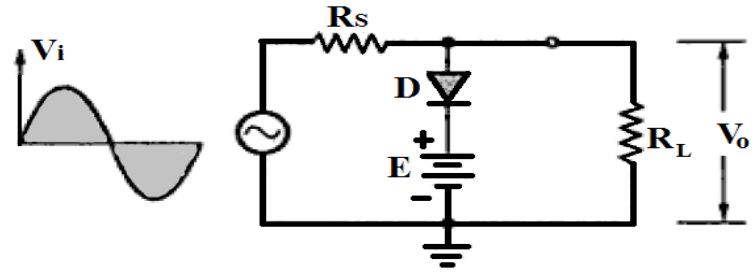
شكل ٣-١٥: دائرة المحدد السالب باعتماد التقريب الثاني للثنائي

خلال النصف الموجب من فولتية الإدخال يكون الثنائي منحاز عكسياً ويتصرف كدائرة مفتوحة وتصبح الدائرة مقسم جهد وتظهر معظم الفولتية الداخلة على مقاومة الحمل ($R_L>>R_S$)، خلال النصف السالب من موجة الإدخال يكون الثنائي منحاز أماميا وكتقريب أول يكون بمثابة دائرة قصر وتكون فولتية الإخراج صفر و يظهر الجزء السالب من موجة الإدخال على المقاومة R_S، وبالتالي فان المحدد السالب يعمل على تحديد (قطع) الجزء السالب من موجة الإدخال عند مستوى الصفر.

جـ – المحدد المنحاز (The Biased Clipper)

ان دائرة المحدد الموجب مثلاً تحدد المستوى الموجب عند مستوى صفر فولت عند اعتماد التقريب المثالي للثنائي أو عند 0.7V لثنائي السليكون كتقريب ثاني، غير انه في بعض التطبيقات تكون هناك حاجة لحذف جزء بسيط من الجزء الموجب أو السالب لموجة الإدخال أو حذف جزء اكبر من نصف الموجة، ولذلك تستعمل دوائر المحدد المنحاز للسيطرة على المستوى الذي يتم عنده التحديد، ان التحكم بمستوى التحديد يتم من خلال تسليط فولتية تحييز خارجية عن طريق ربط بطارية (أو مصدر جهد مستمر) على التوالي مع الثنائي. وهناك ثلاثة أنواع من دوائر التحديد المنحاز هي:

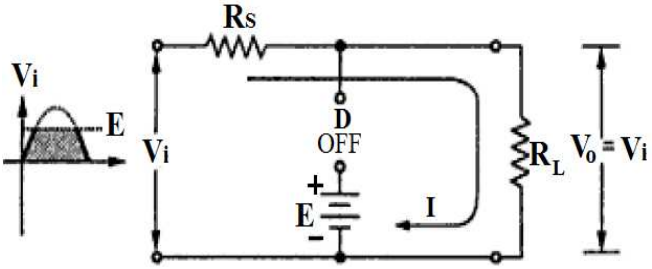
١– المحدد الموجب المنحاز (Biased Positive Clipper)



شكل ٣–١٦: دائرة المحدد الموجب المنحاز

الشكل (٣–١٦) يوضح دائرة المحدد الموجب المنحاز والإشارة الداخلة اليه.

فيما يلي شرح لعمل دائرة المحدد الموجب المنحاز:

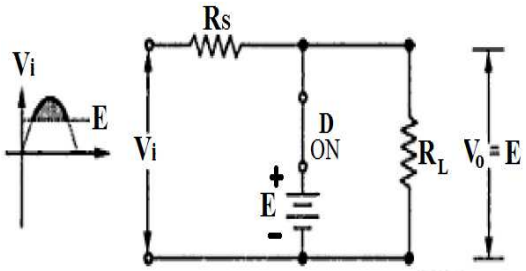


في بداية النصف الموجب من موجة الإدخال ($V_i \langle E$) يكون الثنائي منحازاً عكسياً لكون جهة الانود P اقل موجبية من جهة الكاثود N (لكل قيم فولتية الإدخال الأقل من جهد البطارية)، كما موضح بالشكل المجاور وفي هذه الحالة يكون:

$$V_o = IR_L = V_i \frac{R_L}{R_S + R_L}$$

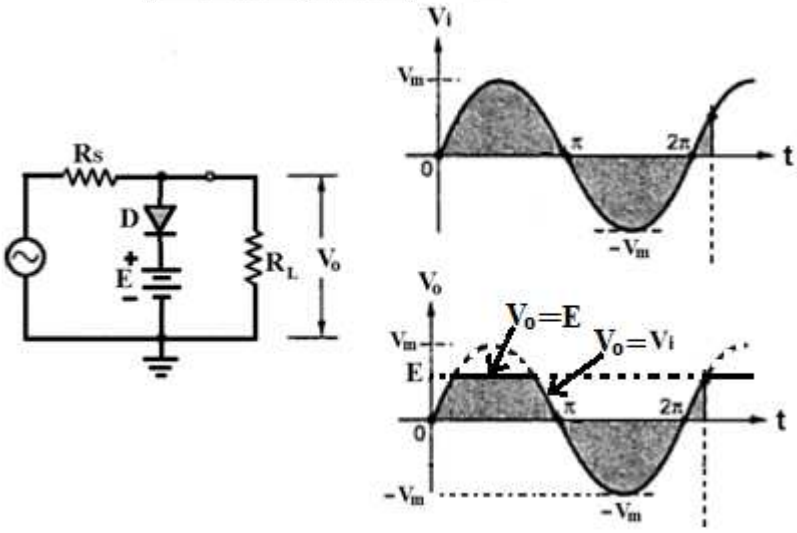
وعادة ما تكون مقاومة الحمل اكبر بكثير من المقاومة R_S (أي ان $R_L>>R_S$) وبالتالي يكون:

$$V_o = V_i, \quad \text{for} \quad V_i \langle E$$



عندما تتغلب فولتية الإدخال على جهد البطارية ($V_i \rangle E$) يصبح الثنائي منحازاً أماميا ويتصرف كدائرة قصر وعندها يكون:

$$V_o = E, \quad \text{for} \quad V_i \rangle E$$

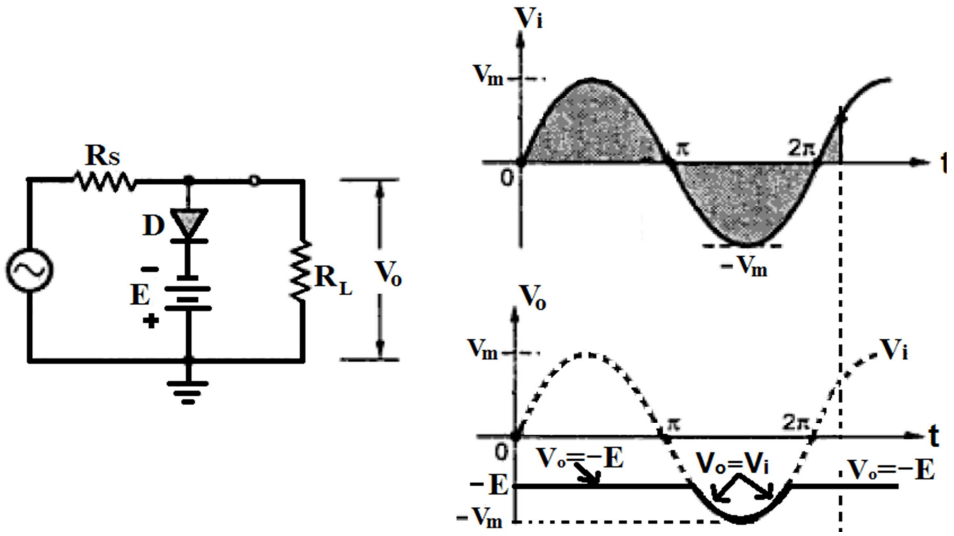


وبالنتيجة فان دائرة المحدد الموجب المنحاز تقوم بتحديد الجزء الموجب من فولتية الإخراج بقيمة جهد البطارية، كما هو موضح بالشكل المجاور.

ان الشرح السابق اعتمد على التقريب المثالي للثنائي، وكتقريب ثاني فان الثنائي لكي يمرر تيار يجب ان تتغلب فولتية الإدخال على جهد الحاجز، وبالتالي فان فولتية الإخراج ستتحدد بالقيمة ($E+V_B$)، وبتعبير آخر فان فولتية الإخراج حسب التقريب الثاني يمكن التعبير عنها بالصيغة:

$$V_o = V_i, \quad \text{for} \quad V_i \langle E$$
$$V_o = E + V_B, \quad \text{for} \quad V_i \rangle E$$

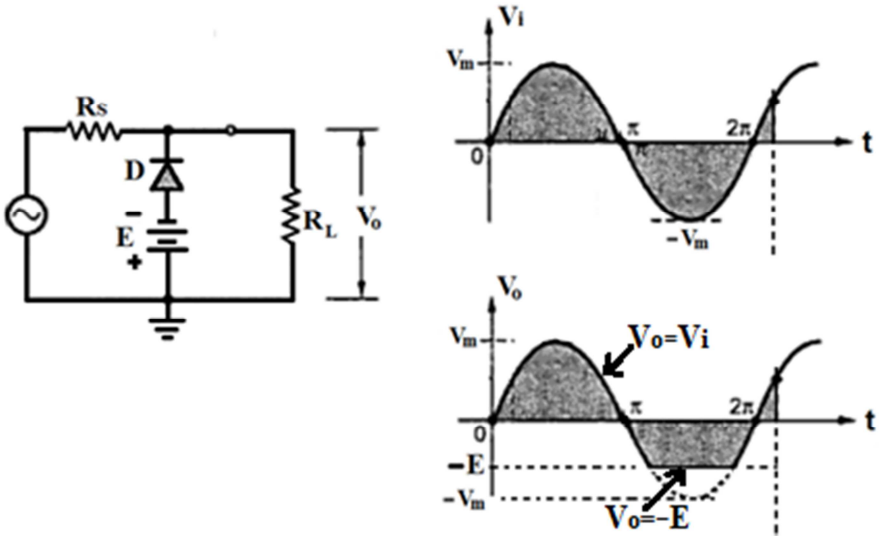
في حالة عكس قطبية البطارية المستعملة في دائرة المحدد الموجب المنحاز فان مستوى التحديد (القطع) سوف يكون عند ($-E$)، إذ يكون الثنائي في حالة انحياز أمامي خلال كامل النصف الموجب لفولتية الإدخال حيث يكون ($V_o=-E$)، خلال النصف السالب يبقى الثنائي في حالة انحياز أمامي ($V_o=-E$) إلى ان تتغلب فولتية الإدخال السالبة على جهد البطارية، عندها يصبح الثنائي منحاز عكسياً (جهد الانود اكثر سالبية من جهد الكاثود) وتصبح فولتية الإخراج مساوية لفولتية الإدخال ($V_o=V_i$)، الشكل (٣-١٧) يمثل دائرة المحدد المنحاز الموجب بعد عكس البطارية وشكل الفولتية الداخلة اليه والخارجة منه.



شكل ٣–١٧: دائرة المحدد الموجب المنحاز مع عكس قطبية البطارية

٢–المحدد السالب المنحاز (Biased Negative Clipper)

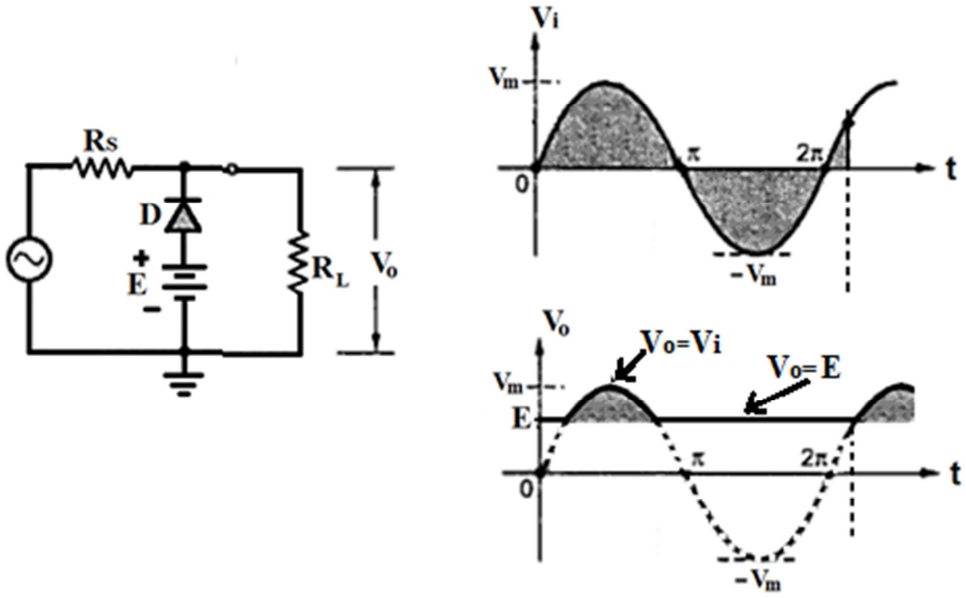
تقوم دائرة المحدد السالب المنحاز بتحديد الجزء السالب من الإشارة عند قيمة جهد البطارية، خلال النصف الموجب من فولتية الإدخال يكون الثنائي منحاز عكسياً وعندها يكون ($V_o=V_i$)، وخلال النصف السالب يبقى الثنائي منحاز عكسياً إلى ان تتغلب قيمة فولتية الإدخال السالبة على قيمة جهد البطارية وعندها فقط يصبح الثنائي منحازاً أماميا وتصبح فولتية الإخراج ($V_o=-E$). الشكل (٣–١٨) يوضح دائرة المحدد السالب المنحاز والفولتية الداخلة والخارجة.



شكل ٣–١٨: دائرة المحدد السالب المنحاز

في حالة اعتماد التقريب الثاني، فان التحديد عند الجزء السالب سوف يكون عند ($-E-V_B$).

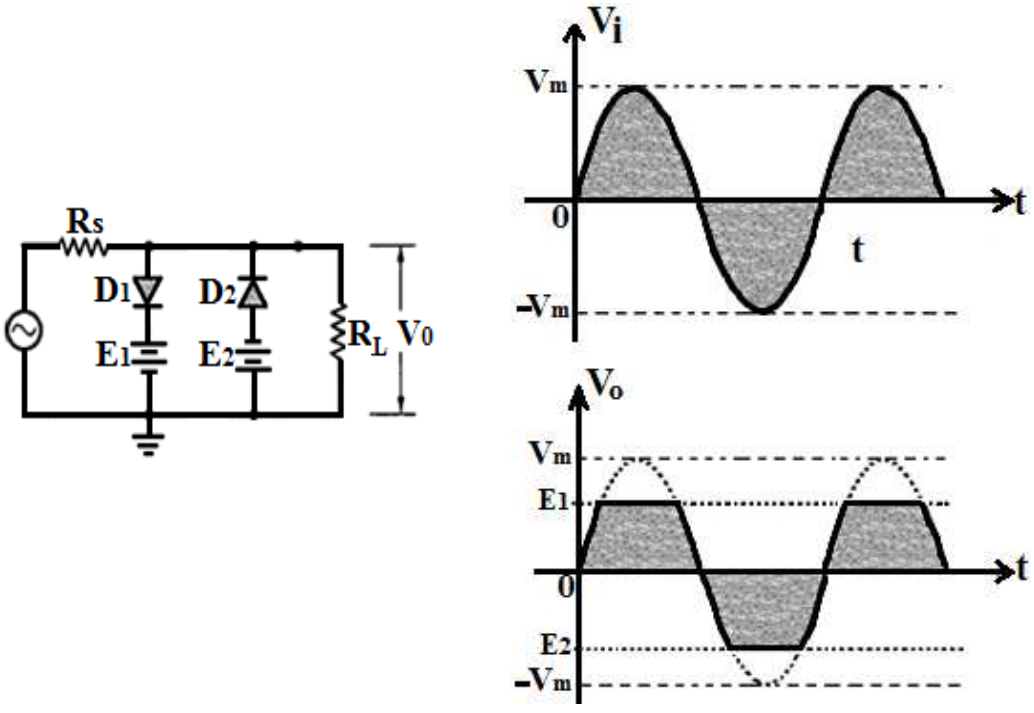
اما عند قلب قطبية البطارية المستعملة في دائرة المحدد السالب فان شكل فولتية الإخراج سوف يكون بالصورة الموضحة بالشكل (٣-١٨).



شكل ٣-١٨: دائرة المحدد السالب المنحاز مع عكس قطبية البطارية

٣-المحدد المركب المنحاز

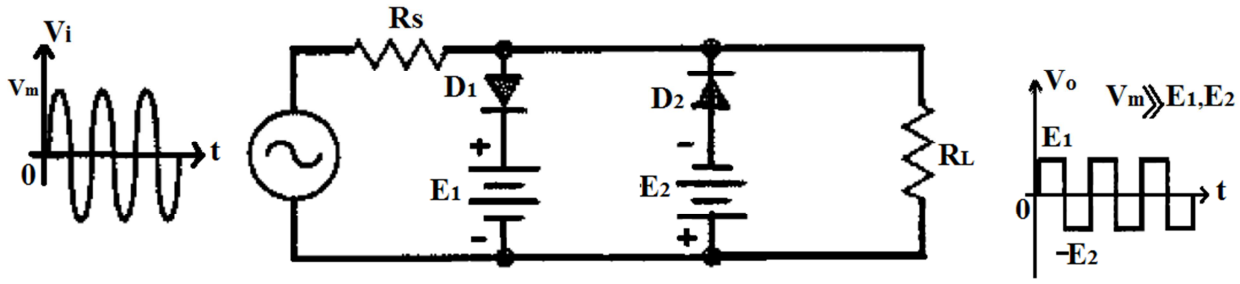
نحصل على المحدد المركب المنحاز عن طريق ربط محدد موجب منحاز مع محدد سالب منحاز كما موضح بالشكل (٣-١٩).



شكل ٣-١٩: دائرة المحدد المركب المنحاز

خلال النصف الموجب من موجة الإدخال يقوم المحدد الموجب المنحاز بتحديد الجزء الموجب عند مستوى جهد البطارية (E_1)، اما خلال النصف السالب من موجة الإدخال فيقوم المحدد السالب المنحاز بتحديد الجزء السالب من فولتية الإدخال عند جهد البطارية (E_2)، وعند اعتماد التقريب الثاني للثنائي فان تحديد الذروة الموجبة يكون عند (E_1+V_B) والذروة السالبة تتحدد عند ($-E_2-V_B$).

في حالة كون جهد بطارية المحدد الموجب المنحاز مساوياً لجهد بطارية المحدد السالب المنحاز ($E_1=E_2$) فان القطع سيكون متماثلاً لنصفي موجة الإدخال، وفي حالة خاصة اذا كانت ($E_1=E_2$) وكانت ذروة فولتية الإدخال اكبر بكثير من جهد بطارية التحييز ($V_m>>E$) فان شكل موجة الإخراج سيكون مربعاً كما هو موضح بالشكل (٣-٢٠).

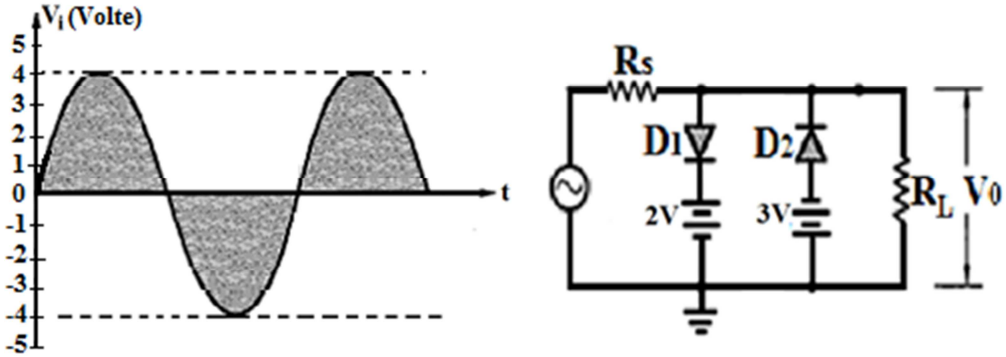


شكل ٣-٢٠: دائرة المحدد المركب المستعملة للحصول على موجة إخراج مربعة

مثال (٣-٣):

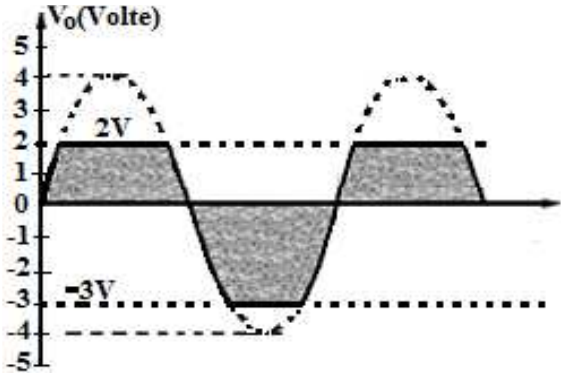
ارسم شكل الموجة الخارجة من الدائرة الموضحة بالشكل التالي، اعتبر ان ($R_L>>R_S$). وذلك في الحالتين:

أ- اعتماد التقريب المثالي للثنائي ب- اعتماد التقريب الثاني (علماً بان الثنائي مصنوع من السليكون).

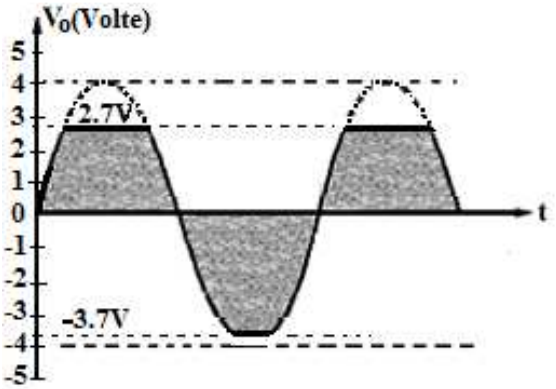


الحل:

ان الدائرة هي محدد مركب منحاز ونظراً لكون ($R_L>>R_S$) لذا يمكن إهمال الجهد على المقاومة R_S.



أ- في حالة اعتماد التقريب المثالي للثنائي، حيث يقوم المحدد الموجب المنحاز بتحديد فولتية الإخراج عند قيمة جهد بطارية المحدد الموجب (2V) بينما يقوم المحدد السالب بتحديد الجزء السالب عند قيمة جهد بطارية المحدد السالب (3V-)، ويكون شكل الموجة الخارجة كما في الشكل المجاور.



ب- في حالة اعتماد التقريب الثاني نأخذ بنظر الاعتبار تأثير جهد الحاجز للثنائي، ولكون الثنائي من السليكون لذا يكون تحديد الجزء الموجب عند القيمة (2+0.7=2.7V) والتحديد السالب يكون عند القيمة (3+0.7=3.7V) وكما هو موضح بالشكل المجاور.

٢.٢.٣ دوائر الإلزام (Clamper)

في بعض الاحيان تكون هناك حاجة لإضافة مستوى فولتية مستمرة لإشارة الإدخال، وتسمى الدوائر التي تعمل على إضافة مركبة مستمرة إلى إشارة الإدخال بدوائر الإلزام. وتعتبر دوائر الإلزام شائعة الاستعمال في الدوائر الإلكترونية ومن أمثلتها التلفاز حيث تستعمل لإضافة فولتية مستمرة لإشارة الصورة، ويسمى الملزم المستعمل في التلفاز عادة بمستعيد المركبة المستمرة (dc restorer).

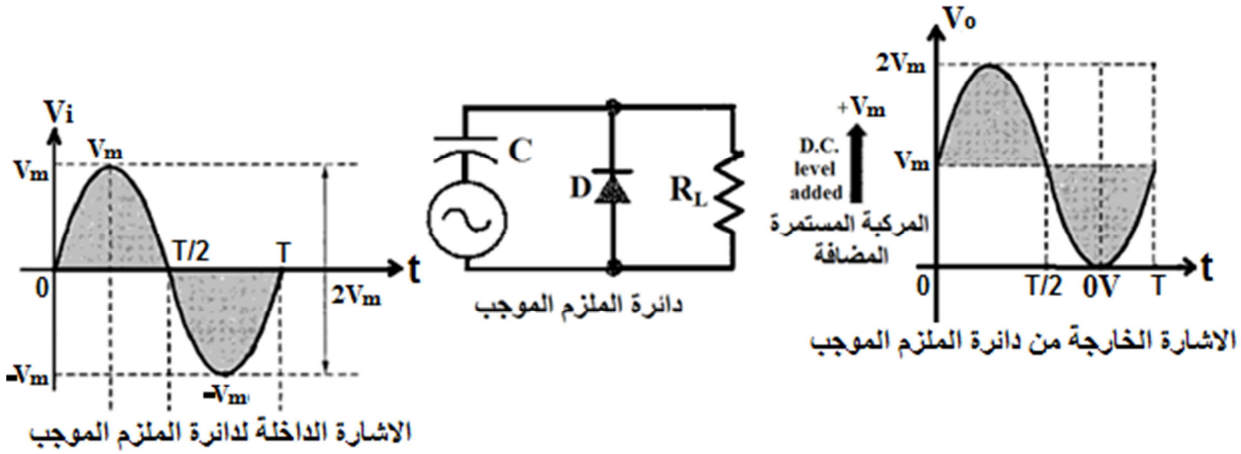
تتكون دوائر الإلزام بشكل رئيسي من ثلاثة عناصر هي متسعة ، ثنائي شبه موصل ومقاومة، يمكن تقسيم دوائر الإلزام تبعاً لقطبية الفولتية المضافة إلى:

١- الملزم الموجب
٢- الملزم السالب

وفيما يلي شرح لكلا النوعين:

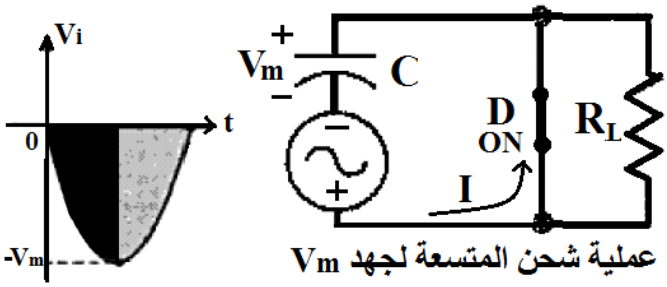
أولاً: الملزم الموجب (Positive Clamper)

الشكل (٣-٢١) يمثل دائرة الملزم الموجب والإشارة الداخلة والخارجة منه.

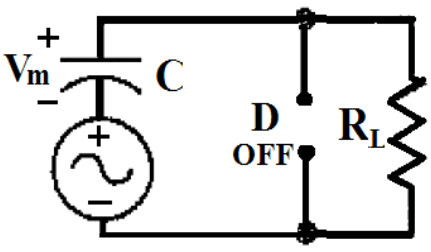


شكل ٣-٢١: دائرة الملزم الموجب

اما عمل دائرة الملزم الموجب فيكون كالتالي:

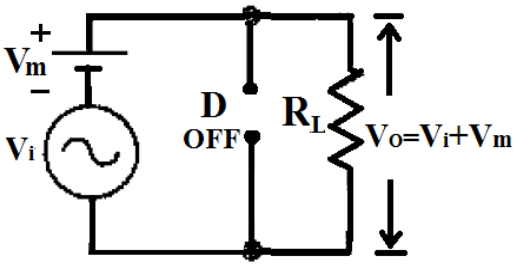


خلال الربع الأول من النصف السالب من إشارة الإدخال يكون الثنائي في حالة انحياز أمامي وفي حالة اعتبار الثنائي مثالي يكون بمثابة دائرة قصر، وبالنتيجة تشحن المتسعة بسرعة إلى جهد الذروة لإشارة الإدخال (V_m) وبالقطبية الموضحة بالشكل المجاور.



ضمن النصف السالب و بعد تجاوز إشارة الإدخال الذروة السالبة يصبح الثنائي منحاز عكسياً (جهة N اكثر موجبية من جهة P). خلال النصف الموجب التالي يكون الثنائي منحاز عكسياً ويتصرف كدائرة مفتوحة، وبتأثير فرق الجهد على طرفي المتسعة يكون الثنائي منحاز عكسياً خلال الانصاف الموجبة والسالبة التالية، وكما هو موضح بالشكل المجاور.

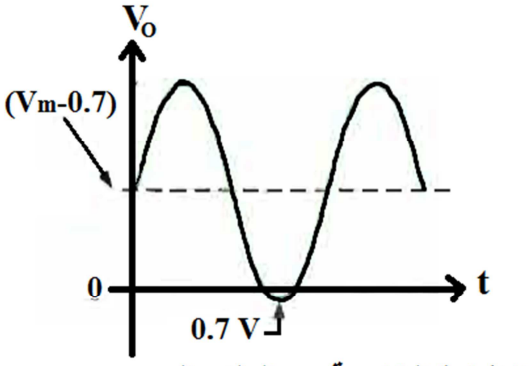
وبجعل ثابت الزمن (R_LC) اكبر بكثير من الزمن الدوري لإشارة الإدخال (T) فان المتسعة تبقى محافظة على شحنتها دائماً، وكتقريب أول يمكن اعتبار المتسعة تقوم بعمل بطارية جهدها (V_m) مربوطة على التوالي مع إشارة الإدخال، وبالنتيجة تكون الدائرة المكافئة للملزم الموجب بعد شحن المتسعة كما موضح بالشكل المجاور.



الدائرة المكافئة للملزم الموجب بعد شحن المتسعة

يتضح من ما سبق ان دائرة الملزم الموجب تقوم بإضافة مركبة إلى إشارة الإدخال تساوي ذروة إشارة الإدخال، وبتعبير آخر فان كل نقطة على إشارة الإدخال سوف تنزاح نحو الاتجاه الموجب بمقدار ذروة إشارة الإدخال فتظهر الموجة بأكملها في الجزء الموجب ولهذا تسمى بالملزم الموجب.

من الناحية العملية ثنائي أشباه الموصلات في الانحياز الأمامي لا يمرر التيار إلا بعد ان تتغلب الفولتية المسلطة على جهد الحاجز (V_B)، ولذا كتقريب ثاني فان المتسعة سوف تشحن لجهد قدره (V_i-V_B) ويكون مقدار الازاحة التي تتعرض لها إشارة الإدخال هو بمقدار (V_i-V_B)، الشكل المجاور يوضح فولتية الإخراج لملزم موجب يستعمل ثنائي سليكون باعتماد التقريب الثاني للثنائي.



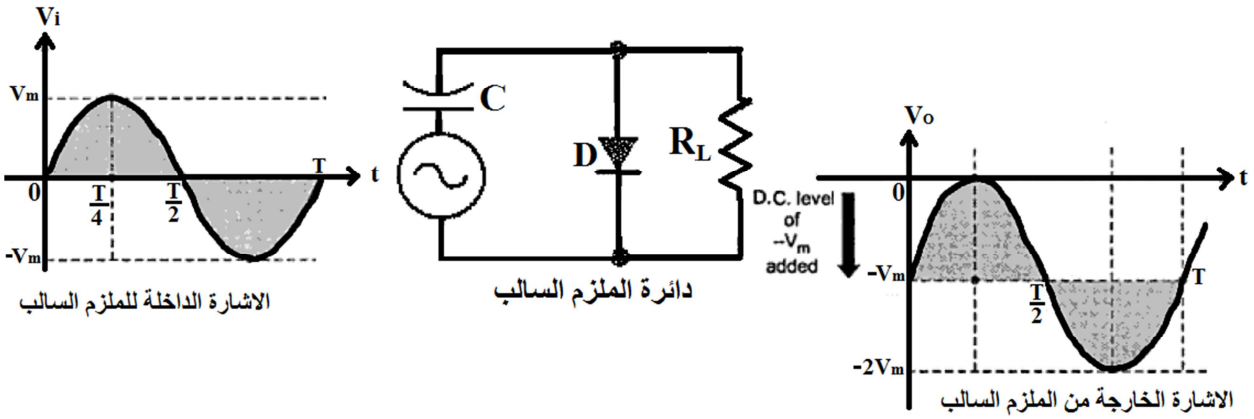
الاشارة الخارجة من الملزم الموجب حسب التقريب الثاني للثنائي

بخصوص فولتية الذروة العكسية التي يتعرض لها الثنائي في دائرة الملزم الموجب نجدها تساوي ضعف قيمة ذروة الإدخال ($2V_m$).

بالإمكان التحكم في مستوى الإلزام الموجب من خلال ربط بطارية خارجية على التوالي، وعندها ستضاف (أو تطرح) ازاحة إضافية للإشارة الخارجة بمقدار يساوي جهد البطارية تبعاً لطريقة ربط البطارية.

ثانياً: الملزم السالب (Negative Clamper)

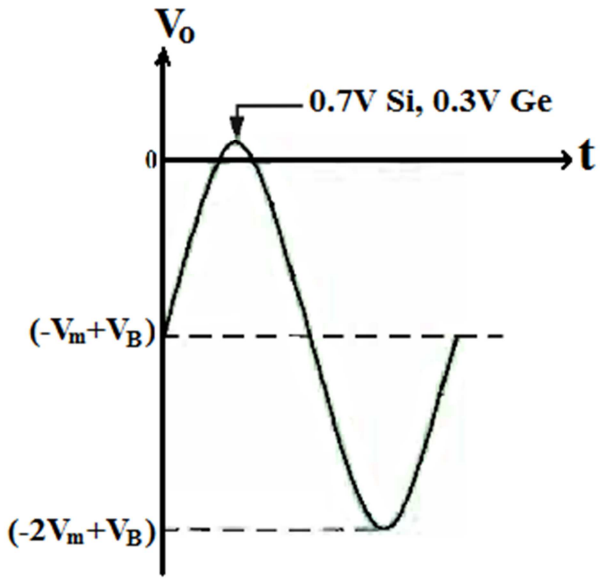
يتكون الملزم السالب من نفس العناصر التي يتكون منها الملزم الموجب ولكن باختلاف قطبية الثنائي والذي بدوره يؤدي إلى اختلاف قطبية الفولتية التي سوف تشحن بها المتسعة. الشكل (٣-٢٢) يوضح دائرة الملزم السالب والإشارة الداخلة والخارجة منه.



شكل ٣-٢٢: دائرة الملزم السالب

نلاحظ ان دائرة الملزم السالب قد عملت على الزام إشارة الإخراج بالجزء السالب، سوف يترك شرح عمل دائرة الملزم السالب كواجب للطالب.

عند اعتماد التقريب الثاني للثنائي، فان الإلزام السالب لن يكون عند مستوى الصفر بل ينزاح قليلاً فوق مستوى الصفر (بحدود جهد الوصلة للثنائي) وكما هو موضح بالشكل التالي.



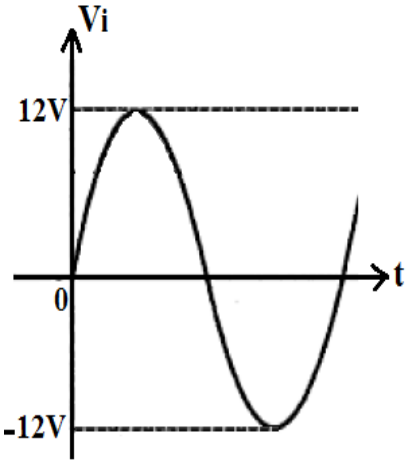
كما ويمكن التحكم بمستوى الإلزام السالب من خلال إضافة بطارية تحييز على التوالي مع الثنائي، حيث يزاح مستوى الإلزام فوق أو اسفل مستوى الصفر حسب قيمة طريقة ربط البطارية وجهدها.

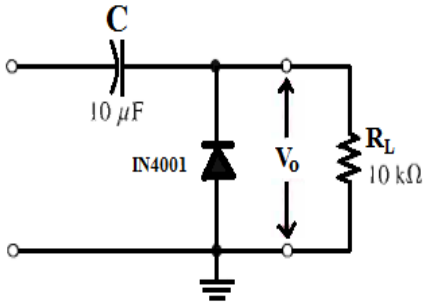
مثال (٣-٤): ارسم الإشارة الخارجة على طرفي مقاومة الحمل في الدائرة التالية، على فرض ان ثابت الزمن للدائرة كبير جداً بالمقارنة مع الزمن الدوري لإشارة الإدخال بحيث يمكن إهمال تفريغ المتسعة، وذلك في الحالتين:

أ- اعتبار الثنائي مثالي.

ب- اعتماد التقريب الثاني،

علماً بان الثنائي من السليكون.

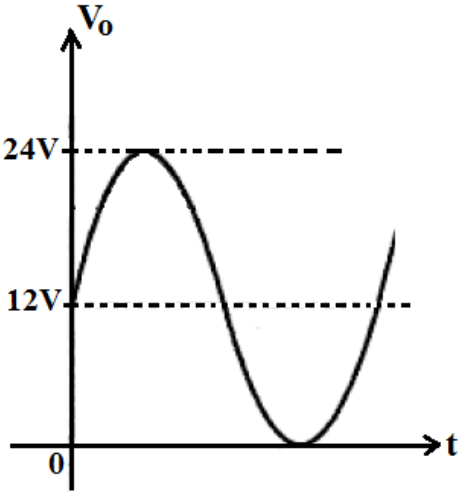




الحل: نلاحظ ان الدائرة هي دائرة ملزم موجب غير منحاز، وعليه تكون إشارة الإخراج مُلزمة عند الجزء الموجب، ويكون شكل إشارة الإخراج في كل حالة (تقريب) كما يلي:

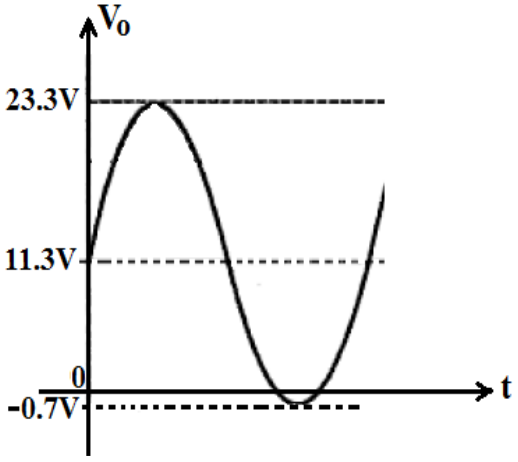
أ- في حالة اعتماد التقريب الأول (الثنائي المثالي)

في هذه الحالة تكون الذروة السالبة لإشارة الإخراج ملزمة بمستوى الصفر اما الذروة الموجبة فتكون ملزمة بمستوى ($2V_m$) أي انها ملزمة بالمستوى (24V)، وتكون إشارة الإخراج بالشكل المجاور.



ب- في حالة اعتماد التقريب الثاني

في هذه الحالة يتم الأخذ بنظر الاعتبار تأثير جهد الحاجز، فتكون الذروة السالبة ملزمة بقيمة (-0.7V) اما الذروة الموجبة فتكون ملزمة بالمستوى (23.3V) حيث (24-0.7=23.7V) وكما هو موضح بالشكل المجاور.



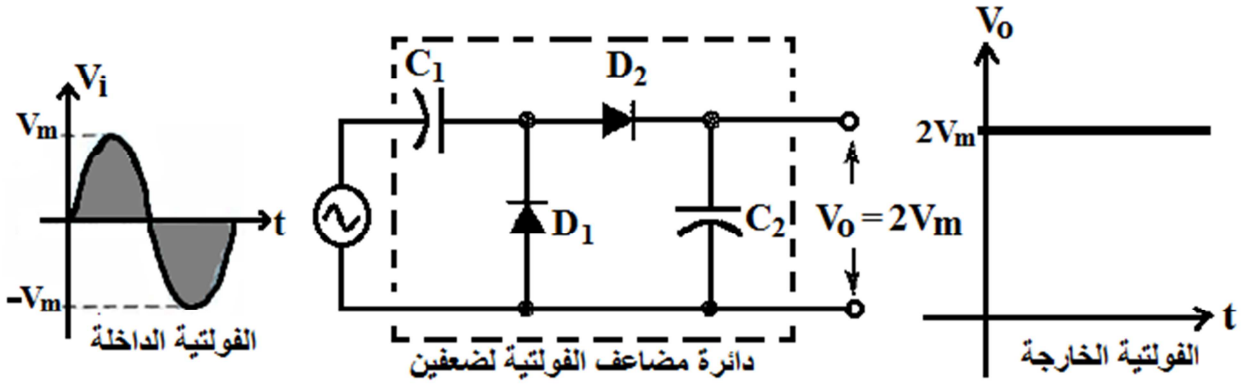
٣.٢.٣ مضاعفات الفولتية (Voltage Multipliers)

هي دوائر تستعمل للحصول على فولتية إخراج مستمرة تقريباً بالاعتماد على فولتية إدخال متناوبة، وتستعمل تلك الدوائر في التطبيقات التي تحتاج إلى فولتية عالية مع تيار قليل (مقاومة حمل عالية) مثل تزويد أنبوبة الأشعة الكاثودية (CRO) المستعملة في راسم الإشارة و التلفاز بالفولتية العالية.

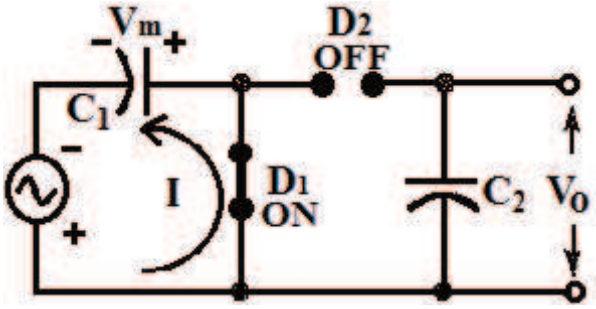
عناك عدة أنواع من دوائر مضاعفات الفولتية منها:

أ- مضاعف الفولتية للضعف (Voltage Doubler)

توفر هذه الدائرة فولتية مستمرة تساوي ضعف فولتية ذروة الإدخال ($2V_m$). الشكل (٣-٢٣) يوضح دائرة مضاعف الفولتية لضعفين والإشارة الداخلة والخارجة منها.

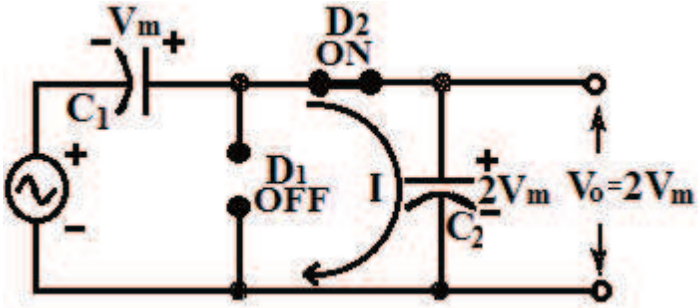


شكل ٣-٢٣: دائرة مضاعف الفولتية لضعف



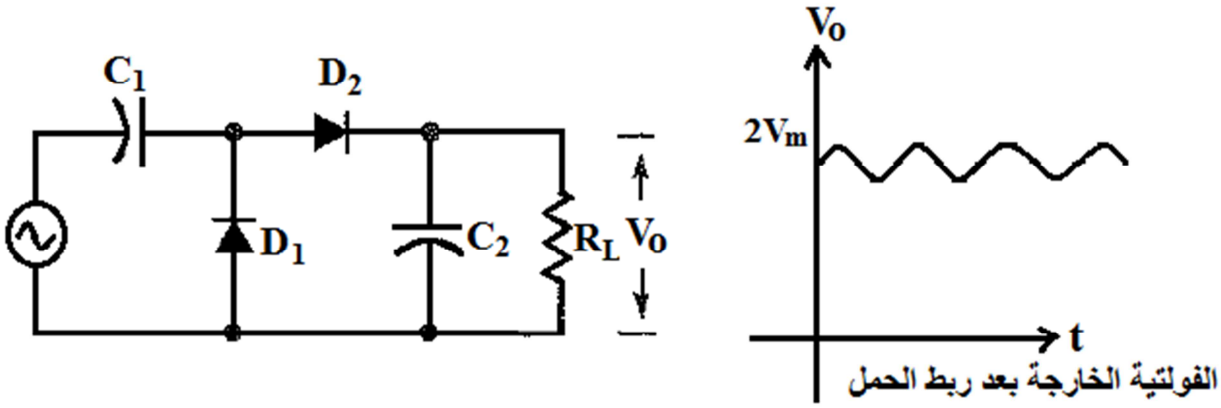
خلال النصف السالب من فولتية الإدخال يكون الثنائي D_1 منحاز أماميا فيتصرف كدائرة مغلقة، ويكون الثنائي D_2 منحاز عكسياً ويتصرف كدائرة مفتوحة، ونتيجة لذلك تشحن المتسعة C_1 عبر الثنائي D_1 إلى فولتية الذروة (V_m) وبالقطبية الموضحة بالشكل المجاور.

خلال النصف الموجب من فولتية الإدخال يكون الثنائي D_1 منحاز عكسياً ويتصرف كدائرة مفتوحة والثنائي D_2 منحاز أماميا فيتصرف كدائرة مغلقة ، ونظراً لوجود المتسعة C_1 المشحونة والتي يمكن اعتبارها



كبطارية جهدها V_m مربوطة على التولي مع المصدر ولذلك تشحن المتسعة C_2 عبر الثنائي D_2 إلى جهد يعادل ضعف ذروة الإدخال ($2V_m$)، ويكون الإخراج على طرفي المتسعة C_2 كما موضح بالشكل المجاور.

ان الفولتية المستمرة المتحصل عليها من المضاعف ينبغي الاستفادة منها في تطبيق معين (أي ربط حمل معين)، الشكل (٣-٢٤) يوضح دائرة مضاعف الفولتية بعد ربط حمل معين.

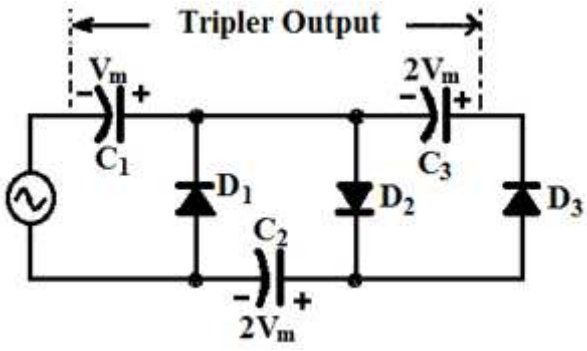


شكل ٣-٢٤: دائرة مضاعف الفولتية لضعف مع وجود حمل

وكما نلاحظ من الشكل فانه وبمجرد ربط الحمل (R_L) فان المتسعة C_2 ستبدأ بتفريغ شحنتها عبر مقاومة الحمل، وكلما كان ثابت الزمن (R_LC) اكبر كلما احتفظت المتسعة بشحنتها اكثر وعندها تكون فولتية الإخراج تقريباً مستمرة وتساوي ضعف ذروة الإدخال ($V_o \approx 2V_m$)، ولهذا السبب فان دوائر مضاعف الفولتية تكون مناسبة للتطبيقات التي تحتاج إلى فولتيات عالية وبتيارت قليلة (مقاومة حمل عالية).

ب- مضاعف فولتية إلى ثلاثة اضعاف (Voltage Tripler)

بإضافة مقطع (ثنائي ومتسعة) ثالث لدائرة مضاعف الفولتية لضعفين نحصل على دائرة مضاعف الفولتية لثلاثة أضعاف الموضحة بالشكل (٣-٢٥). ان عمل أول مقطعين هو ذاته في دائرة مضاعف الفولتية لضعفين، وخلال ذروة الإدخال السالبة ينحاز الثنائي (D_3) أماميا وتنشحن المتسعة (C_3) عبره إلى جهد ($2V_m$).

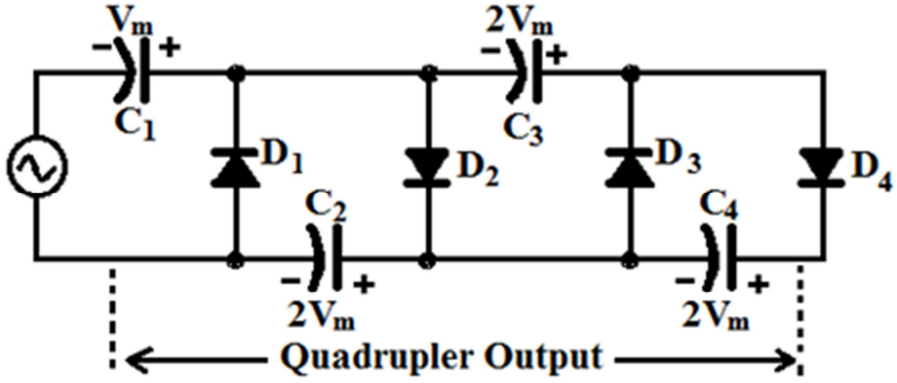


شكل ٣-٢٥: دائرة مضاعف الفولتية لثلاثة أضعاف

ان طرفي إخراج الدائرة يكون عبر المتسعتين C_1 وC_3 ، ويربط مقاومة الحمل بين طرفي إخراج مضاعف الفولتية لثلاثة اضعاف، وكلما كان ثابت الزمن كبيراً تكون فولتية الإخراج تساوي تقريباً ثلاثة أضعاف ذروة الإدخال ($V_o \approx 3V_m$).

جـ – مضاعف فولتية إلى أربعة اضعاف (Voltage Quadrupler)

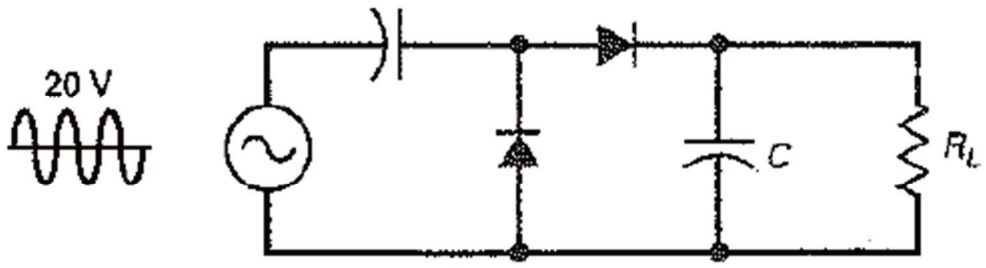
الشكل (٣–٢٦) يوضح مضاعف الفولتية لأربعة اضعاف، والتي تتضمن أربعة مقاطع (ثنائي–متسعة) وبشكل متتالي، المقاطع الثلاثة الأولى تمثل مضاعف الفولتية لثلاثة اضعاف، والمقطع الرابع يجعل الدائرة برمتها مضاعف لأربعة اضعاف، المتسعة الأولى (C_1) تشحن إلى فولتية الذروة (V_m) وجميع بقية المتسعات تُشحن إلى ضعف فولتية الذروة وبالقطبية الموضحة بالشكل. ان إخراج دائرة المضاعف لأربعة اضعاف يكون عبر متسعتين (C_2 , C_4)، وبالإمكان ربط مقاومة حمل كبيرة (ثابت زمن كبير) على طرفي الإخراج لنحصل على فولتية مستمرة قيمتها تساوي أربعة أضعاف ذروة فولتية الإدخال ($V_o \approx 4V_m$).



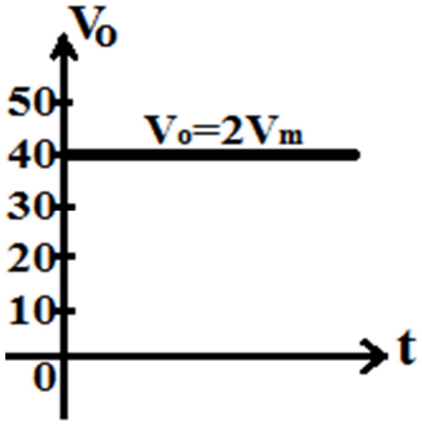
شكل ٣–٢٦: دائرة مضاعف الفولتية لأربعة أضعاف

نظرياً يمكن إضافة عدد غير محدد من المقاطع، ولكن مقدار التموج في فولتية الإخراج تزداد مع كل إضافة لمقطع (ثنائي–متسعة). ان زيادة التموج هو السبب الذي يجعل مضاعفات الفولتية (لضعفين، ثلاثة اضعاف، أربعة اضعاف) غير مستعملة في مجهزات القدرة المستمرة واطئة الفولتية، وبذلك يقتصر استعمال دوائر مضاعفات الفولتية في التطبيقات التي تتطلب فولتيات عالية (مئات أو آلاف الفولتات) مع تيار قليل.

مثال (٣–٥): ارسم شكل الفولتية الخارجة من الدائرة التالية، اعتبر ان الثنائيات مثالية وثابت الزمن كبير.



الحل:



نلاحظ ان الدائرة هي مضاعف فولتية لضعفين، ولكون ثابت الزمن كبير جداً، فان الفولتية الخارجة من الدائرة ستكون فولتية مستمرة وذات قيمة تساوي ضعف ذروة الإدخال أي (40V)، ويكون شكل فولتية الإخراج كما في الشكل المجاور.

٣.٣ ثنائيات الاستعمالات الخاصة

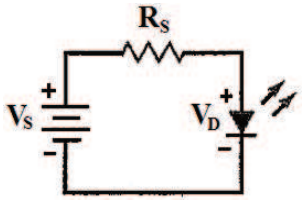
ان استعمال ثنائي التقويم الموجي في دائرة مجهز القدرة في تحويل الفولتية المتناوبة إلى فولتية مستمرة يعتبر من اكثر الثنائيات استعمالاً، إلا ان هناك تطبيقات أخرى يمكن ان تقوم بها ثنائيات أشباه الموصلات بمواصفات خاصة . في هذه الفقرة سوف نتطرق لبعض من تلك الثنائيات وتطبيقاتها.

أولاً: الثنائي الباعث للضوء Light-Emitting Diode LED

الشكل المجاور يمثل رمز الثنائي الباعث للضوء، والذي يختلف عن رمز ثنائي التقويم بالأسهم المتجهة من جهة الوصلة للخارج والتي تشير إلى الضوء المنبعث من الثنائي. ويشار للثنائي الباعث للضوء بالاختصار (LED_S).

ذكرنا سابقاً انه في حالة ثنائي شبه الموصل المنحاز أماميا فان الكترونات حزمة التوصيل تعبر الوصلة وتسقط في الفجوات، وعند انتقال الكترون من حزمة التوصيل إلى حزمة التكافؤ فانه يشع طاقة تعادل فرق الطاقة بين المستويين، في حالة الثنائي الاعتيادي (ثنائي التقويم) فان الطاقة المنبعثة تكون على شكل حرارة، ولكن في حالة الثنائي الباعث للضوء فان الطاقة المنبعثة تكون على شكل ضوء.

باستخدام عناصر مثل الغاليوم (Gallium) والزرنيخ (Arsenic) والفسفور (Phosphorus)، يستطيع المُصنع انتاج ثنائيات باعثة للضوء تشع اضواء حمراء أو خضراء أو صفراء أو تحت الحمراء (غير مرئية)، ان الثنائيات باعثة للضوء والتي تنتج أشعة مرئية تستعمل في عارضات الأجهزة والحاسبات والساعات الرقمية، اما الثنائي الباعث لأشعة غير مرئية فيكون لها تطبيقات في أجهزة الحماية ضد السرقة ومجالات أخرى تتطلب أشعة غير مرئية. في الآونة الأخيرة شاع استعمال الثنائي الباعث للضوء في أجهزة الإنارة بدلاً عن مصابيح الإضاءة التقليدية (مصابيح التنكستن أو الغازية) وذلك لما تمتاز به من صغر الحجم وخفة الوزن، مجال طيفي واسع، عمر استعمال طويل بالمقارنة مع المصابيح التقليدية، صغر الفولتية المطلوبة للتشغيل (بحدود بضعة فولتات) وسرعة الغلق والفتح (بضع نانو ثانية).



الشكل المجاور يمثل دائرة الثنائي الباعث للضوء، حيث تمثل V_S فولتية التحييز الأمامية، R_S مقاومة لتحديد التيار الأمامي لكي لا يمر تيار اكبر من تحمل الثنائي (والذي يكون عادة بين 10 إلى 50 ملي أمبير)، و V_D هو فرق الجهد بين طرفي الثنائي والذي يكون عادة بين 1.5 إلى 2.5 فولت وذلك تبعاً للون الضوء المنبعث، التيار المار و اقصى تيار يمكن ان يتحمله الثنائي.

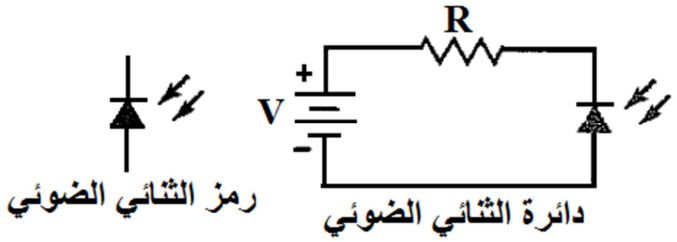
بتطبيق قانون كيرشوف الخاص بفروق الجهد يمكننا إيجاد التيار المار بثنائي الباعث للضوء (I_S) بالمعادلة التالية:

$$I_S = \frac{V_S - V_D}{R_S}$$

تمتاز الثنائيات الباعثة للضوء بكون فولتية الانهيار العكسية لها منخفضة نسبياً حيث تكون عادة بحدود 3 إلى 5 فولت، ولذا يجب تجنب تسليط فولتيات عكسية عالية على ثنائي الباعث للضوء لان ذلك يؤدي إلى تلف الثنائي، عادة ما يتم ربط ثنائي عادي (تقويم) على التوازي مع طرفي ثنائي الباعث للضوء وباتجاه معاكس وذلك لحماية الثنائي الباعث للضوء من فولتيات التحييز العكسي العالية.

ثانياً: الثنائي الضوئي Photodiode

ذكرنا سابقاً ان الطاقة الحرارية تزيد من حاملات الشحنة الأقلية في الثنائي، وكلما ارتفعت درجة الحرارة زاد عدد حاملات الشحنة وبالتالي يزداد التيار العكسي المار بالثنائي بزيادة درجة الحرارة، وكذلك تستطيع الطاقة الضوئية انتاج حاملات الشحنة الأقلية. بتوفير منفذ (شباك) يستطيع الضوء من خلاله الوصول للوصلة، يستطيع المُصنع ان ينتج ثنائياً ضوئياً (Photodiode)، وعندما يسقط ضوء خارجي على وصلة ثنائي ضوئي منحاز عكسياً تتولد أزواج (الكترون–فجوة) داخل طبقة الاستنزاف. وكلما كان الضوء قوياً زاد عدد حاملات الشحنة الأقلية المنتجة ضوئياً وزاد التيار العكسي. ولهذا السبب يمكن عمل متحسسات (كاشفات) ضوئية ممتازة من الثنائيات الضوئية. عادة ما يكون التيار العكسي لثنائي ضوئي بوجود الضوء بحدود عشرات المايكروامبير. الشكل التالي يوضح رمز ودائرة الثنائي الضوئي.

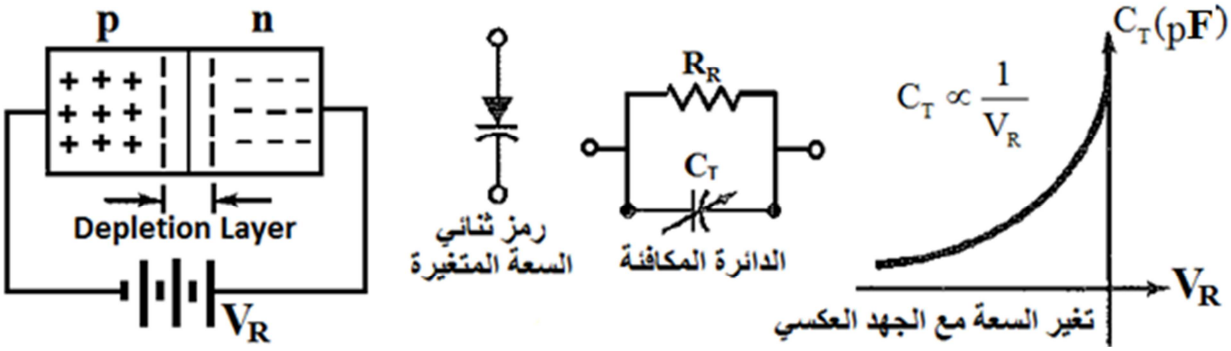


ثالثاً: ثنائي السعة المتغيرة Varactor

يستعمل ثنائي السعة المتغيرة بكثرة في أجهزة الاستقبال التلفزيونية والراديوية، وفي مختلف أجهزة الاتصالات وذلك لمقدرتها على التوليف الإلكتروني (Electronic Tuning) ولذلك يسمى ثنائي السعة المتغيرة بثنائي التوليف (Tuning Diode).

ان الفكرة الأساسية لعمل ثنائي السعة المتغيرة يقوم على الاستفادة من خصائص الثنائي في حالة الانحياز العكسي، حيث ان عرض طبقة الاستنزاف تزداد عرضاً حتى يصبح فرق جهدها مساوياً للفولتية العكسية المسلطة عليها. وكلما كبرت الفولتية العكسية زاد عرض طبقة الاستنزاف، وبسبب عدم امتلاك طبقة الاستنزاف لحاملات الشحنة فهي تعمل عمل عازل كهربائي. هذا من ناحية، اما من الناحية الأخرى، فان منطقتي p و n المطعمتين تعملان عمل موصلين جيدين. وهكذا نستطيع ان نتخيل المنطقتين p و n المفصولتين بطبقة الاستنزاف متسعة ذات لوحين متوازيين. عندما تزداد الفولتية العكسية يزداد عرض طبقة الاستنزاف وهذا يشبه تحريك اللوحين المتوازيين بحيث يزداد البعد بينهما، وبالتالي فان السعة تقل عند زيادة الفولتية العكسية، وبالتالي يمكننا التحكم بالسعة من خلال الفولتية العكسية المسلطة.

الشكل التالي يوضح الانحياز العكسي والدائرة المكافئة لثنائي السعة المتغيرة ومنحنى تغير السعة مع الجهد العكسي ورمز ثنائي السعة المتغيرة.

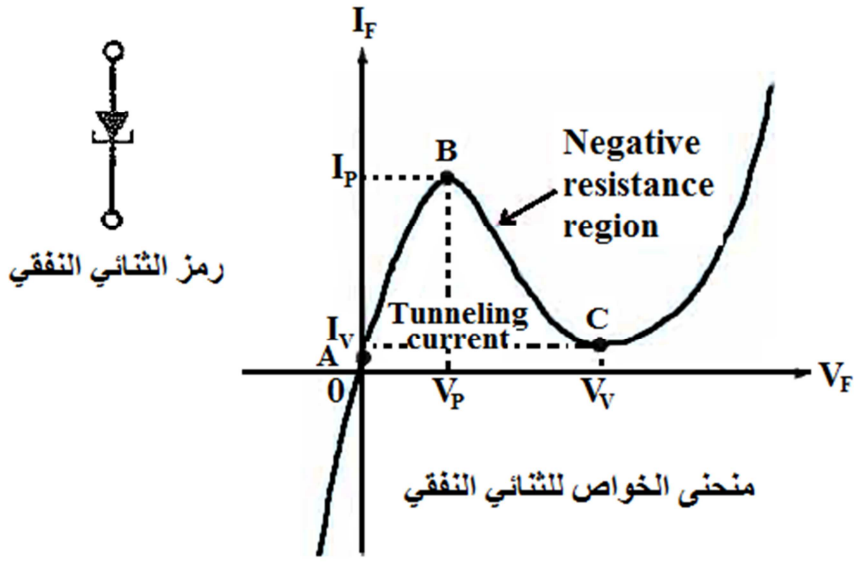


رابعاً: الثنائي النفقي Tunnel Diode

يمتاز الثنائي النفقي بخاصية فريدة تدعى بالمقاومة السالبة (Negative Resistance)، وهذه الخاصية تجعله مفيداً في التطبيقات المتعلقة بالمذبذبات ومضخمات الموجات الدقيقة. يتم تصنيع الثنائي النفقي من مادة الجرمانيوم أو (Gallium arsenide)، ويتم التطعيم بنسبة كبيرة جداً بالمقارنة مع تطعيم الثنائي العادي، ان ذلك التطعيم العالي يؤدي إلى جعل طبقة الاستنزاف ضيقة جداً، حيث يتناسب سمك طبقة الاستنزاف عكسياً مع الجذر التربيعي لتركيز الشوائب. حيث يصل سمك طبقة الاستنزاف في الثنائي

النفقي إلى اقل من (0.01μm) ويصل المجال الكهربائي عبر الوصلة إلى اكثر من (900kV/cm). تحت هذه الظروف وبسبب الطبيعة الموجية للإلكترون فقد يحتمل ان يحفر الإلكترون نفقاً وينفذ من حاجز الجهد، وتسمى هذه الظاهرة بالتنفيق (Tunneling) حيث يتمكن الإلكترون من عبور تل الطاقة على الرغم من عدم امتلاكه الطاقة الكافية لهذا يسمى بالثنائي النفقي. لا يمكن تفسير هذه الظاهرة بالاعتماد على مبادئ الميكانيك الكلاسيكي، بينما يتمكن الميكانيك الكمي من تفسيرها بالاعتماد على حقيقة كون الموجة في الميكانيك الكمي لها القدرة على اختراق حاجز الجهد من خلال استخدام الطاقة المرافقة في عملية الاختراق، ويكون تيار التنفيق محسوساً اذا كانت طبقة الاستنزاف رقيقة جداً.

الشكل التالي يوضح رمز الثنائي النفقي ومنحنى الخواص له.



نلاحظ من منحنى الخواص ان التطعيم العالي للثنائي النفقي يجعله موصلاً للتيار في كامل منطقة الانحياز العكسي ولا وجود لظاهرة الانهيار التي تظهر في الثنائي العادي، في الانحياز الأمامي ولفولتيات تحييز واطئة (المنطقة من A إلى B) فان ضيق طبقة الاستنزاف سوف تسمح للإلكترونات بالتنفيق ويتصرف الثنائي كموصل. عند النقطة B فان فولتية التحييز الأمامية ستعزز الحاجز وبالتالي يقل التيار مع زيادة فولتية التحييز وتكون قيمة المقاومة سالبة وتستمر الحالة إلى النقطة C وعندها تنتهي ظاهرة التنفيق ويرجع الثنائي لسلوكه المتعارف عليه في الثنائي الاعتيادي.

خامساً: ثنائي شوتكي Schottky Diode

عند الترددات العالية جداً (الأعلى من 300MHz) فان الثنائي العادي يفشل في عملية تقويم الموجة إذ لا تتناسب سرعته في الغلق والفتح (الاستجابة للانحياز الأمامي والعكسي) مع سرعة تناوب إشارة الإدخال، وللتغلب على هذه المشكلة صمم ثنائي شوتكي. في هذا الثنائي يستعمل معدن مثل الذهب أو الفضة أو البلاتين على جهة واحدة من الوصلة وسليكون مشوب (عادة من نوع n) على الجهة الثانية، لذا يكون هذا النوع من الثنائيات نبيطة أحادية القطبية لان الإلكترونات الحرة هي الحاملات الأغلبية في جهتي الوصلة،

وكذلك فان ثنائي شوتكي لا يمتلك طبقة استنزاف أو خزن شحنة ونتيجة لذلك يمكن تحويله من وضع الغلق إلى الفتح بصورة اسرع بكثير من الثنائي العادي (ثنائي القطبية)، بالتالي يمكن استعمال ثنائي شوتكي في التطبيقات المتعلقة بتقويم الموجة في الترددات العالية جداً. الشكل المجاور يوضح رمز ثنائي شوتكي.

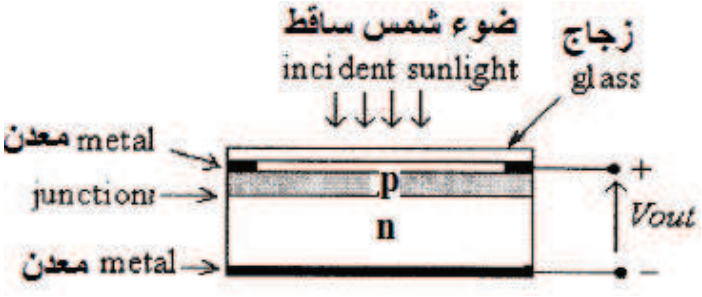
سادساً: ثنائي الرجوع المدرج Step-Recovery Diode

في هذا النوع من الثنائيات الخاصة يكون مستوى التطعيم قرب الوصلة اقل مما عليه في منطقتي n و p مما يوفر للثنائي إمكانية خزن الشحنة. خلال التوصيل الأمامي يعمل الثنائي عمل ثنائي اعتيادي، اما عند الانحياز العكسي فان ثنائي الرجوع المدرج يوصل التيار بينما تنضبط طبقة الاستنزاف ومن ثم فجأة يهبط التيار العكسي إلى الصفر. يستعمل ثنائي الرجوع المدرج في التطبيقات المتعلقة بدوائر النبضات والدوائر الرقمية لتوليد نبضات سريعة جداً الشكل المجاور يمثل رمز ثنائي الرجوع المدرج.

سابعاً: ثنائي الليزر Laser Diode

في حالة الثنائي الباعث للضوء يكون الضوء المنبعث غير متشاكه (Noncoherent light) وذلك لان الكترونات التوصيل تهبط بصورة عشوائية إلى مستوى التكافؤ ويكون انبعاث الضوء ناتج من عملية الانبعاث التلقائي، بينما ثنائي الليزر انبعاث الضوء ناتج من عملية تسمى الانبعاث المحفز ويكون الضوء الناتج من انتقال الإلكترونات من حزمة التوصيل إلى حزمة التكافؤ يمتاز بالتشاكه بالإضافة للشدة العالية والنقاوة الطيفية، يبعث ثنائي الليزر ضوء بالوان مختلفة منها الأحمر، الأخضر، الأزرق. لثنائي الليزر تطبيقات واسعة منها استعماله الاتصالات، أنظمة تحديد المدى، أجهزة الطباعة الليزرية، محرك الأقراص المدمجة، تطبيقات صناعية، تطبيقات طبية. ويسمى ثنائي الليزر أحيانا ليزر أشباه الموصلات.

ثامناً: الخلية الشمسية Solar Cells



وهي عبارة عن وصلة موجب–سالب (p–n Junction) مصنوعة عادة من السليكون وكما هو موضح بالشكل المجاور.

تعمل الخلية الشمسية على تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية، حيث يسبب الضوء الساقط على منطقة الوصلة انتقال بعض الكترونات التكافؤ إلى حزمة التوصيل مخلفة فجوة في محلها، وتعمل التوصيلات المعدنية على جمع الإلكترونات الحرة المتولدة مكونة تيار كهربائي تعتمد شدته على خصائص الخلية بالإضافة إلى شدة الإشعاع الساقط.

تاسعاً: ثنائي الزينر Zener Diode

يعتبر ثنائي الزينر من اهم الثنائيات الخاصة والذي يستعمل في كثير من التطبيقات واهمها تنظيم الفولتية، ولذا فسنفرد له فصل خاص به وهو الفصل القادم.

أسئلة الفصل الثالث

س١: عرف كل من

دوائر التقويم، فولتية الذروة العكسية، عامل التموج، كفاءة التعديل، دوائر الإلزام، الثنائي الضوئي، ظاهرة التنفيق.

س٢: قارن بين كل من دائرة المحدد الموجب، دائرة الملزم الموجب، دائرة مضاعف الفولتية لضعفين وذلك من حيث: رسمة الدائرة، الوظيفة و شكل فولتية الإخراج.

س٣: قارن بين مقوم نصف موجة ومقوم القنطرة.

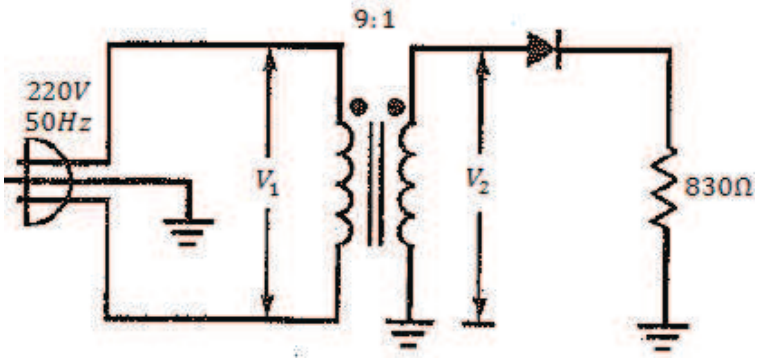
س٤: علل ما يلي

أ- استعمال مقوم التفرع المركزي في حالة تقويم الفولتيات الواطئة.

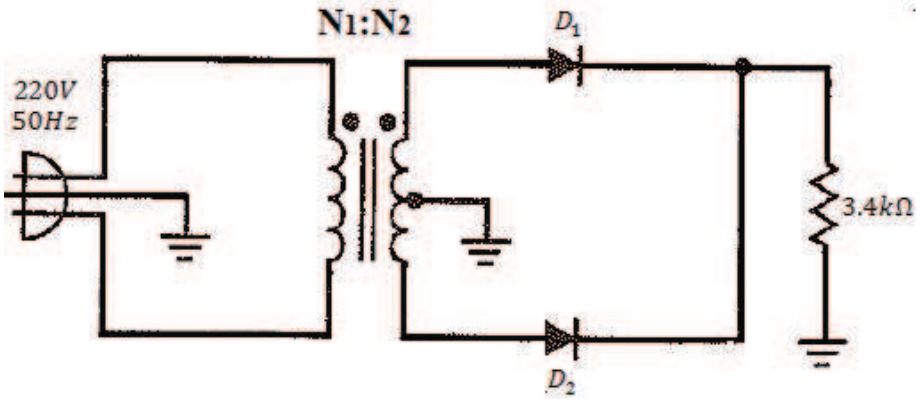
ب-استعمال المرشحات في دائرة مجهز القدرة المستمر.

س٥: اشرح عمل دائرة الملزم السالب غير المنحاز مع الرسم.

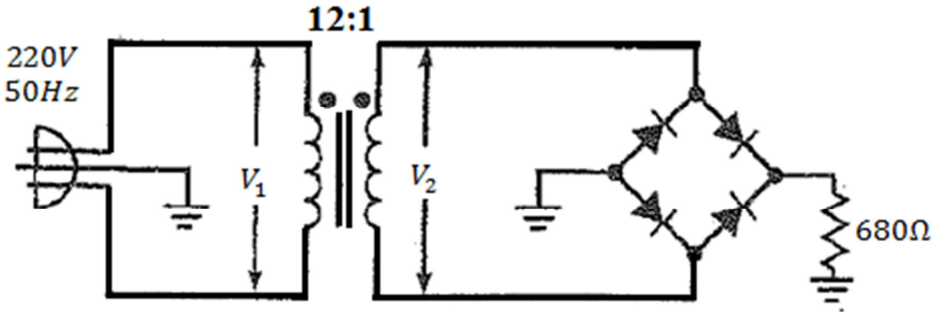
س٦: في الشكل المجاور، ما مقدار فولتية الحمل المستمرة؟ وما مقدار تيار الحمل المستمر؟ وما مقدار PIV على كل ثنائي؟ وما مقدار عامل التموج وكفاءة التعديل للمقوم.



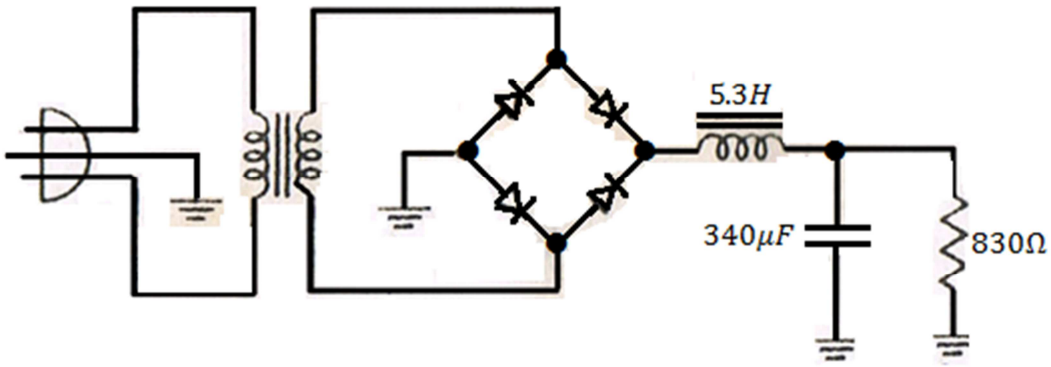
س٧: نسبة اللف في الشكل التالي تساوي (7:1)، أوجد فولتية الذروة للحمل؟ وما مقدار فولتية الحمل المستمرة ؟ وما مقدار تيار الحمل؟ وما مقدار PIV على كل ثنائي، وما مقدار عامل التموج وكفاءة التعديل.



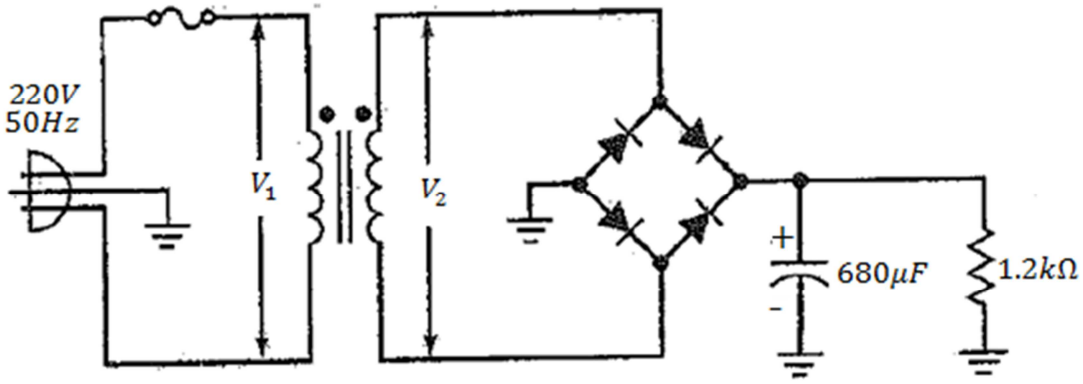
س٨: في الشكل التالي أوجد: ذروة الإدخال، فولتية الحمل المستمرة، تيار الحمل المستمر، تردد فولتية الإخراج، عامل التموج، كفاءة التعديل، PIV على كل ثنائي.



س٩: ان ذروة إشارة الموجة الكاملة عند إدخال الملف الخانق في الشكل التالي تساوي (28V) ما مقدار تموج الإخراج، اذا كان للملف الخانق مقاومة dc مقدارها (35Ω) فما مقدار فولتية الإخراج المستمرة؟

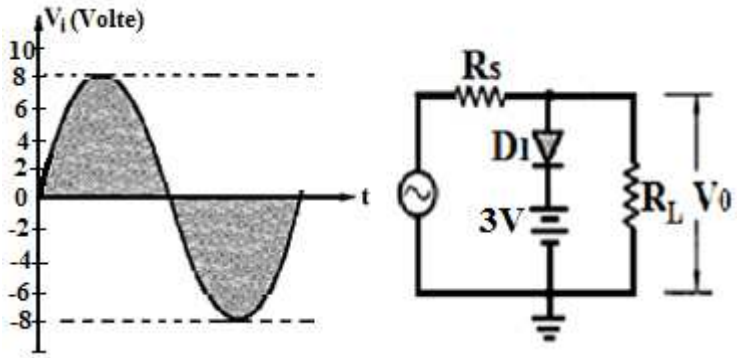


س١٠: للفولتية الثانوية في الشكل التالي قيمة عظمى مقدارها (32V) ، فما مقدار فولتية الحمل المستمرة؟ ما مقدار القيمة الفعالة rms للتموج؟ ما مقدار عامل التموج؟

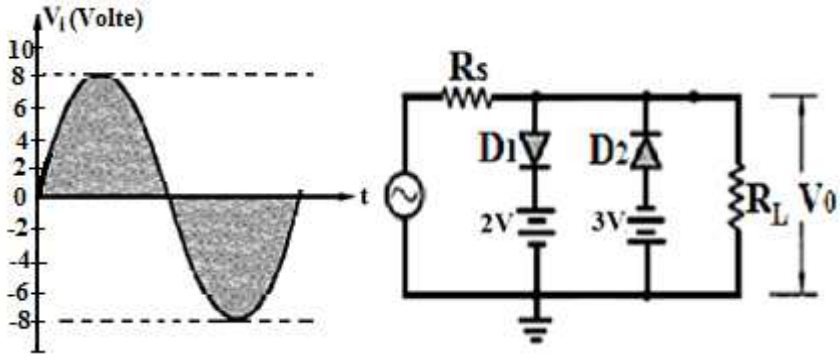


س١١: في كل دائرة من الدوائر التالية اذكر اسم الدائرة، ثم ارسم شكل الفولتية الخارجة.

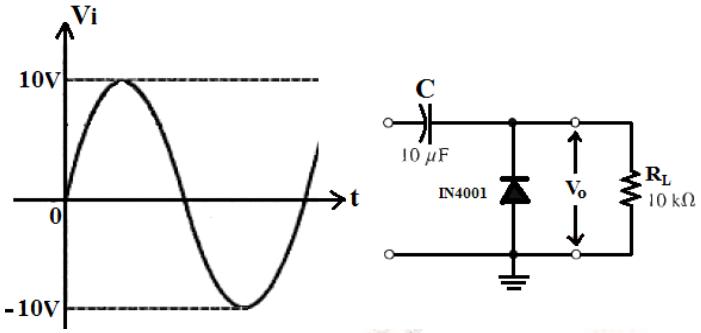
دائرة (١)



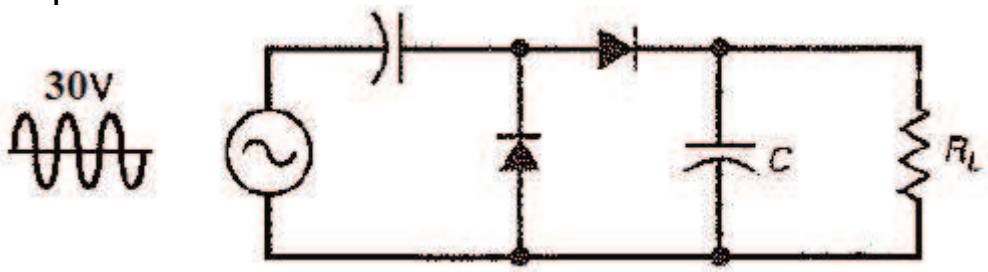
دائرة (٢)



دائرة (٣)



دائرة (٤)



س١٢: ما مقدار التيار المار في الثنائي الباعث للضوء في الدائرة التالية اذا علمت ان فرق الجهد على طرفي الثنائي الباعث هو (2V).