العناصر الإلكترونية

ثنائي زينر

الوحدة الثالثة: ثنائي زينر

الجدارة : معرفة تامة بثنائي زينر وأهم إستخداماته.

الأهداف : عندما تكتمل هذه الوحدة يكون المتدرب قادراً على معرفة:

- الفرق بين ثنائي زينر والثنائي العادي.
- خصائص ثنائي زينر.
- الدائرة المكافئة لثنائي زينر.
- دوائر تنظيم الجهد بواسطة ثنائي زينر.

مستوى الأداء المطلوب : أن يصل المتدرب إلى إتقان الجدارة ٩٠٪.

الوقت المتوقع للتدرب على الجدارة: ٤ ساعات

الوسائل المساعدة:

- السبورة
- استخدام برنامج Power point لعرض المحاضرات باستخدام جهاز عرض البيانات.

متطلبات الجدارة: أن يكون المتدرب ملما بثنائيات أشباه الموصلات.

٣- ١ مقدمة Introduction

علمنا من خلال دراستنا للثنائي في حالة الانحياز العكسي أن قيمة التيار المار به تكون صغيرة للغاية وذلك لأن مقاومة الثنائي تكون عالية جداً، وهذا التيار العكسي يبقى ثابتا مع زيادة الجهد العكسي إلى قيم كبيرة وعند زيادة الجهد العكسي إلى قيمة معينة (وهذه القيمة تختلف حسب نوع الثنائي)فإن التيار العكسي يزداد فجأة، ويرجع ذلك إلى زيادة شدة المجال الكهربائي في منطقة الاستنزاف بحيث يتم توليد أزواج جديدة من الإلكترونات- الفجوات نتيجة لتأثير هذا المجال، ويطلق على الجهد الذي يحدث عنده انهيار لمقاومة الثنائي وازدياد مفاجئ للتيار بجهد الانهيار (Breakdown Voltage) وتؤدي حالة الانهيار هذه في الثنائيات العادية إلى تلف الثنائي بسبب ارتفاع درجة الحرارة نتيجة لازدياد شدة التيار المار فيه.

٣- ٢ ثنائي زينر Zener Diode

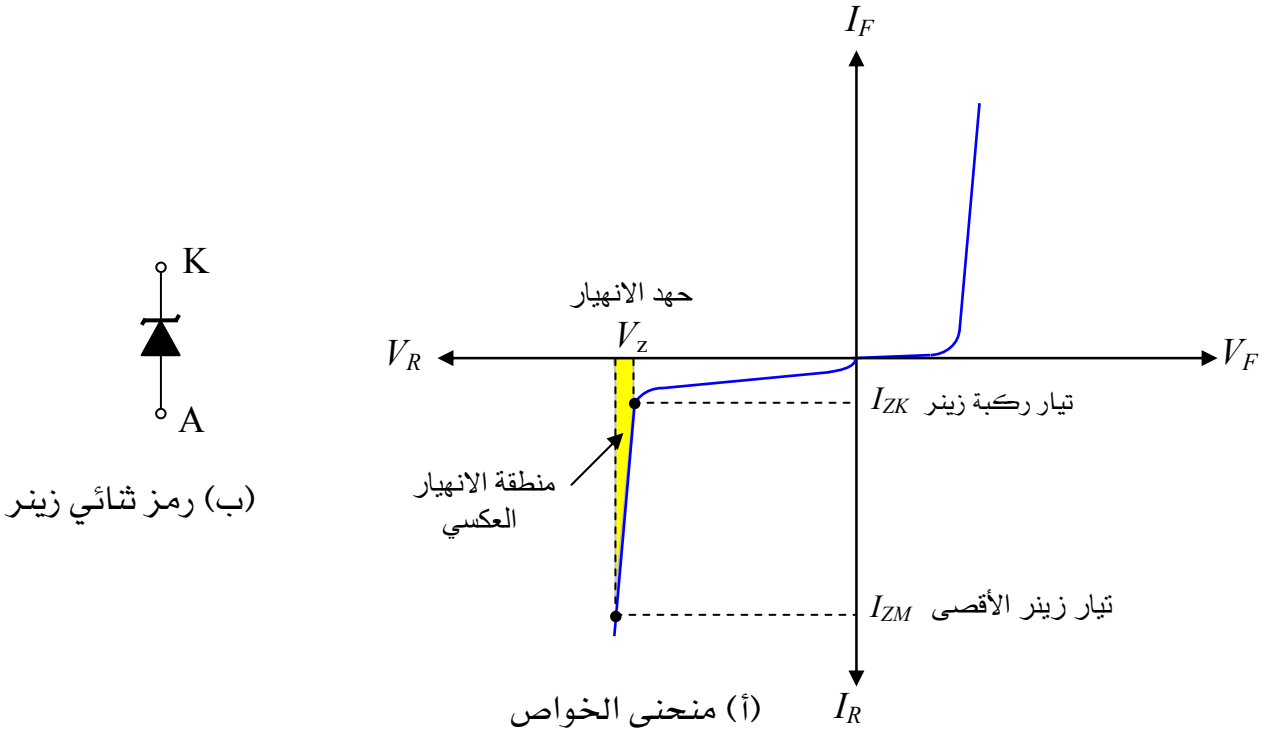
ثنائي زينر هو عبارة عن وصلة p-n مصنعة من السيليكون تختلف عن الثنائي العادي في كونها مصممة للعمل في منطقة الانهيار العكسي بدون حدوث أية مشاكل. ويمكن التحكم في قيمة جهد الانهيار عن طريق التحكم في نسبة الشوائب المضافة إلى السيليكون لتحويله إلى نوع- n أو نوع- p أثناء عملية التصنيع. وثنائي زينر متوفر تجاريا بجهود تتراوح من 1.8V إلى 200V بقدرة تصل إلى 100W.

وهناك ظاهرتان لحدوث الانهيار للثنائي في حالة الانحياز العكسي إحداهما تحدث عند تطبيق قيم عالية للجهد(أكبر من 5V) على الثنائي وهي ما تسمى بظاهرة الانهيار المتتابع (Avalanche Breakdown) ويحدث هذا الانهيار عندما تكتسب حاملات الشحنة طاقة كبيرة عند اجتيازها للمجال الكهربائي الشديد في منطقة الاستنزاف. وعند اصطدام حاملات الشحنة بذرات البناء البلوري فإنها تؤينها وبالتالي تتولد أزواج جديدة من الإلكترونات- الفجوات تؤدي إلى زيادة كبيرة للتيار دون زيادة تذكر في قيمة فرق الجهد عبر الثنائي. وتحدث هذه الظاهرة في الثنائيات عندما تكون نسبة الشوائب الموجودة فيها قليلة نسبيا.

أما الظاهرة الأخرى وهي ما تسمى بانهيار زينر (Zener Breakdown) فهي تحدث عند تطبيق قيم منخفضة للجهد (أقل من 5V) في الثنائيات التي تكون نسبة الشوائب فيها عالية حيث تؤدي الزيادة في شدة المجال الكهربائي إلى تمزق الروابط التساهمية بين الذرات، ونتيجة لذلك تتولد أزواج من الإلكترونات- الفجوات ويمكن خفض قيمة جهد الانهيار للثنائي بزيادة نسبة الشوائب المطعمة فيه.

٣- ٣ منحنى الخواص لثنائي زينر Zener diode characteristic curve

شكل (٣- ١) يوضح منحنى الخواص لثنائي زينر والرمز المستخدم له. ونلاحظ من الشكل أن ثنائي زينر له نفس خواص الثنائي العادي في حالة الانحياز الأمامي أما في حالة الانحياز العكسي فإن التيار المار خلال الثنائي يكون ضئيلا جدا للجهود الأقل من جهد الانهيار أو جهد زينر V_z ، ولكن عند الوصول إلى جهد زينر يزداد التيار بسرعة دون زيادة ملحوظة في الجهد ، لذلك يستخدم ثنائي زينر كمثبت أو منظم للجهد (Voltage Regulator).



شكل (٣- ١): (أ) منحنى الخواص (ب) رمز ثنائي

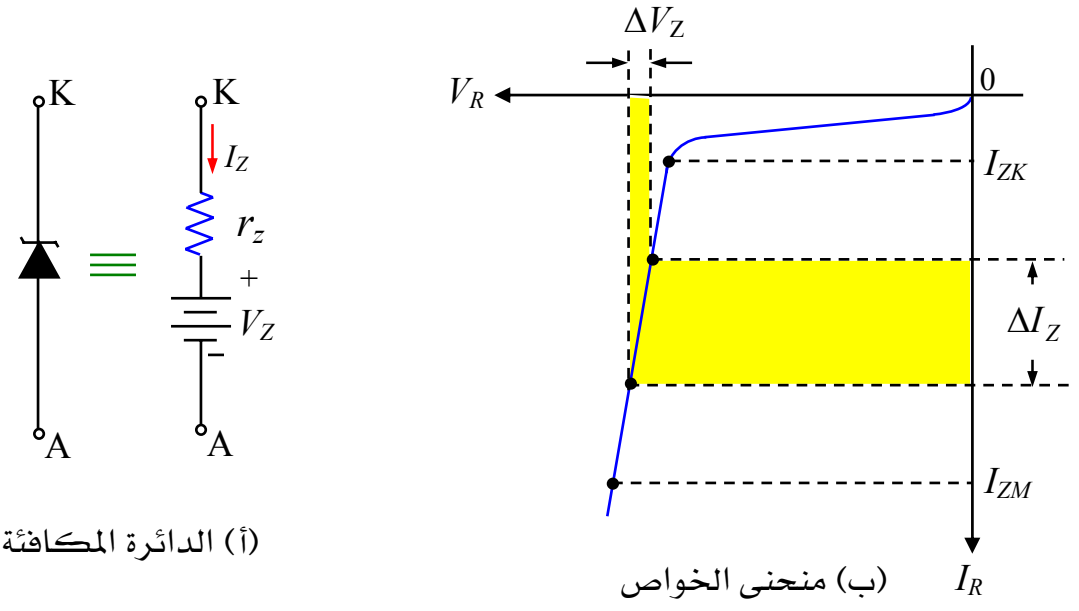
تعتمد فكرة تثبيت أو تنظيم الجهد باستخدام ثنائي زينر على احتفاظ الثنائي في منطقة الانهيار بقيمة شبه ثابتة للجهد على طرفيه خلال مدى من التيار العكسي يتراوح من I_{ZK} (تيار ركبة زينر) إلى I_{ZM} (تيار زينر الأقصى). ويعرف تيار الركبة لزينر I_{ZK} بأنه أقل قيمة للتيار العكسي تحافظ على ثنائي زينر في منطقة الانهيار للعمل كمنظم للجهد ونلاحظ من منحنى الخواص أنه إذا قلت قيمة تيار الزينر عن قيمة تيار الركبة فإن قيمة الجهد سوف تقل عن قيمة جهد الزينر وبالتالي لا يعمل الثنائي كمنظم للجهد.

وتمثل I_{ZM} أقصى قيمة للتيار يمكن أن تمر خلال ثنائي زينر في منطقة الانهيار وأية زيادة في قيمة التيار المار عبر ثنائي زينر عن هذه القيمة سوف تؤدي إلى تدمير الثنائي وذلك لزيادة الطاقة المبددة وبالتالي ارتفاع درجة الحرارة عن القيمة القصوى التي يتحملها الثنائي.

٣- ٤ الدائرة المكافئة لثنائي زينر Zener diode equivalent circuit

شكل (٣- ٢أ) يوضح الدائرة المكافئة لثنائي زينر، حيث يعمل الثنائي كما لو كان بطارية لها جهد يساوي جهد زينر V_Z موصل معها مقاومة صغيرة r_Z تمثل مقاومة ثنائي زينر. ويمكن حساب قيمة المقاومة r_Z من خلال منحنى الخواص لثنائي زينر في منطقة الانهيار الموضح في شكل (٣- ٢ب)، حيث نلاحظ أن التغير في قيمة التيار المار في ثنائي زينر يؤدي إلى تغير صغير في قيمة الجهد على طرفي الثنائي وتبعا لقانون أوم فإن النسبة بين التغير في قيمة الجهد ΔV_Z إلى التغير في قيمة التيار ΔI_Z تمثل المقاومة r_Z، كما هو مبين بالعلاقة الآتية:

$$r_Z = \frac{\Delta V_Z}{\Delta I_Z} \qquad (٣- ١)$$

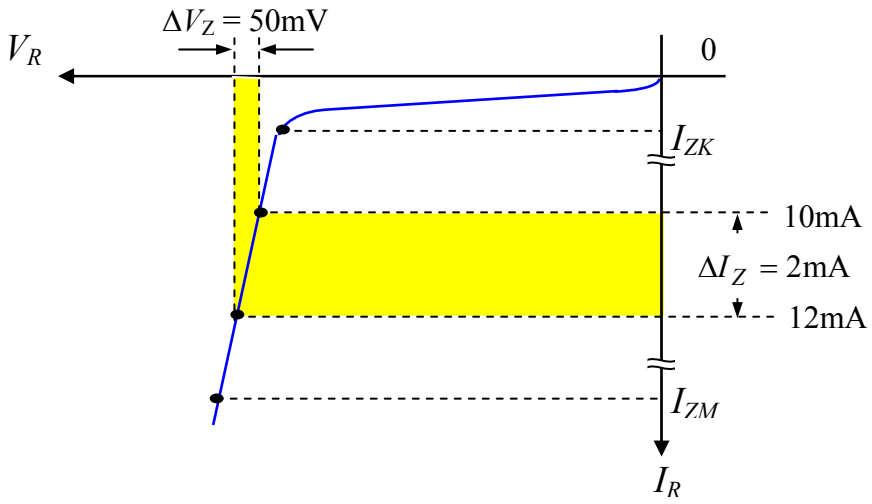


(أ) الدائرة المكافئة (ب) منحنى الخواص

شكل (٣- ٢): (أ) الدائرة المكافئة لثنائي زينر. (ب) منحنى الخواص لثنائي زينر في منطقة الانهيار.

مثال ٣- ١:

أوجد المقاومة r_Z لثنائي زينر الذي له منحنى الخواص الموضح بشكل ٣- ٣.



شكل ٣- ٣

الحل:

$$r_Z = \frac{\Delta V_Z}{\Delta I_Z} = \frac{50mV}{2mA} = 25\Omega$$

مثال ٣- ٢:

إذا كانت $r_Z = 5\Omega$ ، $V_Z = 6.8\text{V}$ فما هي قيمة الجهد على طرفي ثنائي زينر V_{ZD} عند مرور تيار مقداره 20mA.

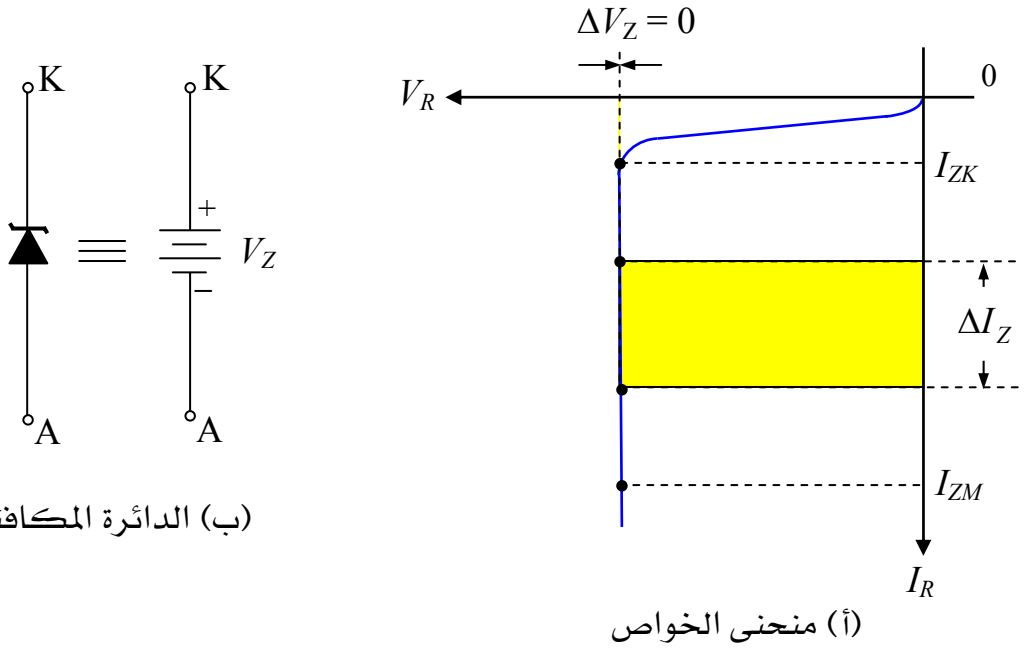
الحل:

$$V_{ZD} = V_Z + I_Z r_Z$$
$$= 6.8\text{ V} + 20\text{ mA} \times 10^{-3}\text{ (A/mA)} \times 5\ \Omega = 6.9\text{ V}$$

شكل ٣- ٤(أ) يوضح منحنى الخواص لثنائي زينر المثالي (ideal zener diode) في منطقة الانهيار حيث يكون الجهد على طرفي الثنائي ثابتا ($\Delta V_Z = 0$) مع التغير في قيمة التيار المار في ثنائي زينر وبالتالي فإن:

$$r_Z = \frac{\Delta V_Z}{\Delta I_Z} = \frac{0}{\Delta I_Z} = 0 \qquad (٣-٢)$$

وتصبح الدائرة المكافئة لثنائي زينر كالمبينة بشكل ٣- ٤(ب) حيث يعمل الثنائي كما لو كان بطارية لها جهد يساوي جهد الزينر V_Z.



(ب) الدائرة المكافئة

(أ) منحنى الخواص

شكل (٣- ٤): (أ) منحنى الخواص لثنائي زينر المثالي في منطقة الانهيار.
(ب) الدائرة المكافئة لثنائي زينر المثالى

٣- ٥ معامل الحرارة Temperature coefficient

يحدد هذا المعامل النسبة المئوية لتغير جهد الزينر V_Z لكل تغير في درجة الحرارة مقداره واحد درجة مئوية. وكمثال على ذلك إذا كان $V_Z = 12$ V وكان المعامل الحراري $0.1\%\ /\ ^oC$ فإن V_Z يتغير بمقدار 0.012 V عندما تتغير درجة حرارة الوصلة بمقدار 1^oC. ويمكن استنتاج التغير في V_Z من خلال المعادلة الآتية:

$$\Delta V_Z = V_Z \times TC \times \Delta T \quad . \qquad (٣-٣)$$

حيث:

V_Z = جهد الزينر عند 25^oC

TC = المعامل الحراري

ΔT = مقدار التغير في درجة حرارة الوصلة.

والمعامل الحراري TC إما أن يكون موجباً (positive temperature coefficient) ويعني أن جهد زينر V_Z يزيد مع زيادة درجة الحرارة ويقل مع انخفاض درجة الحرارة، أو يكون سالباً (negative temperature coefficient) فيعني أن جهد زينر V_Z يقل مع زيادة درجة الحرارة ويزيد مع انخفاض درجة الحرارة.

في بعض الأحيان يعبر عن المعامل الحراري بمقدار التغير بالملي فولت لجهد زينر لكل تغير في درجة الحرارة مقداره واحد درجة مئوية (mV / C^o) بدلا من النسبة المئوية لتغير جهد زينر لكل تغير في درجة الحرارة مقداره واحد درجة مئوية ($\% / C^o$) وبالتالي فإن التغير في V_Z يحسب من خلال المعادلة الآتية:

$$\Delta V_Z = TC \times \Delta T$$

مثال ٣- ٣:

ثنائي زينر له جهد زينر يساوى 8.2V وله معامل حراري موجب $0.048\% / C^o$. أوجد قيمة جهد زينر عند $60\ ^oC$.

الحل:

التغير في جهد زينر نتيجة لتغير درجة الحرارة من $25\ ^oC$ إلى $60\ ^oC$ يساوي:

$$\Delta V_Z = V_Z \times TC \times \Delta T$$

$$= (8.2V)(0.048\% / C^o)(60^oC - 25^oC) = 137.8\ mV$$

وبالتالي فإن قيمة جهد الزينرعند $60\ ^oC$ تكون:

$$V_Z + \Delta V_Z = 8.2\ V + 137.8\ mV = 8.3378\ V$$

٢- ٦ القدرة المبددة في ثنائي زينر Zener Power Dissipation

تحدد قيمة القدرة المبددة في ثنائي زينر P_Z بالعلاقة الآتية:

$$P_Z = V_Z I_Z$$

ونظراً لأن قيمة جهد الزينر V_Z تكون ثابتة بالنسبة لثنائي زينر الواحد فإن قيمة القدرة المبددة P_Z تعتمد على قيمة التيار المار في الثنائي I_Z. وبالتالي فإن القيمة القصوى للقدرة المبددة في ثنائي زينر $P_{Z(max)}$ (maximum power dissipation of a zener diode) تعطى بالعلاقة الآتية:

$$P_{Z(max)} = V_Z I_{ZM} \qquad (٣-٤)$$

حيث I_{ZM} هو تيار زينر الأقصى (maximum zener current).

مثال ٣- ٤:

احسب القدرة المبددة القصوى لثنائي زينر له جهد زينر يساوي 20V وتيار زينر يتراوح من 2 mA إلى 20 mA.

الحل:

$$P_{Z(max)} = V_Z \, I_{ZM}$$
$$= (20V)(20mA) = 400mW$$

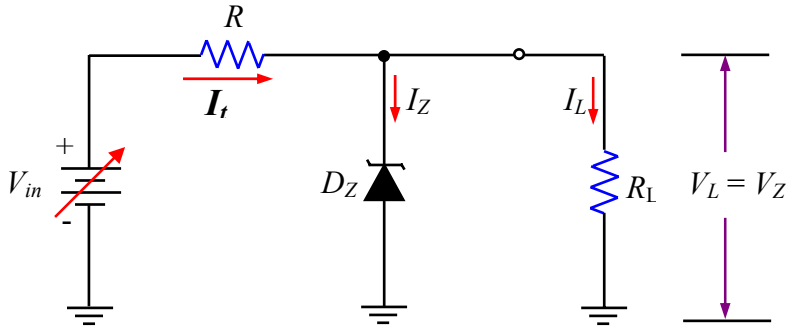
٣- ٧ ثنائي زينر كمثبت (منظم) للجهد Zener Diode as a Voltage Regulator

يستخدم ثنائي زينر كمثبت (منظم) للجهد في مصادر القدرة ذات التيار المستمر لتثبيت قيمة فرق الجهد على طرفي الحمل مع التغيرات التي يمكن أن تحدث إما في قيمة جهد الدخل المستمر وهو ما يسمى بتنظيم الخط (line regulation)، أو في قيمة مقاومة الحمل وهو ما يطلق عليه تنظيم الحمل (load regulation).

٣- ٧- ١ منظم زينر مع تغير جهد الدخل Zener Regulation with a Varying Input Voltage

شكل (٣- ٥) يبين دائرة عملية بسيطة لتثبيت قيمة فرق الجهد على طرفي الحمل V_L عند جهد يساوي جهد زينر V_Z في حالة تغير جهد الدخل V_{in} وهو ما يطلق عليه تنظيم الدخل أو تنظيم الخط.

ويتلخص عمل هذه الدائرة في أنه عند حدوث زيادة في جهد الدخل V_{in} فإن ثنائي زينر يحافظ على جهد الحمل ثابتا عند قيمة تساوي V_Z وهذا يؤدي إلى زيادة الجهد المطبق على المقاومة R وبالتالي زيادة التيار I_t المار خلالها. ونظرا لأن التيار المار خلال مقاومة الحمل I_L يكون ثابتا فإن الزيادة في التيار I_t تتدفق عبر الثنائي، وتستمر عملية تثبيت جهد الحمل مع تغير جهد الدخل طالما أن قيمة التيار المار خلال الزينر I_Z أكبر من قيمة I_{ZK} وأقل من قيمة I_{ZM} وذلك للحفاظ على ثنائي زينر في منطقة الانهيار.



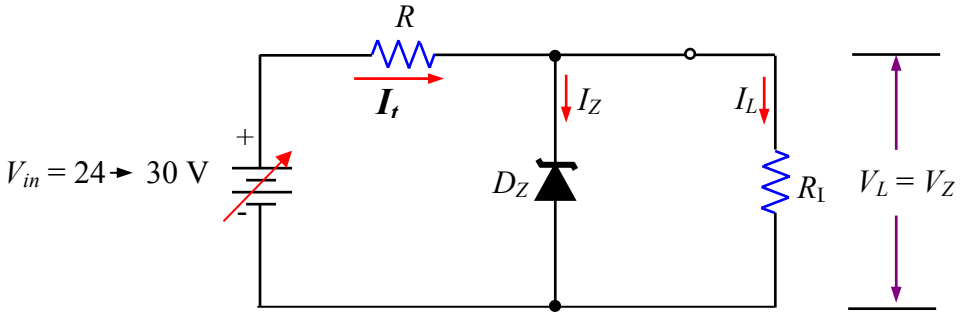
شكل (٣- ٥) استخدام ثنائي زينر كمنظم مع تغير جهد الدخل

مثال ٣- ٥:

بالنسبة لمنظم الجهد المبين بشكل (٣- ٦)، افترض أن $V_Z = 20\text{V}$، $R = 20\ \Omega$، $R_L = 200\ \Omega$، $r_Z = 0$ وجهد الدخل يتغير بين 24V إلى 30 V.

(أ) أوجد أقل وأكبر قيمة لتيار زينر ($I_{Z(\min)}$ و$I_{Z(\max)}$).

(ب) أوجد أقصى قدرة مبددة في المقاومة R وفي ثنائي زينر ($P_{R(\max)}$ و$P_{Z(\max)}$)



شكل (٣- ٦)

الحل:

(أ) تيار الحمل المار في المقاومة R_L يساوي:

$$I_L = \frac{V_Z}{R_L} = \frac{20\text{V}}{200\Omega} = 0.1\text{A}$$

التيار الكلي المار في المقاومة R يعطى بالعلاقة الآتية:

$$I_t = \frac{V_{in} - V_Z}{R}$$

ونظراً لثبات قيمة V_Z وكذلك قيمة R فإن قيمة التيار الكلي I_t تعتمد على قيمة جهد الدخل V_{in} وبالتالي فإن أقل قيمة للتيار الكلي $I_{t(\min)}$ تكون عند $V_{in} = 24\text{V}$ بينما أعلى قيمة للتيار الكلي $I_{t(\max)}$ تكون عند $V_{in} = 30\text{V}$.

$$I_{t(\min)} = \frac{24\text{V} - 20\text{V}}{20\Omega} = 0.2\text{A}$$

$$I_{t(\max)} = \frac{30\text{V} - 20\text{V}}{20\Omega} = 0.5\text{A}$$

وبتطبيق قانون كيرشوف للتيار نحصل على:

$$I_t = I_Z + I_L$$

ونظرا لثبات تيار الحمل I_L فإن التيار المار في ثنائي زينر يكون أقل ما يمكن $(I_Z = I_{Z(\min)})$ في حالة $I_{t(\min)}$ بينما يكون أكبر ما يمكن $(I_Z = I_{Z(\max)})$ في حالة $I_{t(\max)}$.

$$I_{Z(\min)} = I_{t(\min)} - I_L = 0.2\text{A} - 0.1\text{A} = 0.1\text{A}$$
$$I_{Z(\max)} = I_{t(\max)} - I_L = 0.5\text{A} - 0.1\text{A} = 0.4\text{A}$$

(ب) أقصى قدرة مبددة في المقاومة R تساوي:

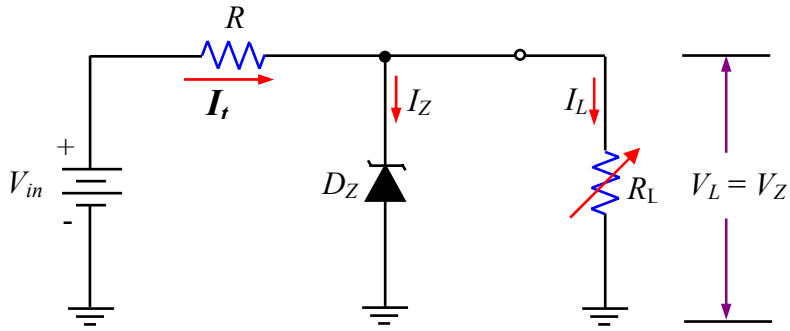
$$P_{R(\max)} = I_{t(\max)}{}^2 \text{R}$$
$$= (0.5\text{A})^2 (20\Omega) = 5\text{W}$$

أقصى قدرة مبددة في ثنائي زينر تساوي:

$$P_{Z(\max)} = V_Z I_{Z(\max)}$$
$$= (20\text{V})(0.4\text{A}) = 8\text{W}$$

٣- ٧- ٢ منظم زينر مع تغير الحمل Zener Regulation with a Variable Load

شكل (٣- ٧) يبين كيفية استخدام ثنائي زينر كمثبت لجهد الحمل V_L عند جهد يساوي جهد زينر V_Z في حالة تغير قيمة الحمل R_L وهو ما يطلق عليه تنظيم الحمل.



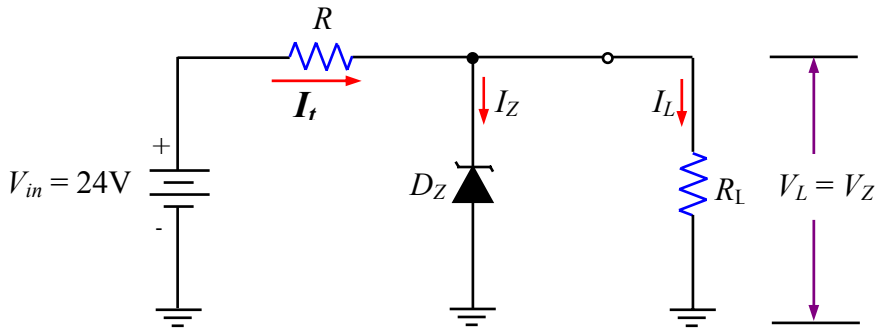
شكل (٣- ٧) استخدام ثنائي زينر كمنظم مع تغير الحمل

عندما تكون أطراف الخرج لمنظم زينر للجهد المبين في شكل ٣- ٧ مفتوحة $(R_L = \infty)$، فإن تيار الحمل I_L يساوي صفراً وبالتالي يتدفق التيار الكلي I_t خلال ثنائي زينر. وعند توصيل مقاومة الحمل R_L فإن جزءاً من التيار الكلي يمر عبر الثنائي والجزء الآخر يمر خلال الحمل. وبتقليل قيمة R_L فإن قيمة تيار الحمل I_L تزيد بينما تقل قيمة تيار الزينر I_Z حيث إن قيمة التيار الكلي I_t تكون ثابتة. ويستمر ثنائي زينر في عملية تثبيت جهد الحمل V_L عند قيمة جهد الزينر V_Z إلى أن يصل تيار الزينر I_Z إلى أقل قيمة له (I_{ZK}) وعند هذه النقطة يصل تيار الحمل I_L إلى أقصى قيمة له $(I_{L(\max)})$ ، أي إن:

$$I_t = I_{ZK} + I_{L(\max)} \qquad (٣-٥)$$

مثال ٣- ٦:

أوجد قيم $I_{L(\max)}$، $I_{L(\min)}$ و $R_{L(\min)}$ التي تحافظ على ثنائي زينر، الموضح بشكل(٣- ٨)، للعمل كمثبت للجهد علماً بأن V_Z=12V، I_{ZK} = 1 mA، I_{ZM}= 50 mA، و $r_Z = 0$.



شكل(٣- ٨)

الحل:

عند $R_L = \infty$ فإن $I_L = 0$A وبالتالي يصل I_Z إلى أقصى قيمة له وهي تساوي قيمة التيار الكلي I_t، أي إن

$$I_{Z(\max)} = I_t = \frac{V_{in} - V_Z}{R} = \frac{24\text{V} - 12\text{V}}{470\Omega} = 25.5\text{mA}$$

وحيث إن قيمة $I_{Z(\max)}$ أقل من I_{ZM} فهذا يعني أن التيار الكلي يمكن أن يمر خلال ثنائي زينر وبالتالي قيمة $I_L = 0$A تكون مقبولة كأقل قيمة لتيار الحمل وهو ما يعني أنه يمكن فصل الحمل من الدائرة ولا يؤثر هذا على عمل الثنائي كمثبت للتيار.

$$\therefore I_{L(\min)} = 0\text{A}$$

$$\because I_t = I_{ZK} + I_{L(\max)}$$

$$\therefore I_{L(\max)} = I_t - I_{ZK} = 25.5\text{mA} - 1\text{mA} = 24.5\text{mA}$$

وبالتالي فإن قيمة $R_{L(\min)}$ تكون:

$$R_{L(\min)} = \frac{V_Z}{I_{L(\max)}} = 490\Omega$$

وهذا يعنى أنه إذا قلت قيمة R_L عن 490Ω فإن قيمة التيار I_L تزيد عن 24.5 mA وبالتالي تقل قيمة I_Z عن I_{ZK} (1 mA) ويخرج ثنائي زينر من منطقة الانهيار ولا يعمل كمثبت للتيار.

٣- ٧- ٣ النسبة المئوية للتنظيم Percent Regulation

تستخدم النسبة المئوية للتنظيم كمقياس لكفاءة منظم الجهد في حالة تنظيم الخط أو حالة تنظيم الحمل.

- **أولاً: تنظيم الخط**

عندما يتغير جهد الدخل يحاول منظم الجهد إعطاء جهد ثابت على الخرج ولذلك يعرف تنظيم الخط بأنه النسبة المئوية للتغير في جهد الخرج ΔV_{out} إلى التغير في جهد الدخل ΔV_{in} ويمثل بالعلاقة:

$$\text{Line regulation} = \left(\frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}}\right)100\%$$

مثال ٣- ٧:

إذا كان جهد الخرج لإحدى منظمات الجهد يتغير بمقدار 0.25V نتيجة لتغير جهد الدخل بمقدار 5V فما هي نسبة تنظيم الخط؟

الحل:

$$\text{Line regulation} = \left(\frac{\Delta V_{out}}{\Delta V_{in}}\right)100\% = \left(\frac{0.25\text{V}}{5\text{V}}\right)100\% = 5\%$$

- **ثانياً: تنظيم الحمل**

عند تغير قيمة الحمل يحاول منظم الجهد الاحتفاظ بجهد خرج ثابت ولذا يعرف تنظيم الحمل بأنه النسبة المئوية لمقدار تغير جهد الخرج من حالة اللاحمل (no load) إلى حالة الحمل الكامل (full load) ويمكن حسابه من العلاقة الآتية:

$$\text{Load regulation} = \left(\frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}}\right)100\%$$

حيث:

V_{NL} = جهد الخرج في حالة اللاحمل

V_{FL} = جهد الخرج في حالة الحمل الكامل

مثال ٣- ٨:

إذا كان جهد الخرج، لإحدى منظمات الجهد، في حالة اللاحمل يساوي 12V وفي حالة الحمل الكامل يساوي 11.95V فما هي نسبة تنظيم الحمل؟

الحل:

$$\text{Load regulation} = \left(\frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}}\right)100\%$$

$$= \left(\frac{12\text{V} - 11.95\text{V}}{11.95\text{V}}\right)100\% = 0.418\%$$

أسئلة وتمارين على الوحدة الثالثة

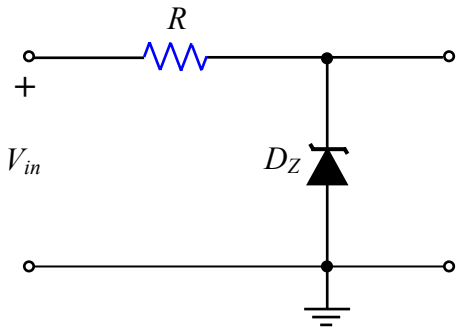
٣- ١ ما الفرق بين ثنائي زينر والثنائي العادي؟

٣- ٢ ارسم منحنى الخواص والرمز الكهربائي لثنائي زينر.

٣- ٣ إذا تغير جهد زينر من 5.6V إلى 5.65V نتيجة لزيادة التيار العكسي لثنائي زينر من 20m إلى 30mA، فما هي مقاومة ثنائي زينر؟

٣- ٤ أوجد قيمة جهد زينر عند درجة حرارة $70^{o}C$ إذا كانت قيمته عند درجة حرارة $25^{o}C$ تساوي 6.8 V، علما بأن المعامل الحراري يساوي $+0.04\%/^{o}C$.

٣- ٥ حدد القيمة الصغرى المطلوبة لجهد الدخل للدائرة المبينة بشكل (٣- ٩) لتحقيق عملية تنظيم الجهد علما بأن $I_{ZK} = 1.5\ mA$، $R = 50\ \Omega$ و $V_Z = 14\ V$ وبفرض أن ثنائي زينر من النوع المثالي.

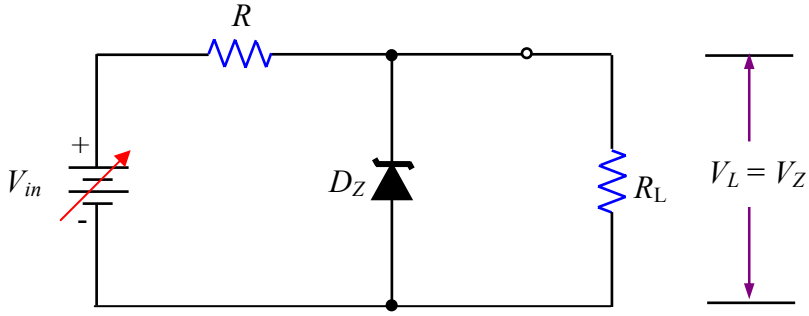


شكل(٣- ٩)

٣- ٦ بالنسبة لمنظم الجهد المبين بشكل (٣- ١٠)، افترض أن $V_Z = 200V$، $R = 20\ \Omega$، $R_L = 250\ \Omega$، $r_Z = 0$ وجهد الدخل يتغير بين 220V. إلى 240 V.

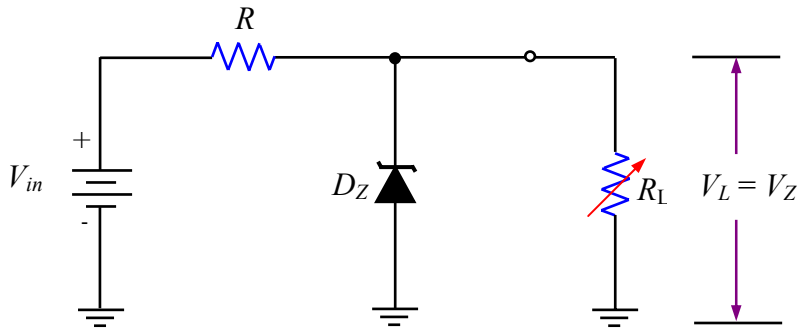
(أ) أوجد أقل وأكبر قيمة لتيار زينر.

(ب) أوجد أقصى قدرة مبددة في مقاومة الحمل وفي ثنائي زينر.



شكل (٣- ١٠)

٣- ٧ بالنسبة لمنظم الجهد المبين بشكل (٣- ١١)، V_{in}=30V ، V_Z=20V ، I_{ZK} = 5 mA ، I_{ZM} = 200 mA، $R = 50\Omega$ و $r_Z = 0$. أوجد التغير في قيمة المقاومة R_L مع استمرار عملية تنظيم الجهد عند قيمة جهد زينر.



شكل(٣- ١١)

٣- ٨ إذا كان جهد الخرج لأحد منظمات الجهد يتغير بمقدار 0.2V نتيجة لتغير جهد الدخل من 5V إلى10V فما هي نسبة تنظيم الخط؟

٣- ٩ إذا كان جهد الخرج لإحدى منظمات الجهد في حالة اللاحمل يساوي 3.6V وفي حالة الحمل الكامل يساوي 3.4V فما هي نسبة تنظيم الحمل؟