ذكرنا سابقاً انه يجب تجنب عمل الثنائي العادي (ثنائي التقويم) في منطقة الانهيار (الانكسار) التهدمي، الا ان هناك نوع خاص من الثنائيات يُصمم للعمل ضمن منطقة الانهيار وهو ثنائي الزينر (Zener Diode)، ويستعمل ثنائي الزينر بكثرة في الدوائر الإلكترونية بحيث يأتي بالمرتبة الثانية بعد ثنائي التقويم. سيخصص هذا الفصل لدراسة تركيب وخصائص ثنائي الزينر وتطبيقاته.

١.٤ تركيب ثنائي الزينر

عادة ما يستعمل السليكون في صناعة ثنائي الزينر، ويشابه تركيب ثنائي الزينر تركيب الثنائي العادي، فهو عبارة عن وصلة شبه موصل (موجب–سالب) غير ان الاختلاف يكون في نسبة التشويب حيث يكون نسبة التشويب في ثنائي الزينر اكبر من نسبة تشويب الثنائي العادي.

ان ثنائي الزينر مصمم للعمل في منطقة الانهيار، ويمكن التحكم في فولتية الانهيار من خلال التحكم في نسبة التشويب لحظة صناعة الثنائي، حيث تقل فولتية الانهيار كلما زادت نسبة التشويب فيمكن الحصول على فولتيات انهيار تتراوح بين (1.5V) إلى (200V) أو اكثر.

في حالة ثنائي الزينر هناك نوعان من الانهيار وهما الانهيار التهدمي وانهيار زينر، وفيما يلي شرح مختصر لكل نوع:

أ. انهيار تهدمي (Avalanche Breakdown)

سبق وان تناولنا في الفصل الثاني ظاهرة الانهيار التهدمي الذي يظهر في الثنائي العادي في حالة الانحياز العكسي، حيث تعمل فولتية التحييز العكسية على تعجيل حاملات الشحنة الأقلية في منطقة الاستنزاف ومتى ما كانت الفولتية العكسية المسلطة عالية بما يكفي فان حاملات الشحنة الأقلية المتحركة ستتمكن من تحرير الكترونات تكافؤية والإلكترونات المتحررة تتعجل بدورها لتحرر المزيد من الإلكترونات التكافؤية وبالنتيجة نحصل على عدد كبير من الإلكترونات المتحركة (تيار) وتسمى تلك الظاهرة بالانهيار التهدمي، في حالة ثنائي الزنير فان نفس الظاهرة (الانهيار التهدمي) تحدث ولكن بفولتيات انهيار اقل نسبياً حيث تحدث ظاهرة الانهيار التهدمي لفولتيات اكبر تقريباً من (6V) ، في حالة الثنائي الاعتيادي فان الانهيار يحدث عادة لفولتيات اعلى من (50V) أو اكثر وهذا عائد لاختلاف نسبة التشويب بين الثنائي العادي وثنائي الزينر.

ب. انهيار زينر (Zener Breakdown)

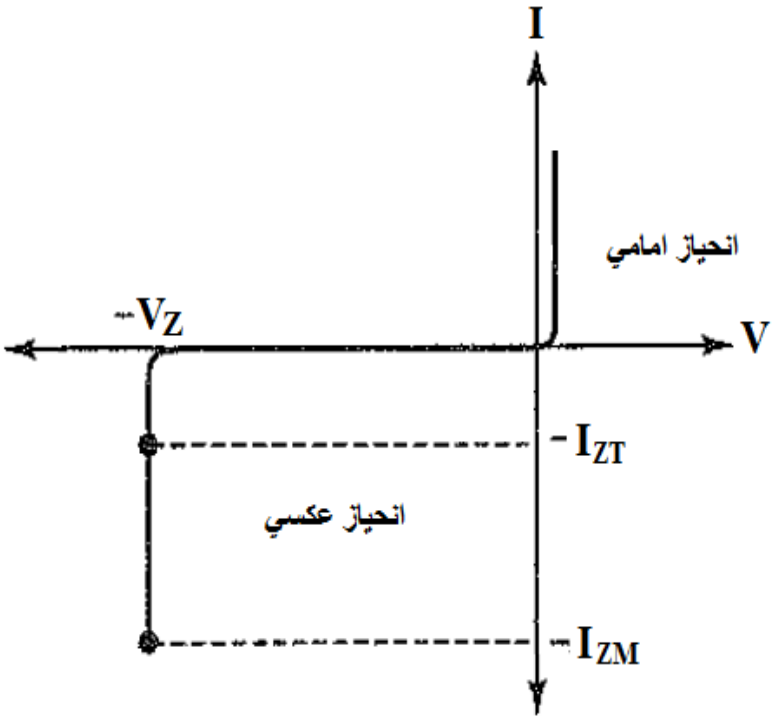
يحدث هذا النوع من الانهيار عندما يشوب ثنائي ما بغزارة (كما هو الحال في ثنائي زينر)، حيث تكون طبقة الاستنزاف ضيقة جداً وبالتالي يكون المجال الكهربائي بين طرفي منطقة الاستنزاف شديداً جدا،

وعندما يصل شدة المجال إلى حوالي (300000V/cm) فان تلك الشدة تكفي لسحب الكترونات من مدارات التكافؤ فتتكون الكترونات حرة في منطقة الاستنزاف، ان توليد الإلكترونات الحرة بهذه الطريقة تدعى انهيار زينر (كما تسمى كذلك بانبعاث المجال العالي High-Field Emission).

ان انهيار زينر هو الذي يسود في فولتيات الانكسار التي تقل عن (4V) بينما تسود ظاهرة الانهيار التهدمي في فولتيات الانكسار التي تزيد عن (6V). في البداية كان الاعتقاد بان ظاهرة انهيار الزينر هي الوحيدة الموجودة في انكسار الثنائيات، ولهذا شاع استعمال اسم ثنائي الزينر قبل اكتشاف ظاهرة الانهيار التهدمي وبقيت جميع الثنائيات المصنوعة للعمل في منطقة الانكسار تدعى ثنائيات زينر بصرف النظر عن كون الانهيار الذي يحدث فيها من نوع انهيار زينر أو انهيار تهدمي.

٢.٤ خصائص ثنائي الزينر

الشكل (٤–١) يمثل منحنى الخواص لثنائي الزينر. يلاحظ من الشكل ان خواص ثنائي الزينر في منطقة الانحياز الأمامي لا يختلف عن منحى الخواص للثنائي العادي. اما في حالة الانحياز العكسي فنلاحظ ان التيار العكسي يكون صغيراً لحد الإهمال حتى تصبح فولتية التحييز العكسية قريبة من فولتية الانكسار (V_Z) فتحدث عندها زيادة كبيرة في التيار العكسي. ان الانكسار في ثنائي الزينر يكون له انحناء حاد جداً تعقبه زيادة عمودية تقريباً بالتيار ويلاحظ ان الفولتية على طرفي الزينر تبقى ثابتة تقريباً وتساوي (V_Z) في معظم منطقة الانكسار.



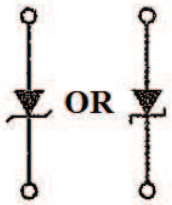
شكل (٤–١) منحنى الخواص لثنائي الزينر

ان تبديد القدرة (Power dissipation) في ثنائي الزنير الذي يعمل في منطقة الانكسار يساوي حاصل ضرب فولتية انكساره في التيار المار من خلاله، أي ان: $P_Z = V_Z I_Z$

فمثلاً لو كان V_Z=12V و I_Z=10mA فان: $P_Z = V_Z I_Z, \quad P_Z = 12 \times 10 \times 10^{-3} = 0.12W$

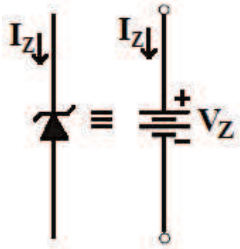
ان لكل ثنائي زينر اقصى قيمة للقدرة المبددة P_{ZMAX} يمكن ان يتحمله ثنائي دون ان يتلف، وعليه كلما كانت P_Z اقل من اقصى قدرة فان ثنائي الزينر لن يعطب. ان ثنائيات زينر التجارية لها مدى تحمل قدرة يتراوح بين (0.25W) إلى اكثر من (50W).

غالباً ما تبين استمارة المعلومات مقدار اقصى تيار يتحمله ثنائي الزينر دون تجاوز مدى تحمل القدرة، ويرمز لأقصى تيار يمكن ان يتحمله ثنائي الزينر بالرمز I_{ZM} والعلاقة التي تربط بين اقصى تيار ومدى تحمل القدرة هي: $I_{ZM} = \frac{P_{ZMAX}}{V_Z}$

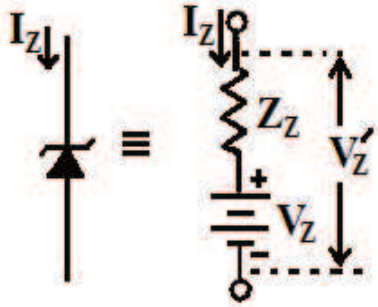


الشكل المجاور يمثل رمز ثنائي الزينر والذي يكون بصورتين.

٣.٤ الدائرة المكافئة لثنائي الزينر



كتقريب أول (تقريب مثالي) يمكن اعتبار ثنائي زنير العامل في منطقة الانهيار كبطارية ذات فولتية مقدارها فولتية الانهيار V_Z كما موضح بالشكل المجاور.



للحصول على نتائج اكثر دقة نأخذ بنظر الاعتبار انحدار منطقة الانكسار، لان منطقة الانكسار ليست عمودية تماماً لوجود ممانعة صغيرة للزينر. الشكل المجاور يوضح التقريب الثاني لثنائي الزينر.

عند اخذ ممانعة الزينر بنظر الاعتبار فان فولتية الزينر الكلية تعطى بالعلاقة: $V_Z' = V_Z + I_Z Z_Z$

وعادة ما تكون ممانعة الزينر صغيرة وتعطى بالعلاقة: $Z_Z = \frac{\Delta v}{\Delta i}$

٤.٤ المعامل الحراري (Temperature Coefficient) لثنائي الزينر

يعرف المعامل الحراري لثنائي الزينر بانه التغير المئوي في فولتية الانهيار لثنائي الزينر لكل درجة مئوية واحدة، ويرمز له بالرمز (T_C)، أي ان:

$$T_C = \frac{(\frac{\Delta V_Z}{V_{Zo}})}{\Delta T} \times 100\% \qquad (4-1)$$

حيث (ΔV_Z) هو التغير في فولتية انكسار الزينر ويعطى بالعلاقة: $\Delta V_Z = V_{Z1} - V_{Zo}$

(ΔT) هو التغير في درجة الحرارة ويعطى بالعلاقة: $\Delta T = T_1 - T_o$

وتمثل T_o درجة الحرارة المعتمدة عند تعيين فولتية انكسار الزينر V_{Zo} (والتي تكون عادة درجة حرارة الغرفة)، بينما تمثل T_1 درجة الحرارة التي تكون فيها فولتية انكسار الزينر V_{Z1} .

ومن علاقة المعامل الحراري يمكننا التعبير عن التغير في فولتية انكسار الزينر بالصيغة:

$$\Delta V_Z = T_C \times \Delta T \times V_{Zo}$$

ان المعامل الحراري لثنائي الزينر يكون سالب لفولتيات انكسار اقل من 4V (انهيار زينر)، بينما يكون المعامل الحراري موجب لفولتيات انكسار اكبر من 6V (انهيار تهدمي)، وتتغير إشارة المعامل الحراري من السالب إلى الموجب بين 4V إلى 6V .

مثال (٤-١): اذا علمت بان المعامل الحرارة لثنائي زينر هو ($0.004\%/^oC$) وجهد انكساره يساوي ($15V$) عند درجة حرارة (25^oC)، أوجد التغير في فولتية الزينر وفولتية الزنير عند ارتفاع درجة الحرارة إلى (100^oC) ؟

الحل: من معطيات المثال لدينا

$$T_C = 0.004\%/^oC \ , \ V_{Zo} = 15V \ , \ T_o = 25^oC, T_1 = 100^oC \ , \Delta V_Z = ? \ , \ V_{Z1} = ?$$

ان التغير في فولتية انكسار الزينر يعطى بالعلاقة: $\Delta V_Z = T_C \times \Delta T \times V_{Zo}$

بالتعويض نحصل على: $\Delta V_Z = (\frac{0.004}{100}) \times (100-25) \times 15$

$$\Delta V_Z = 0.045V$$

من النتيجة الأخيرة نلاحظ ان التغير في فولتية الزينر موجبة، أي انه في هذه الحالة فان فولتية انكسار الزينر قد زادت بارتفاع درجة الحرارة ويمكن حساب فولتية انكسار الزينر عند درجة 100^oC كما يلي:

$$V_{Z1} - V_{Zo} = 0.045V$$
$$V_{Z1} = 15.045V$$

أي ان جهد انكسار الزينر عند درجة حرارة (100^oC) هو ($15.045V$).

٥.٤ هبوط القدرة لثنائي الزينر بسبب ارتفاع درجة الحرارة

ان اقصى قدرة مبددة في ثنائي الزينر تنخفض مع ارتفاع درجة الحرارة، عادة ما يتم تعيين اقصى قدرة مبددة عند درجة حرارة معينة (غالباً ما تكون 50^oC) وعند ارتفاع درجة الحرارة عن 50^oC فان القدرة المبددة تهبط بسبب ارتفاع درجة الحرارة، وتعطى القدرة المبددة عند درجة حرارة معينة بالعلاقة:

$$P_D = P_{D(MAX)} - (mW/^oC) \times \Delta T \qquad (4-2)$$

P_D هو اقصى قدرة مبددة عند درجة حرارة T_2 بوحدات ملي واط (mW)

$P_{D(MAX)}$ هو اقصى قدرة مبددة عند درجة حرارة معينة (عادة تكون $T_1=50^oC$) بوحدات (mW)

$(mW/^oC)$ معامل هبوط القدرة

مثال (٤-٢): اقصى قدرة مبددة لثنائي معين هي $(400mW)$ عند درجة حرارة (50^oC)، أوجد اقصى قدرة مبددة عند درجة حرارة (90^oC) علماً بان معامل هبوط القدرة لذلك الزينر هو $(3.2mW/^oC)$ ؟

الحل: من معطيات المثال لدينا

$$P_{D(MAX)} = 400mW,\ T_1 = 50^oC,\ T_2 = 90^oC,\ (mW/^oC) = 3.2mW/^oC,\ P_D = ?$$

$$P_D = P_{D(MAX)} - (mW/^oC) \times \Delta T$$

$$P_D = 400mW - 3.2mW/^oC \times (90-50)^oC$$
$$P_D = 272mW$$

نلاحظ ان اقصى قدرة مبددة هبطت من 400mW إلى 272mW نتيجة لارتفاع درجة الحرارة من 50^oC إلى 90^oC

٦.٤ تطبيقات ثنائي الزينر:

لثنائي الزينر العديد من التطبيقات في الدوائر الإلكترونية، وسوف نقتصر في دراستها على اهم تطبيقين وهما:

١- استعمال ثنائي الزينر في دوائر تنظيم الفولتية.
٢- استعمال ثنائي الزينر في دوائر التحديد (التقليم).

أولاً: استعمال ثنائي الزينر في دوائر تنظيم الفولتية (Voltage Regulator)

تستعمل دوائر تنظيم الفولتية للحصول على فولتية إخراج مستمرة ثابتة القيمة بصرف النظر عن التغير في فولتية الإدخال أو التغير في قيمة مقاومة الحمل وتعتبر المرحلة الأخيرة من مراحل مجهز القدرة المستمر.

ان مقاومة الحمل المربوطة على مجهز القدرة قد تكون مقاومة مفردة أو قد تكون المقاومة المكافئة لعدة دوائر مربوطة على التوازي، وفي الحالتين فان مقاومة الحمل تكون متغيرة، ويمكن ان تتغير من قيمة صغيرة إلى قيمة كبيرة. وتعطى معادلة تنظيم الفولتية (Voltage Regulation) بالصيغة:

$$V_R = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\% \qquad (4\text{-}3)$$

حيث V_R النسبة المئوية لتنظيم الفولتية.

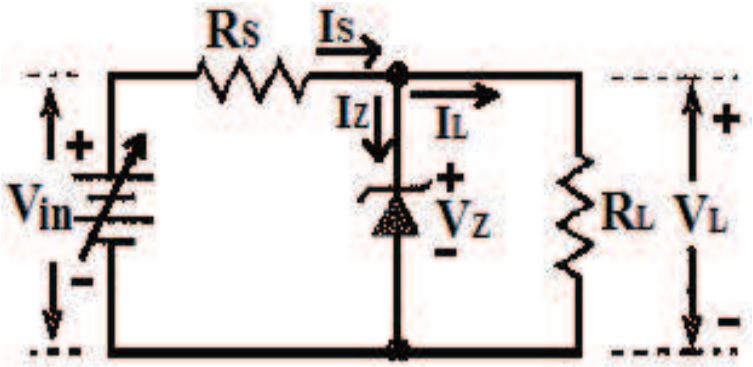
V_{NL} فولتية الإخراج المستمرة عند عدم وجود حمل ($R_L=\infty$).

V_{FL} فولتية الإخراج المستمرة عند حمل كامل (R_{LMIN}).

في مجهز القدرة المصمم بصورة جيدة تقل فولتية الحمل الكامل قليلاً عن الفولتية في حالة عدم وجود الحمل ($V_R \approx 0$)، وهذا يعني انه كلما كان V_R قليلاً كان مجهز القدرة افضل.

يعتبر استعمال ثنائي الزينر في دوائر تنظيم الفولتية من اهم تطبيقات ثنائي الزينر، ان الميزة الأساسية التي تجعل من ثنائي الزينر العنصر الأساسي في دوائر تنظيم الفولتية هي الثبوت النسبي للفولتية على طرفيه عندما يكون عاملاً في منطقة الانهيار.

الشكل (٤-٢) يمثل ابسط أنواع دوائر تنظيم الفولتية والذي يسمى منظم الزينر (Zener Regulator)، حيث يربط الحمل على التوازي على طرفي ثنائي الزينر، اما مقاومة التحديد R_S فوظيفتها تحديد التيار المار بثنائي الزينر لكي لا يتجاوز الحد الأقصى المسموح به لثنائي الزينر I_{ZMAX}.



شكل ٤-٢: دائرة منظم الزينر

كتقريب أولي يمكن اعتبار ثنائي الزينر العامل في منطقة الانهيار كبطارية جهدها V_Z ، وحيث ان الحمل مربوط على التوازي مع الزنير وبالتالي فان الجهد على الحمل سيكون ثابتاً كذلك. في الدائرة السابقة يمكننا إيجاد العلاقة الخاصة بالتيار المار في المقاومة R_S بالاستعانة بقانون أوم:

$$I_S = \frac{V_{in} - V_L}{R_S}$$

يتفرق I_S عند نقطة ارتباط ثنائي الزينر مع مقاومة الحمل وحسب قانون كيرشوف الخاص بالتيار حيث يمكن التعبير عن تيار الزينر بالعلاقة:

$$I_Z = I_S - I_L$$

بإهمال ممانعة الزينر الصغيرة يكون:

$$V_L = V_Z$$

وبالاستفادة من قانون أوم يمكننا التعبير عن تيار الحمل بالصيغة:

$$I_L = \frac{V_L}{R_L}$$

ان المعادلات الأربعة الأخيرة تكون كافية للتحليل الأولي في دائرة منظم الزينر، وللحصول على دقة افضل نأخذ ممانعة الزينر بنظر الاعتبار عندها يمكن ان نعبر عن فرق الجهد على طرفي الحمل بالصيغة:

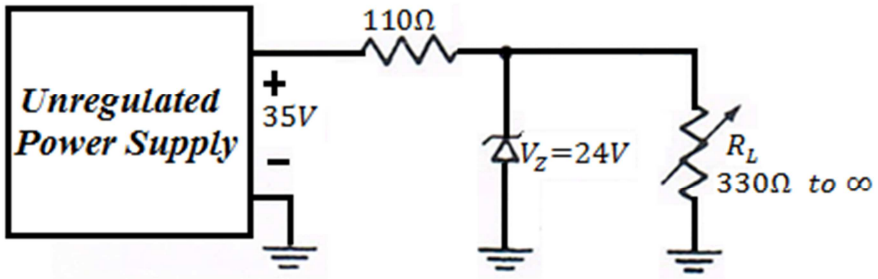
$$V_L = V_Z + I_Z Z_Z \qquad (4-4)$$

مثال (٤-٣):

في الشكل التالي احسب:

١- التيار المار في مقاومة التوالي. ٢- اصغر واعظم تيار حمل. ٣- اصغر واعظم تيار زينر.

الحل:



$$I_S = \frac{V_{IN} - V_Z}{R_S}$$

$$I_S = \frac{35-24}{110} = 0.1A$$

$$\boxed{I_S = 100mA\,(Constant)}$$

ان اصغر قيمة لتيار الحمل تكون عندما تكون قيمة مقاومة الحمل في قيمتها العظمى، ونلاحظ من الدائرة ان اعظم قيمة لمقاومة الحمل هي مالانهاية وعندها يكون:

$$\boxed{I_{LMIN} = \frac{V_L}{R_{LMAX}} = \frac{24}{\infty} = 0}$$

وبالمقابل فان اعظم تيار حمل يحصل عندما تكون مقاومة الحمل في قيمتها الصغرى، وهي كما في الشكل (R_{LMIN}=330Ω)، وعندها يكون:

$$\boxed{I_{LMAX} = \frac{V_L}{R_{LMIN}} = \frac{24}{330} = 0.073A = 73mA}$$

$$I_Z = I_S - I_L \ , \ I_S = 100mA\,(Constant)$$

وحيث ان تيار مقاومة التوالي ثابتة، لذا فان تيار الزينر يكون في قيمته الصغرى عندما يكون تيار الحمل في قيمته العظمى، أي ان:

$$\boxed{I_{ZMIN} = I_S - I_{LMAX} = 100 - 73 = 27mA}$$

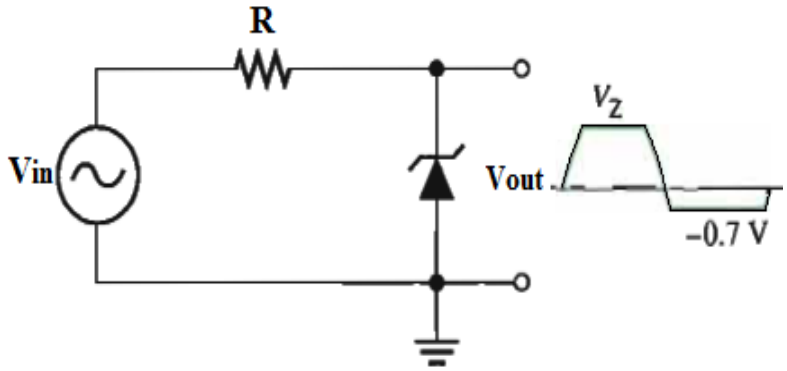
وبالمقابل فان تيار الزينر يكون في قيمته العظمى عندما يكون تيار الحمل في قيمته الصغرى، أي ان:

$$\boxed{I_{ZMAX} = I_S - I_{LMIN} = 100 - 0 = 100mA}$$

ثانياً: استعمال ثنائي الزينر في دوائر تحديد الفولتية

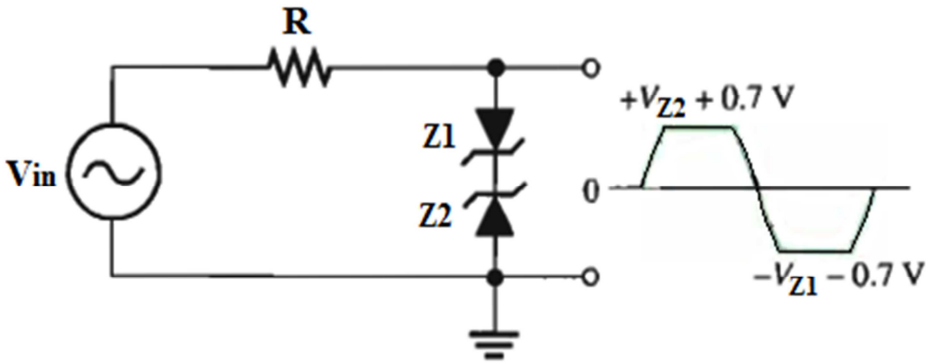
بالإضافة لاستعمال ثنائي الزينر في دوائر تنظيم الفولتية، يمكن استعمال ثنائي الزينر في دوائر تحديد (تقليم) الفولتية ويتيح ذلك الاستغناء عن البطارية التي كانت تستعمل في دوائر التحديد المعتمدة على ثنائي التقويم مما يوفر تكلفة اقل وحجم اصغر.

الشكل (٤-٣) يوضح دائرة محدد الفولتية الموجب باستعمال ثنائي الزينر. خلال النصف الموجب يكون ثنائي الزينر في حالة انحياز عكسي ويتصرف الزينر كدائرة مفتوحة ($V_o=V_{in}$) إلى ان تتغلب الفولتية المسلطة على جهد انهيار ثنائي الزينر وعندها تتحدد ذروة فولتية الإدخال عند جهد انهيار الزينر ($V_o=V_Z$)، اما خلال النصف السالب فيكون الزينر في حالة انحياز أمامي وتتحد ذروة الجزء السالب عند جهد الحاجز لقيم فولتيات الإدخال الأكبر من جهد الحاجز ($V_o=V_B$).

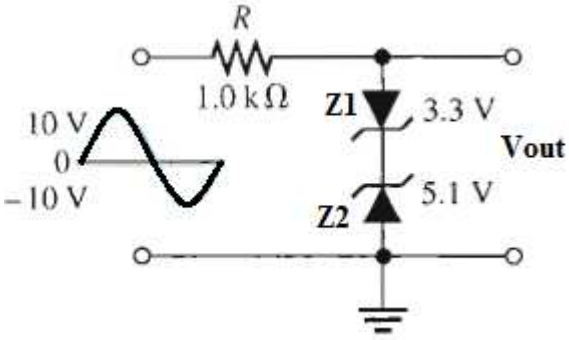


شكل ٤-٣: دائرة محدد الفولتية باستعمال ثنائي الزينر

الشكل التالي يوضح استعمال ثنائي الزينر في دائرة محدد الفولتية المركب، والذي يتكون من ثنائيي زينر مربوطين باتجاهين متعاكسين، ويكون عمل الدائرة كالتالي: خلال النصف الموجب من موجة الإدخال يكون ثنائي الزينر Z1 منحاز أماميا وثنائي الزينر Z2 منحاز عكسياً، وبالنتيجة يتحدد الجزء الموجب من موجة الإدخال عند قيمة جهد انهيار الزينر Z2 مضافاً اليها قيمة جهد الحاجز للثنائي Z1 ، أي ان الجزء الموجب من موجة الإدخال يتحدد بالمقدار ($V_{Z1}+0.7$)، خلال النصف السالب من موجة الإدخال فيكون ثنائي الزينر Z1 منحازاً عكسياً والزينر Z2 منحازاً أماميا، وتتحدد الذروة السالبة بالمقدار ($-V_{Z2}-0.7$).

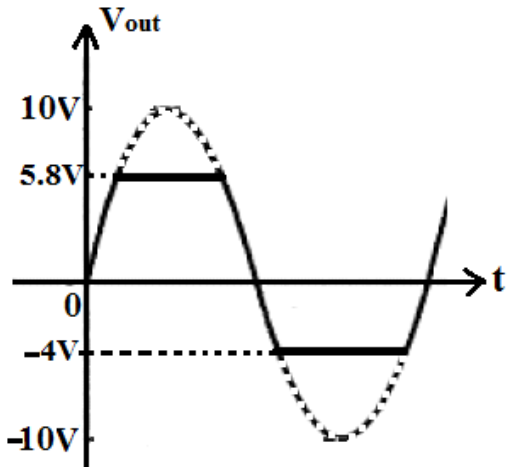


مثال (٤-٤): في الشكل المجاور، ارسم شكل الفولتية الخارجة مع توضيح عمل الدائرة.



الحل:

خلال النصف الموجب يكون الزينر Z1 منحاز أماميا والزينر Z2 منحاز عكسياً ولذلك يتحدد الجزء الموجب من موجة الإخراج بالمقدار (5.1+0.7)V، اما خلال النصف السالب فيكون الزنير Z1 منحاز عكسياً والزينر Z2 منحاز عكسياً، وبالنتيجة يتحدد الجزء السالب من موجة الإخراج بالمقدار (−3.3 −0.7)V. كما هو موضح بالشكل المجاور.



أسئلة الفصل الرابع

س١: قارن بين كل من

أ- ثنائي التقويم وثنائي الزينر.

ب- الانهيار التهدمي وانهيار الزينر.

س٢

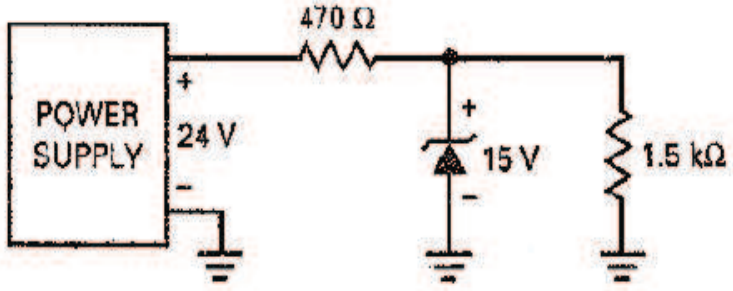
ما هي الميزة التي تجعل من ثنائي الزينر العنصر الأساسي في دوائر تنظيم الفولتية.

س٣: في الشكل المجاور أوجد

١- فرق الجهد على طرفي الحمل في حالة عدم توصيل ثنائي الزينر بالدائرة.

٢- فرق الجهد على طرفي الحمل بعد توصيل ثنائي الزينر بالدائرة.

٣- احسب التيارات الثلاث بعد ربط ثنائي الزينر.



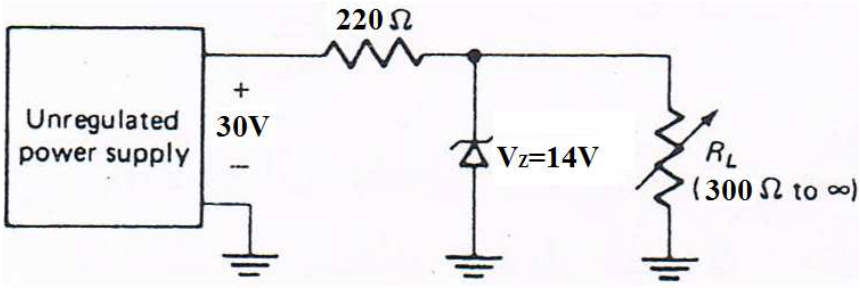
س٤

في الشكل المجاور احسب:

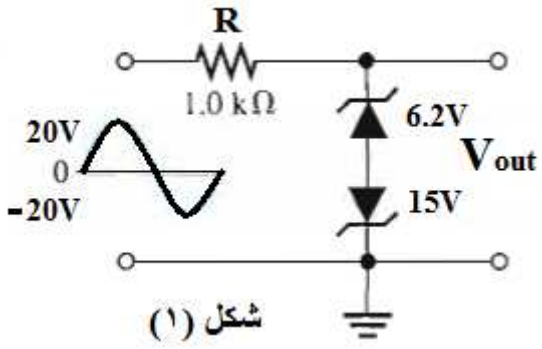
١- التيار المار في مقاومة التوالي.

٢- اصغر واعظم تيار حمل.

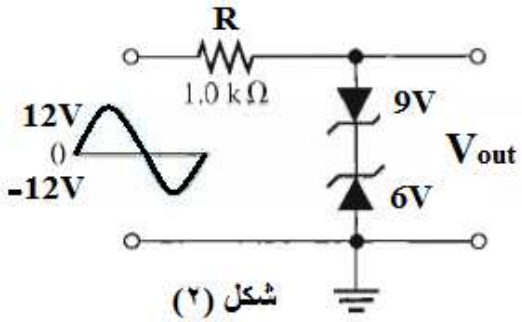
٣- اصغر واعظم تيار زينر.



س٥: ارسم موجة الإخراج في كل دائرة من الدوائر التالية:



شكل (١)



شكل (٢)