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 زنر (Zener Diode)، ويستعمل ثنائي زنر بكثرة في الدوائر الإلكترونية بحيث يأتي بالمرتبة الثانية بعد ثنائي التقويم. سيخصص هذا الفصل لدراسة تركيب وخصائص ثنائي زنر وتطبيقاته.

الشكل (٤–١) يمثل صورة لثنائي زنر العملي ويوضح أبعاده الحقيقية وصورة مكبرة له للتعريف بقطبي ثنائي زنر ونموذج من دائرة الكترونية مطبوعة استعمل فيها ثنائيي زنر.

صورة توضح ثنائي زنر وابعاده الحقيقية | صورة مكبرة لثنائي زنر ورمزه | ثنائي زنر مستعمل في لوحة الكترونية

شكل (٤–١) صورة لثنائي زنر العملي

١.٤ تركيب ثنائي زنر

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

ان ثنائي زنر 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 زنر هناك نوعان من الانهيار وهما الانهيار التهدمي وانهيار زنر، 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 زنر.

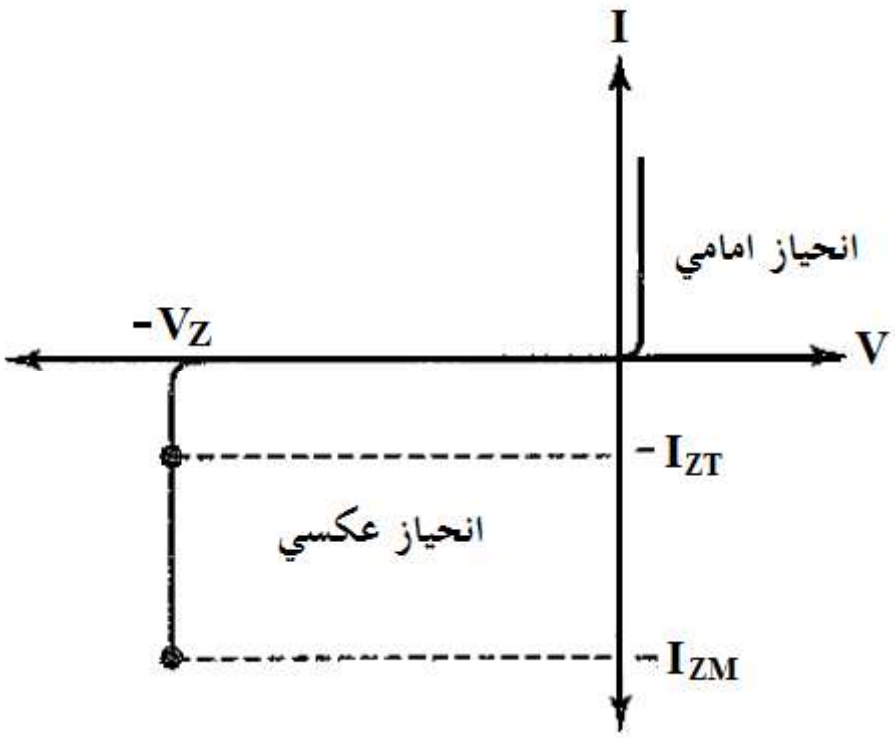
ب. انهيار زنر (Zener Breakdown)

يحدث هذا النوع من الانهيار عندما يشوب ثنائي ما بغزارة (كما هو الحال في ثنائي زنر)، 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 زنر (كما تسمى كذلك بانبعاث المجال العالي High-Field Emission).

ان انهيار زنر 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 زنر هي الوحيدة الموجودة في انكسار الثنائيات، ولهذا شاع استعمال اسم ثنائي زنر قبل اكتشاف ظاهرة الانهيار التهدمي وبقيت جميع الثنائيات المصنوعة للعمل في منطقة الانكسار تدعى ثنائيات زنر بصرف النظر عن كون الانهيار الذي يحدث فيها من نوع انهيار زنر أو انهيار تهدمي.

٢.٤ خصائص ثنائي زنر

الشكل (٤-٢) يمثل منحنى الخواص لثنائي زنر. يلاحظ من الشكل ان خواص ثنائي زنر 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 ملحوظة في التيار العكسي ويرمز للتيار الذي يبدأ فيه الانهيار بالرمز (I_{ZT}) . ان الانكسار في ثنائي زنر يكون له انحناء حاد جداً تعقبه زيادة عمودية تقريباً بالتيار ويلاحظ ان الفولتية على طرفي زنر تبقى ثابتة تقريباً وتساوي (V_Z) في معظم منطقة الانكسار، علما ان هناك قيمة قصوى للتيار العكسي يمكن ان يتحمله ثنائي زنر دون ان يتسبب بتلفه ويرمز له بالرمز (I_{ZMAX}) .



شكل (٤-٢) منحنى الخواص لثنائي زنر

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:

$$P_Z = V_Z I_Z \qquad (4-1)$$

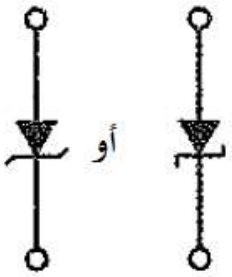
فمثلاً لو كان $V_Z=12V$ و $I_Z=10mA$ فان:

$$P_Z = V_Z I_Z, \quad P_Z = 12\times10\times10^{-3} = 0.12W$$

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

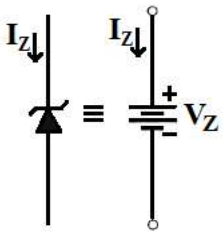
غالباً ما تبين استمارة المعلومات مقدار اقصى تيار يتحمله ثنائي زنر دون تجاوز مدى تحمل القدرة، ويرمز لأقصى تيار يمكن ان يتحمله ثنائي زنر بالرمز I_{ZM} والعلاقة التي تربط بين اقصى تيار ومدى تحمل القدرة هي:

$$I_{ZM} = \frac{P_{ZMAX}}{V_Z} \qquad (4-2)$$

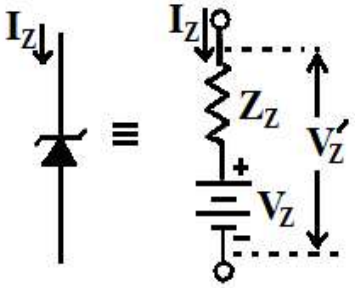


الشكل المجاور يمثل رمز ثنائي زنر والذي يكون بصورتين.

٣.٤ الدائرة المكافئة لثنائي زنر



كتقريب أول (تقريب مثالي) يمكن اعتبار ثنائي زنر 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 لثنائي زنر. الشكل المجاور يوضح التقريب الثاني لثنائي زنر.

عند اخذ ممانعة زنر بنظر الاعتبار فان فولتية زنر الكلية تعطى بالعلاقة:

$$V_Z' = V_Z + I_Z Z_Z \qquad (4-3)$$

وعادة ما تكون ممانعة زنر صغيرة وتعطى بالعلاقة:

$$Z_Z = \frac{\Delta v}{\Delta i} \qquad (4-4)$$

٤.٤ المعامل الحراري (Temperature Coefficient) لثنائي زنر

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

$$T_C = \frac{(\frac{\Delta V_Z}{V_{Zo}})}{\Delta T} \times 100\ \% \qquad (4-5)$$

حيث (ΔV_Z) هو التغير في فولتية انكسار زنر ويعطى بالعلاقة:

$$\Delta V_Z = V_{Z1} - V_{Zo} \qquad (4-6)$$

(ΔT) هو التغير في درجة الحرارة ويعطى بالعلاقة:

$$\Delta T = T_1 - T_o$$

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

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

$$\Delta V_Z = T_C \times \Delta T \times V_{Zo} \qquad (4-7)$$

ان المعامل الحراري لثنائي زنر يكون سالب لفولتيات انكسار اقل من 4V (انهيار زنر)، 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 زنر هو ($0.004\%/^oC$) وجهد انكساره يساوي (12V) عند درجة حرارة (25^oC)، أوجد التغير في فولتية زنر وفولتية زنر عند ارتفاع درجة الحرارة إلى (110^oC) ؟

الحل: من معطيات المثال لدينا

$$T_C = 0.004\%/^oC \ , \ V_{Zo} = 12V \ , \ T_o = 25^oC, T_1 = 110^oC , \Delta V_Z = ? , \ V_{Z1} = ?$$

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

بالتعويض نحصل على:

$$\Delta V_Z = (\frac{0.004}{100}) \times (110 - 25) \times 12$$

$$\Delta V_Z = 0.041V$$

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

$$V_{Z1} - V_{Zo} = 0.041V$$
$$V_{Z1} = 12.041V$$

أي ان جهد انكسار زنر عند درجة حرارة (100^oC) هو $(12.041V)$.

٥.٤ هبوط القدرة لثنائي زنر بسبب ارتفاع درجة الحرارة

ان اقصى قدرة مبددة في ثنائي زنر 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:

$$P_D = P_{D(MAX)} - (mW/^oC) \times \Delta T \qquad (4-8)$$

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 زنر معين هي $(380mW)$ عند درجة حرارة (50^oC)، أوجد اقصى قدرة مبددة عند درجة حرارة (85^oC) علماً بان معامل هبوط القدرة لذلك زنر هو $(3.3mW/^oC)$ ؟

الحل: من معطيات المثال لدينا

$$P_{D(MAX)} = 380mW,\ T_1 = 50^oC,\ T_2 = 85^oC,\ (mW/^oC) = 3.3mW/^oC,\ P_D = ?$$

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

$$P_D = 380mW - 3.3mW/^oC \times (85-50)^oC$$
$$P_D = 264.5mW$$

نلاحظ ان اقصى قدرة مبددة هبطت من 380mW إلى 264.5mW نتيجة لارتفاع درجة الحرارة من 50^oC إلى 85^oC

٦.٤ تطبيقات ثنائي زنر:

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

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

١.٦.٤ استعمال ثنائي زنر 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:

$$V_R = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\,\% \qquad (4-9)$$

حيث V_R النسبة المئوية لتنظيم الفولتية.

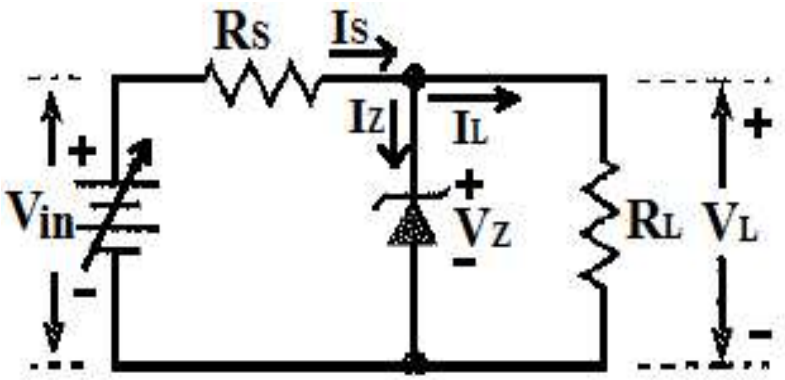
V_{NL} فولتية الإخراج المستمرة عند عدم وجود حمل ($R_L=\infty$).

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

الشكل (٤-٣) يمثل ابسط أنواع دوائر تنظيم الفولتية والذي يسمى منظم زنر (Zener Regulator)، حيث يربط الحمل على التوازي على طرفي ثنائي زنر، اما مقاومة التحديد R_S فوظيفتها تحديد التيار المار بثنائي زنر لكي لا يتجاوز الحد الأقصى المسموح به لثنائي زنر I_{ZMAX}.



شكل (٤-٣) دائرة منظم زنر

كتقريب أولي يمكن اعتبار ثنائي زنر 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:

$$I_S = \frac{V_{in} - V_L}{R_S} \qquad (4-10)$$

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

$$I_Z = I_S - I_L \qquad (4-11)$$

بإهمال ممانعة زنر الصغيرة يكون:

$$V_L = V_Z \qquad (4-12)$$

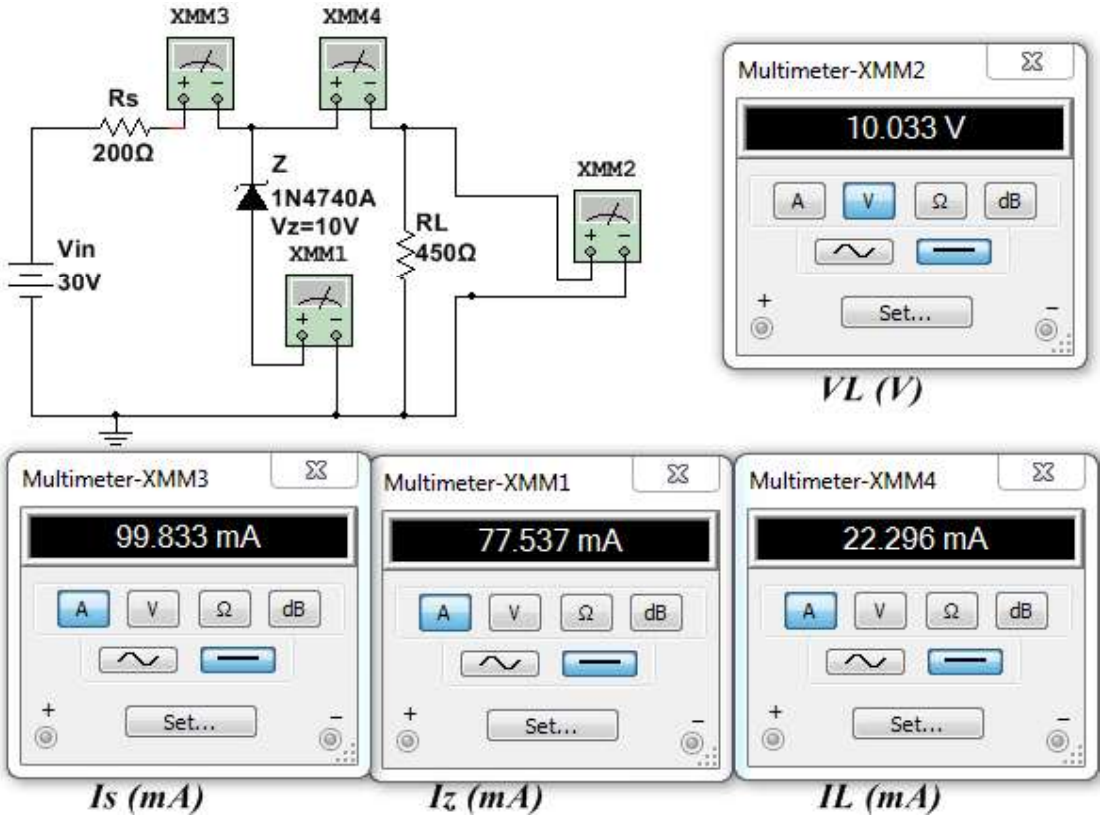
وبالاستفادة من قانون أوم يمكننا التعبير عن تيار الحمل بالصيغة:

$$I_L = \frac{V_L}{R_L} \qquad (4-13)$$

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

$$V_L = V_Z + I_Z Z_Z \qquad (4-14)$$

مثال (٤-٣): الشكل التالي يوضح نتيجة برنامج المحاكات (Multisim-14) لعمل دائرة منظم زنر، أوجد: فرق الجهد على طرفي الحمل ، تيار الحمل، تيار المقاومة Rs ، تيار زنر، ثم قارن نتائجك مع نتائج برنامج المحاكات.



الحل:

$$V_L = V_Z$$

$$V_L = 10V$$

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

$$I_L = \frac{10}{450} = 0.02222A = 22.22mA$$

$$I_s = \frac{V_{in} - V_z}{R_s}$$

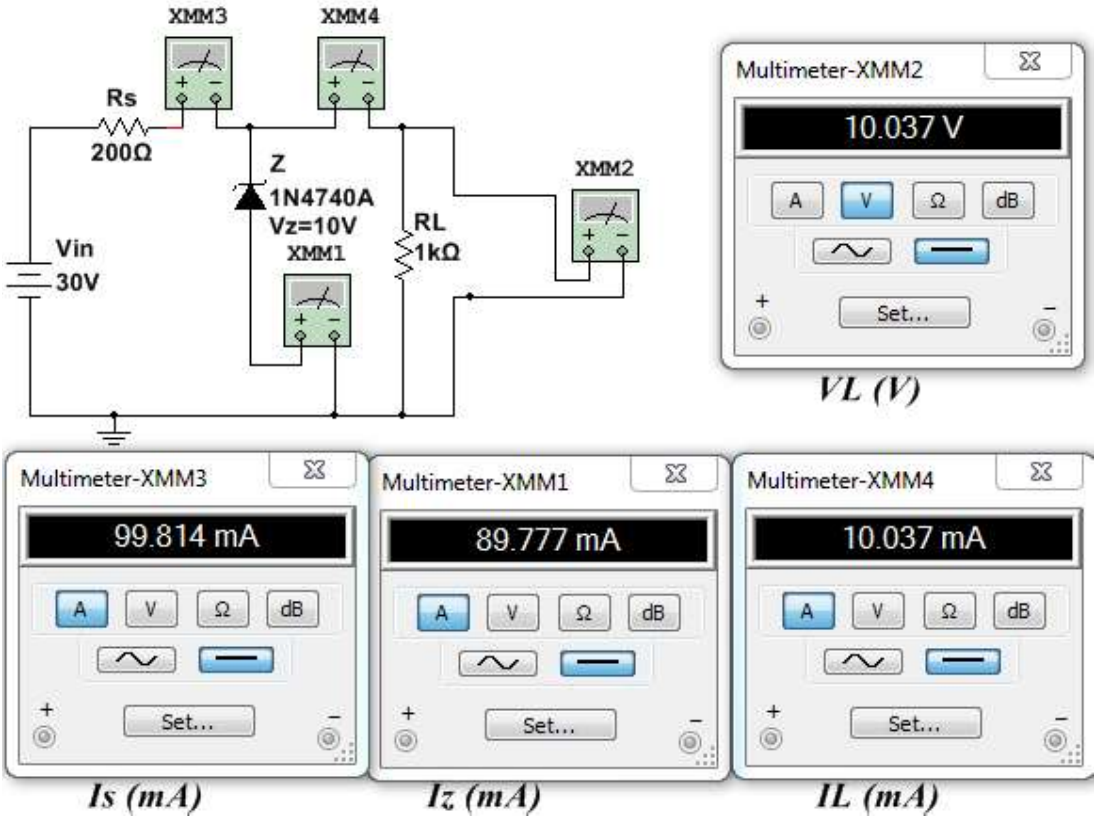
$$I_s = \frac{30 - 10}{200} = 0.1A = 100mA$$

$$I_Z = I_s - I_L$$

$$I_Z = 100 - 22.22 = 77.78mA$$

يلاحظ ان نتائج الحسابات قريبة من نتائج المحاكات، والاختلاف البسيط بينهما بسبب اننا في حساباتنا لم نأخذ بنظر الاعتبار مقاومة ثنائي زنر.

مثال(٤-٤): تم إعادة تنفيذ برنامج المحاكات في المثال السابق بعد تغيير قيمة مقاومة الحمل إلى (1000Ω)، أوجد: فرق الجهد على طرفي الحمل ، تيار الحمل، تيار المقاومة Rs ، تيار زنر، ثم قارن نتائجك مع نتائج برنامج المحاكات.



الحل:

$$V_L = V_Z$$

$$V_L = 10V$$

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

$$I_L = \frac{10}{1000} = 0.01A = 10mA$$

$$I_s = \frac{V_{in} - V_z}{R_s}$$

$$I_s = \frac{30 - 10}{200} = 0.1A = 100mA$$

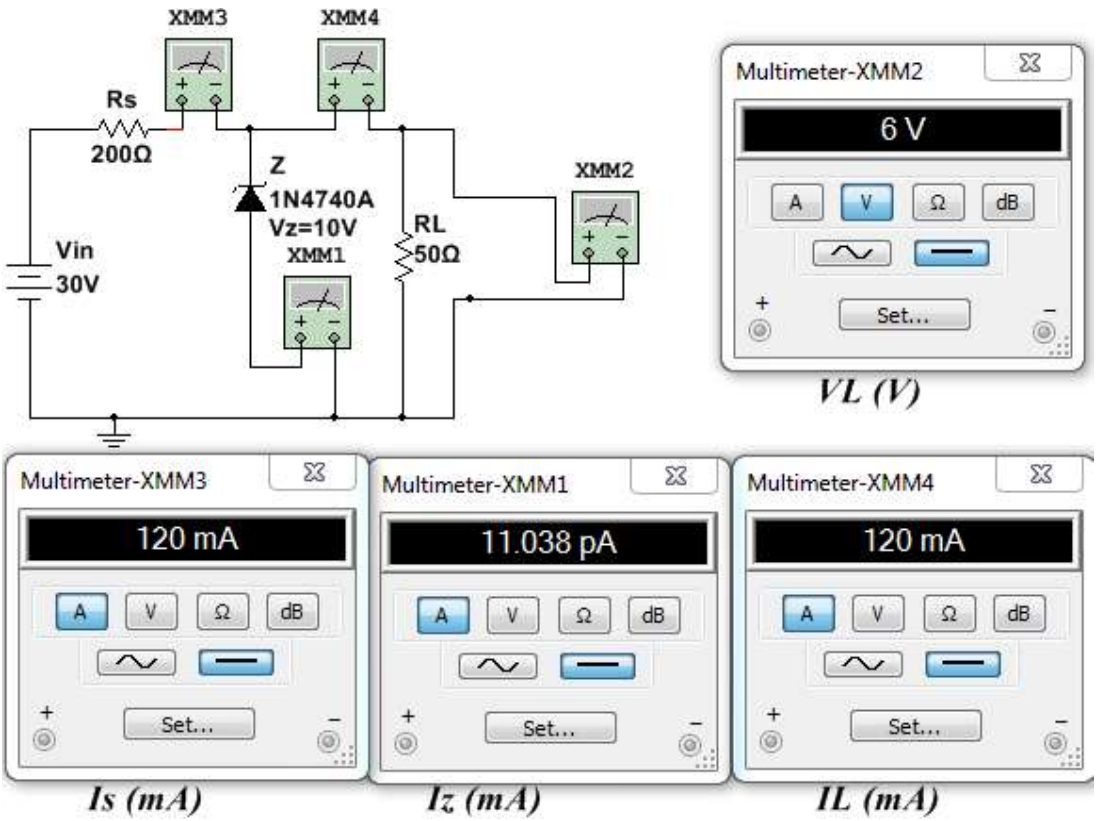
$$I_Z = I_s - I_L$$

$$I_Z = 100 - 10 = 90mA$$

يلاحظ ان نتائج الحسابات قريبة من نتائج المحاكات، والاختلاف البسيط بينهما بسبب إهمال تأثير مقاومة ثنائي زنر.

لتوضيح حدود عمل ثنائي زنر في دوائر التنظيم، نورد المثالين التاليين لنفس الدائرة في المثالين السابقين تفشل فيها الدائرة في تنظيم الفولتية.

مثال (٤-٥): تم إعادة تنفيذ برنامج المحاكات في المثال السابق بعد تغيير قيمة مقاومة الحمل إلى (50Ω)، أوجد: فرق الجهد على طرفي الحمل ، تيار الحمل، تيار المقاومة Rs ، تيار زنر، ثم قارن نتائجك مع نتائج برنامج المحاكات.



في هذه الحالة لا يقوم ثنائي زنر بعملية التنظيم لان الجهد العكسي المسلط على طرفيه اقل من جهد الانهيار لثنائي زنر، وبالتالي لا يكون للثنائي أي تأثير على عمل الدائرة (يعتبر دائرة مفتوحة)، ويمكن إيجاد قيم التيار والفولتية بالاعتماد على قانون أوم وكما يلي:

لإيجاد فرق الجهد على طرفي الحمل نجد أولا تيار الدائرة:

$$\mathrm{I} = \frac{V_{in}}{R_S + R_L}$$

$$\mathrm{I} = \frac{30}{200 + 50} = 0.12A = 120mA$$

$$V_L = I_L \times R_L$$

$$V_L = 0.12 \times 50 = 6V$$

$$I_L = I = 120mA$$

$$I_s = I_L = I = 120mA$$

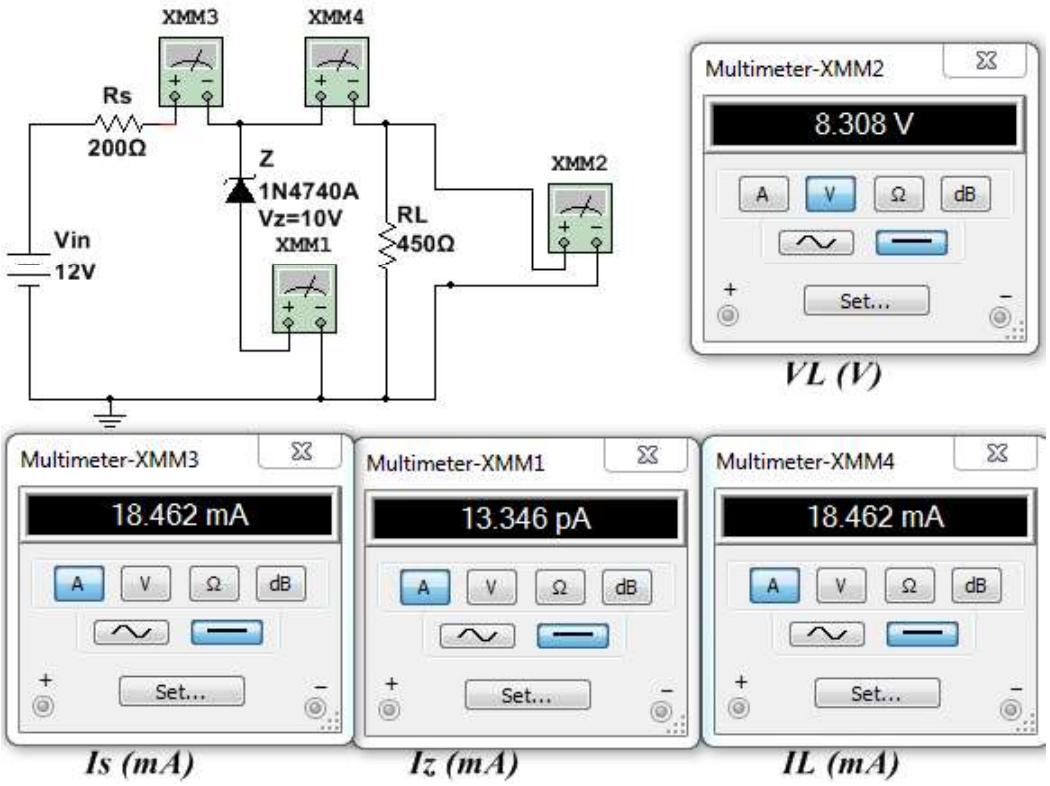
$$I_Z = 0 \qquad \text{(لان الثنائي يعمل لا يعمل في منطقة الانهيار)}$$

بالمقارنة مع نتائج المحاكات نجد ان النتائج التي حصلنا عليها مطابقة لنتائج المحاكات باستثناء ان البرنامج حسب قيمة صغيرة جداً لتيار زنر وهي $(11.038pA = 11.038 \times 10^{-12}A)$، وهي قيمة تيار التشبع العكسي للثنائي وهي قيمة صغيرة جداً يمكن إهمال تأثيرها في مثل هذه الدوائر.

وبالتالي فان هناك حدود دُنيا وعليا لمقاومة الحمل التي يمكن ان تقوم دائرة منظم زنر معينة بالعمل على تنظيم الجهد لذلك الحمل، فانخفاض الحمل عن قيمة معينة يجعل ثنائي زنر عاملا خارج منطقة الانهيار، حيث ان انخفاض قيمة مقاومة الحمل تقلل من قيمة تيار زنر ومتى ما قل تيار نزر عن تيار بدأ الانهيار (I_{ZT}) يصبح الثنائي خارج منقطة الانهيار ويتوقف عن التنظيم ويكون بمثابة دائرة مفتوحة، وبالمقابل فن ارتفاع قيمة مقاومة الحمل يقلل من تيار الحمل (وذلك لبقاء قرف الجهد على طرفيه ثابتة مع تغير قيمة مقاومة الحمل) وحيث ان تيار زنر معرف بالعلاقة $(I_Z = I_S - I_L)$ لذا فان انخفاض تيار الحمل (نتيجة لتغير قيمة مقاومته) يرافقه زيادة في تيار زنر، وهناك حد يمكن لتيار زنر لا يمكن تجاوزه (I_{ZMAX}) وذلك لتجنب تلف ثنائي زنر.

بالمقابل فان هناك حدود دُنيا وعليا لفولتية المصدر التي يمكن لثنائي زنر ان يقوم فيها بعملية التنظيم، فهي من جهة يجب ان لا تقل عن قيمة معينة لضمان عمل ثنائي زنر في منطقة الانهيار، والمثال التالي يوضح ذلك:

مثال (٤-٦): تم إعادة تنفيذ برنامج المحاكات في المثال السابق بعد إرجاع مقاومة الحمل إلى قيمتها الأولى (450Ω)، وتغير جهد المصدر إلى $(12V)$ أوجد: فرق الجهد على طرفي الحمل ، تيار الحمل، تيار المقاومة Rs ، تيار زنر، ثم قارن نتائجك مع نتائج برنامج المحاكات.



يلاحظ ان قيمة جهد المصدر صغيرة مما يجعل ثنائي زنر عاملا خارج منطقة الانهيار ويتصرف كدائرة مفتوحة، عندها يمكن حساب التيارات والجهد بالاعتماد على قانون أوم وكما يلي:

$$\mathrm{I} = \frac{V_{in}}{R_S + R_L}$$

$$\mathrm{I} = \frac{12}{200 + 450} = 0.01846A = 18.46mA$$

$$V_L = I_L \times R_L$$

$$V_L = 0.01846 \times 450 = 8.308V$$

$$I_L = I = 18.46mA$$

$$I_s = I_L = I = 18.46mA$$

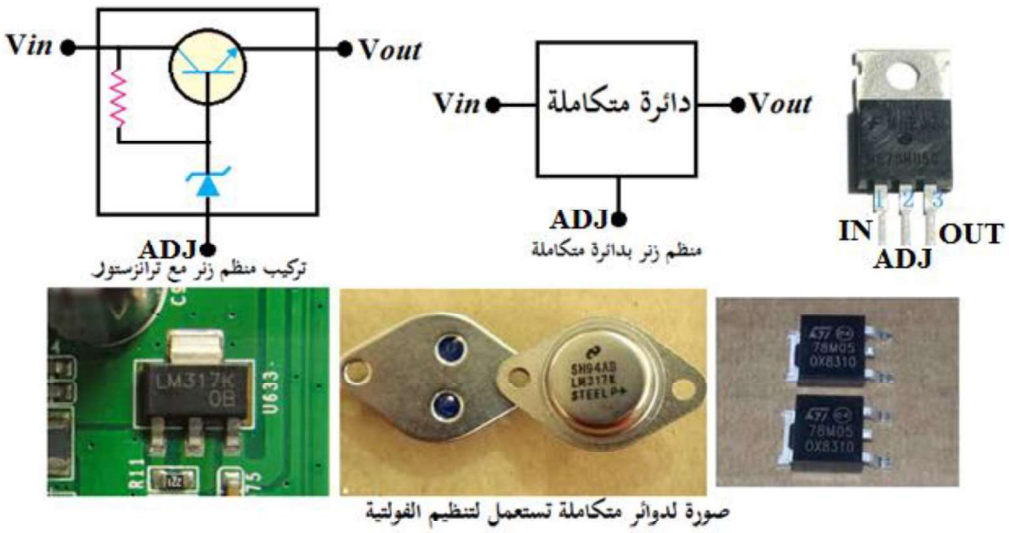
$$I_Z = 0$$ (لان الثنائي يعمل لا يعمل في منطقة الانهيار)

ويلاحظ ان هناك تطابق بين نتائج المحاكات ونتائج الحسابات. وبالمقابل فان هناك حدود عليا للجهد الذي يمكن ان ينظمه دائرة منظم زنر، فزيادة الجهد ترافقها زيارة في تيار زنر العمل في منطقة الانهيار ومتى ما اصبح التيار المار في ثنائي اكبر من القيمة العظمى (I_{ZMAX}) لتيار زنر المسموح به فان ثنائي الزنر يتلف.

٢.٦.٤ استعمال منظم زنر بدائرة متكاملة

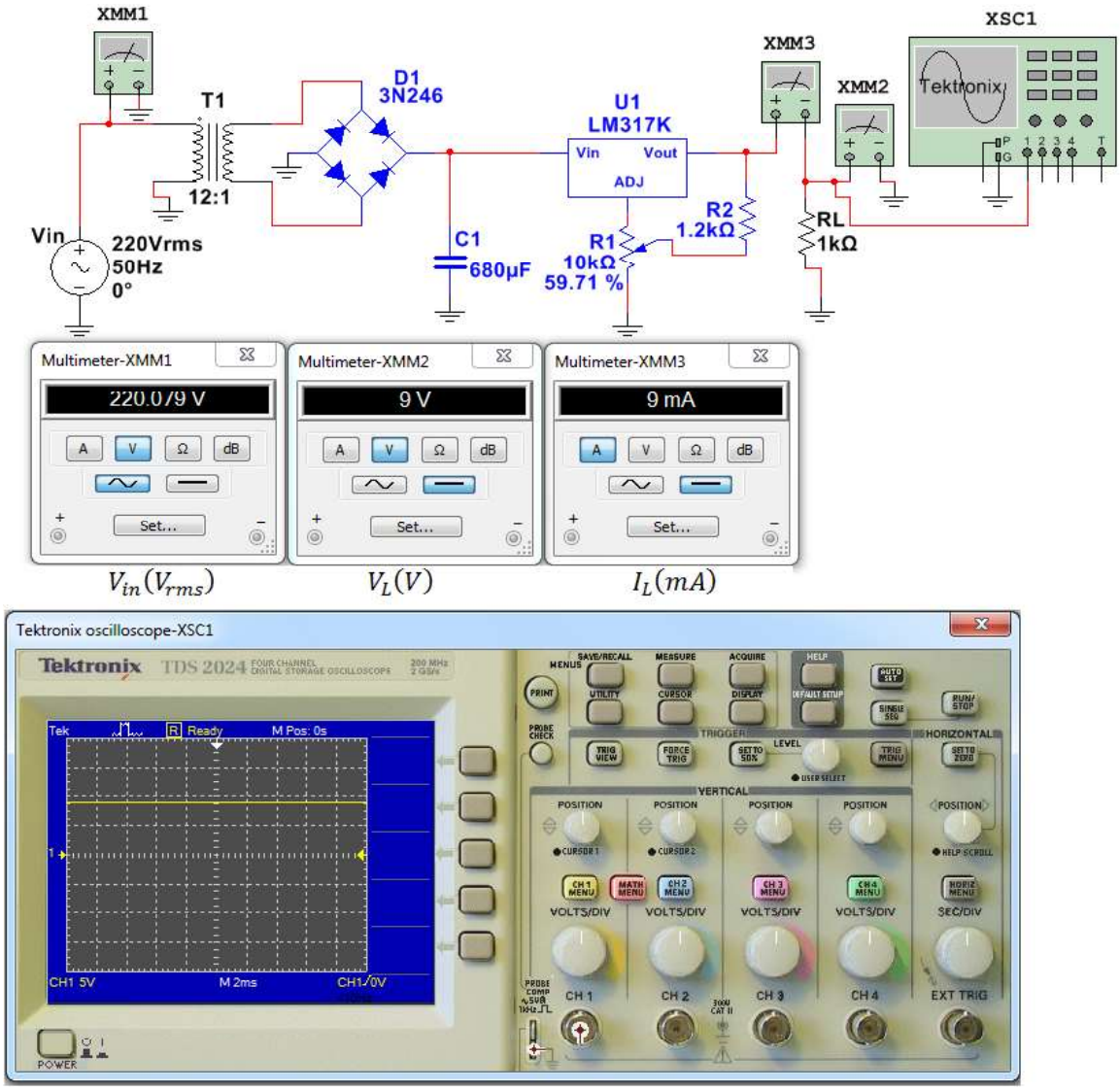
الشكل (٤-٤) يوضح باستعمال ثنائي زنر والترانزستور في دائرة تنظيم الفولتية، والذي يتميز عن منظم الفولتية الذي يستعمل ثنائي زينر لوحده هو ان التغير بتيار يقل بنسبة كبيرة، وبالتالي فان تأثير ممانعة الزينر يقل بمقدار كبير وتصبح دائرة المنظم اكثر استقراراً وذات قدرة إخراج عالية بالمقارنة مع منظم زنر. هناك منظمات فولتية تستعمل اكثر من ترانزستور في دوائر اكثر تعقيداً وبإمكانيات افضل.

عادة ما تُصنع ثنائيات الزينر والترانزستورات المكونة لمنظم الفولتية على شريحة واحدة على شكل دائرة متكاملة IC (Integrated Circuit) تحتوي على ثلاثة اطراف حيث يكون الإدخال إلى منظم الفولتية هو الفولتية من مجهز القدرة غير المنظم (مقوم موجة كاملة ومرشح) اما الإخراج فيذهب إلى مقاومة الحمل، ان منظم الفولتية الذي يكون بشكل دائرة متكاملة تمتاز بسهولة الاستعمال و الاعتمادية العالية وتنظيم افضل من منظم زنر أو منظمات زنر والترانزستور.



شكل (٤-٤) منظم فولتية زنر بدائرة متكاملة

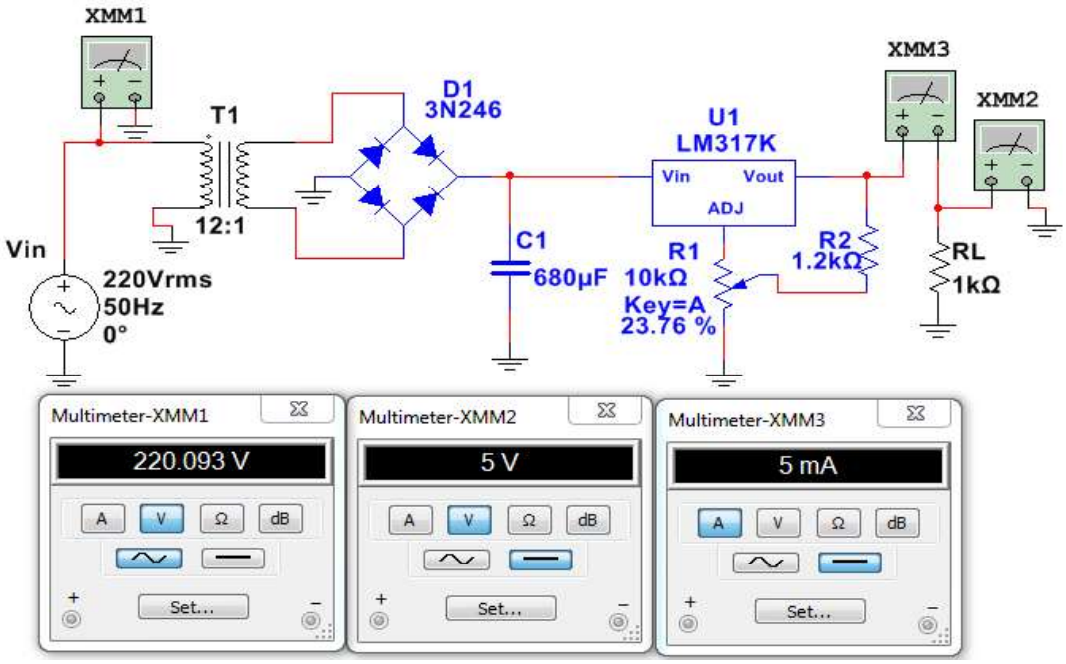
لتوضيح المزايا التي يتميز بها منظم الفولتية باستعمال الدوائر المتكاملة تمت محاكات عمل الدائرة باستعمال برنامج (Multism-14) الموضحة في الشكل (٤-٥)، تقوم الدائرة بتوفير فولتية مستمرة يمكن التحكم بقيمتها ضمن المدى (1.8-12.2Vdc) بالاعتماد على تغذية من الشبكة الوطنية، لهذه الدائرة اعتمادية عالية فهي توفر فولتية مستمرة ثابتة بصرف النظر عن تغير جهد الإدخال أو تغير قيمة الحمل المربوط، تتكون الدائرة من محولة خافضة ودائرة مقوم قنطرة ومرشح متسعة بالإضافة إلى المتكاملة (LM317K)، تقوم المحولة والمقوم والمرشح بتوفير فولتية مستمرة غير منظمة، وتقوم المتكاملة بعملية التنظيم، ويمكن التحكم بالقيمة التي تثبت فيها فولتية الإخراج من خلال التحكم بقيمة المقاومة المتغيرة، وقد قمنا بضبط المقاومة المتغيرة لتجعل فولتية المجهز عند قيمة (9V).



شكل (٤–٥) محاكات لعمل دائرة منظم فولتية باستعمال الدائرة المتكاملة LM317K

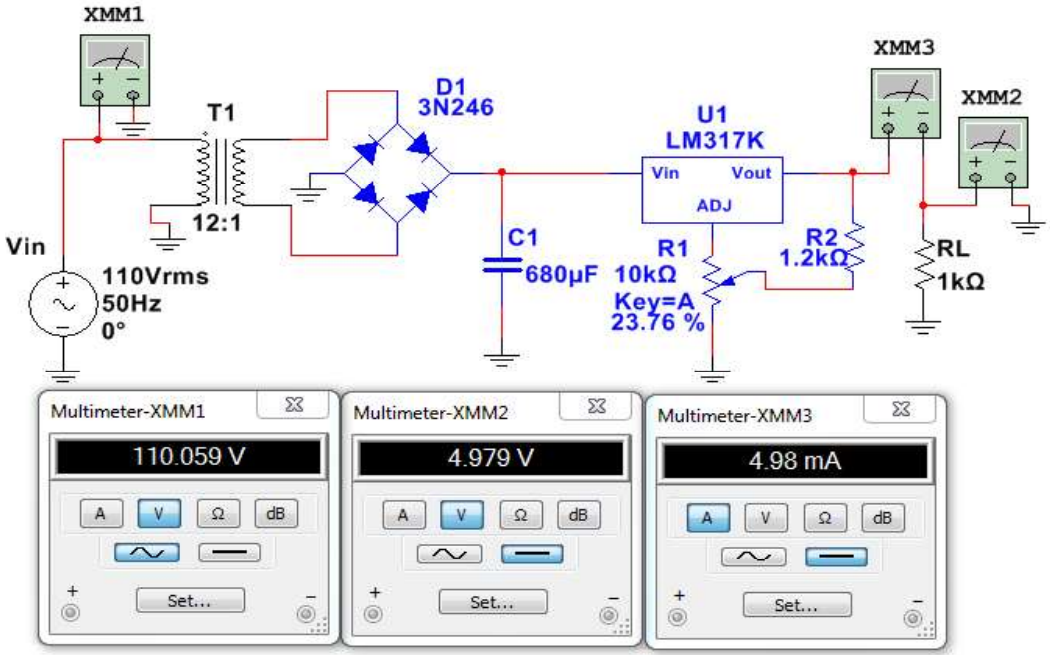
يلاحظ من رسمة الاوسليسكوب ان فولتية الإخراج مستمرة وخالية من أي تموج وقيمتها (6V)، كما الفولتميتر (XMM1) يسجل فولتية الإدخال متناوبة قيمتها (220Vrms)، بينما يسجل الفولتميتر (XMM2) المربوط على طرفي الحمل فولتية مستمرة (9V) بينما سجل الاميتر (XMM3) تيار الحمل مقداره (9mA).

يمكن الاستفادة من دائرة السابقة في عمل جهاز شاحن لواحدة من التطبيقات الإلكترونية الشائعة في وقتنا الحالي هي أجهزة الموبايل والتي تعتمد في تغذيتها على بطارية قابلة للشحن (غالباً ما تكون فولتيتها 5V)، ويتم شحنها من كهرباء الشبكة الوطنية بأجهزة شاحن، قمنا بضبط المقاومة المتغير لجعل فولتية الإخراج للدائرة تساوي (5V) كما هو موضح بالشكل (٤–٦).



شكل (٤–٦) محاكات لجهاز شاحن الموبايل باستعمال منظم زنر بدائرة متكاملة

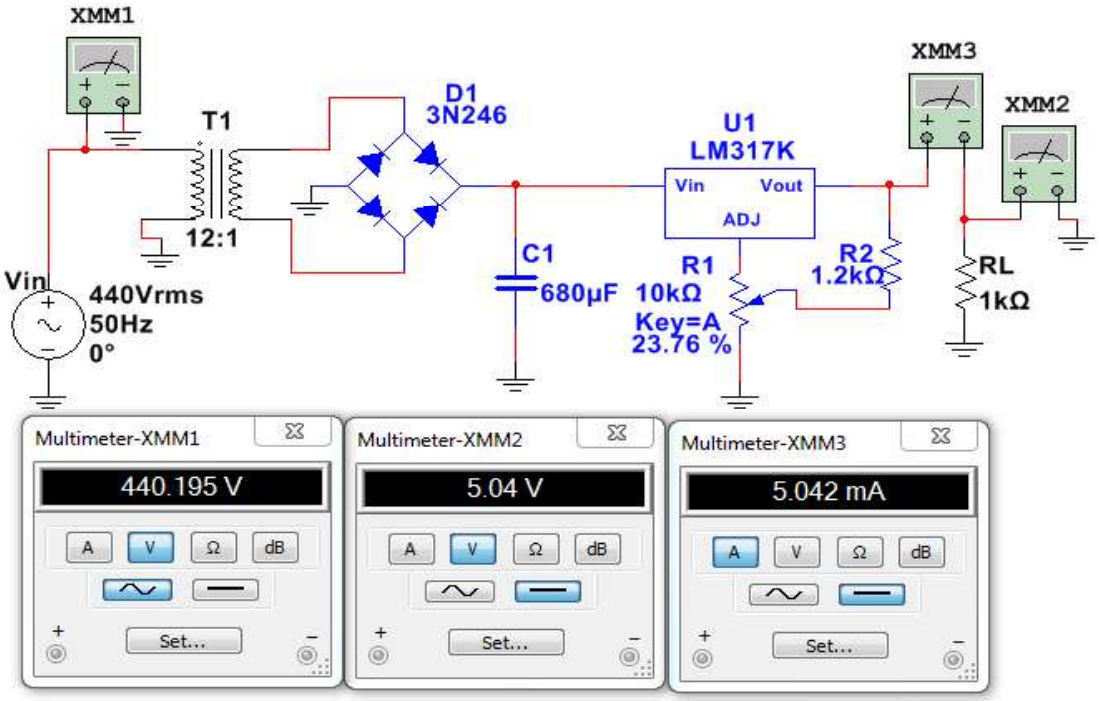
لاختبار استقرارية عمل الدائرة سنقوم بتنفيذ برنامج المحاكات لضروع عملية تتضمن تغير كبير في فولتية التجهيز وكذلك تغير مقاومة الحمل المستعمل، لنبحث أولا استقرار عمل الدائرة في حالة تغير فولتية التجهيز من الشبكة الوطنية، لنفرض ان فولتية التجهيز (الشبكة الوطنية) قد انخفضت إلى نصف قيمها الاعتيادية ($V_{in} = 110V_{rms}$) الشكل (٤–٧) يوضح نتيجة المحاكات.



شكل (٤–٧) محاكات لمنظم زنر بدائرة متكاملة في حالة انخفاض جهد التجهيز

نلاحظ من نتيجة المحاكات ان فولتية الحمل وتيار الحمل ثابتة تقريبا عند قيمتها الأولية.

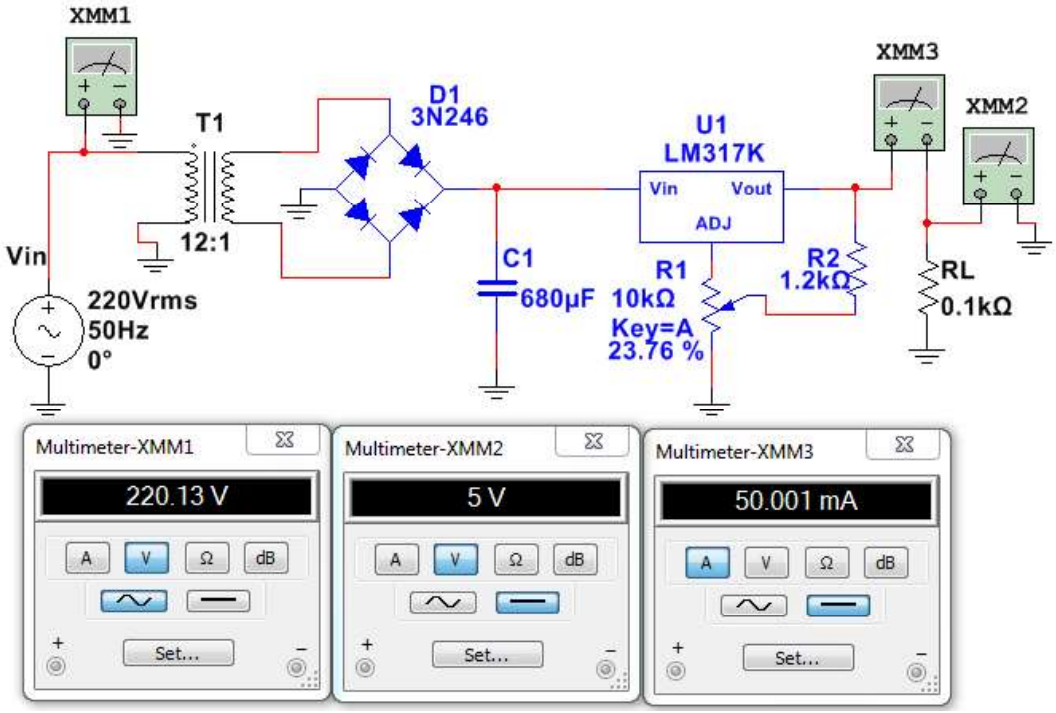
لنفرض ان فولتية التجهيز الوطنية قد انخفضت إلى ضعف قيمتها الاعتيادية (440Vrms)، الشكل (٤-٨) يوضح نتيجة المحاكات.



شكل (٤-٨) محاكات لمنظم زنر بدائرة متكاملة في حالة انخفاض جهد التجهيز

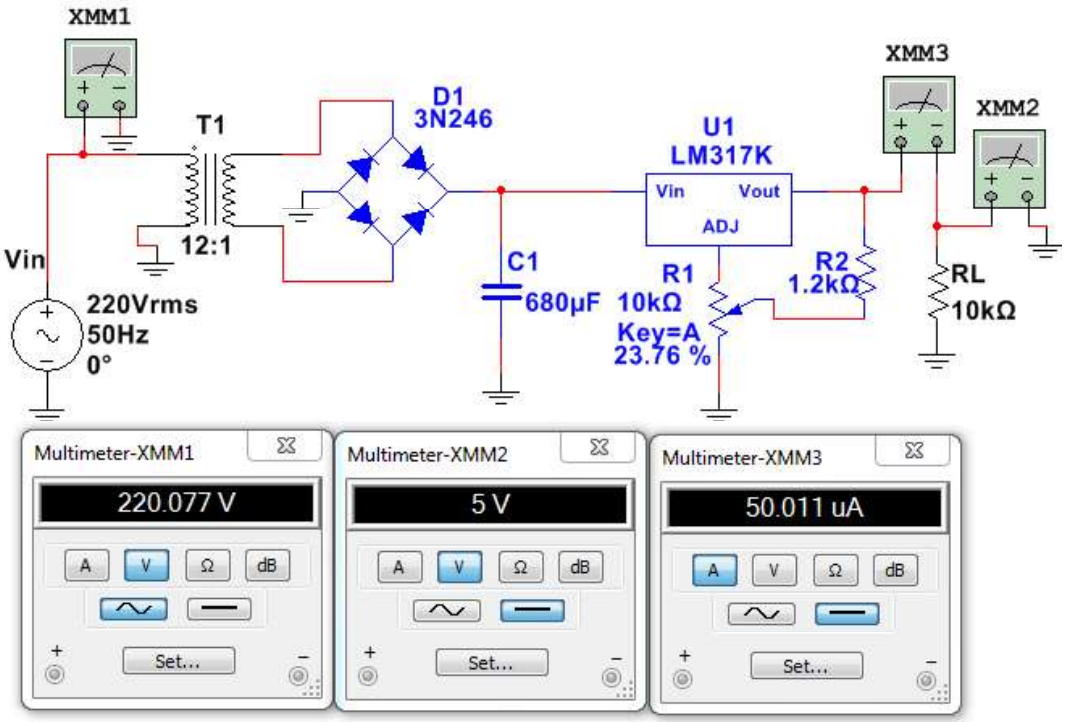
يلاحظ من الشكل السابق ان زيادة فولتية التجهيز لم تأثر على جهد الإخراج المستمر للدائرة.

لمناقشة تأثير تغير قيمة الحمل المربوط نثبت فولتية التجهيز عند قيمتها الاعتيادية (220Vrms)، ونقوم بتغير قيمة مقاومة الحمل، الشكل (٤-٩) يوضح نتيجة المحاكات في حالة انخفاض قيمة مقاومة الحمل إلى عُشر قيمتها الأولية (0.1kΩ).



شكل (٤–٩) محاكات لمنظم زنر بدائرة متكاملة في حالة انخفاض مقاومة الحمل

يلاحظ من الشكل ان انخفاض قيمة مقاومة الحمل لم تأثر على قيمة فولتية الإخراج المستمرة للدائرة، الشكل (٤–١٠) يوضح نتيجة المحاكات في حالة ارتفاع قيمة إلى عشرة أضعاف قيمتها الأولى (10kΩ).



شكل (٤–١٠) محاكات لمنظم زنر بدائرة متكاملة في حالة ارتفاع قيمة مقاومة الحمل

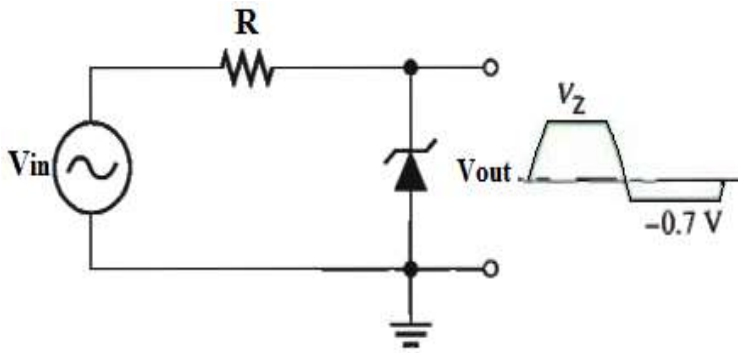
يلاحظ من (٤-١٠) السابق ان ارتفاع قيمة الحمل لم تأثر على قيمة فولتية الإخراج.

نستنتج مما سبق ان لدائرة منظم زنر بدائرة متكاملة استقرارية عمل جديدة اذا نها تجهز فولتية إخراج مستمرة ذات قيمة ثابتة لمدى كبير من تغير الجهد المجهز أو تغير قيمة مقاومة الحمل.

٣.٦.٤ استعمال ثنائي زنر في دوائر تحديد الفولتية

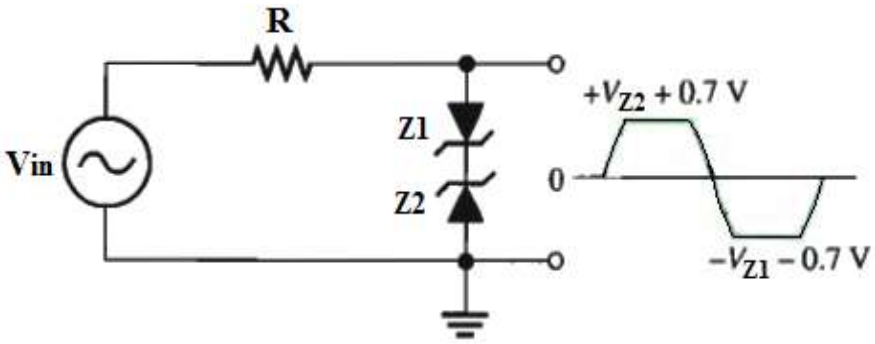
بالإضافة لاستعمال ثنائي زنر في دوائر تنظيم الفولتية، يمكن استعمال ثنائي زنر في دوائر تحديد (تقليم) الفولتية ويتيح ذلك الاستغناء عن البطارية التي كانت تستعمل في دوائر التحديد المعتمدة على ثنائي التقويم مما يوفر تكلفة اقل وحجم اصغر.

الشكل (٤-١١) يوضح دائرة محدد الفولتية الموجب باستعمال ثنائي زنر. خلال النصف الموجب يكون ثنائي زنر في حالة انحياز عكسي ويتصرف زنر كدائرة مفتوحة ($V_o=V_{in}$) إلى ان تتغلب الفولتية المسلطة على جهد انهيار ثنائي زنر وعندها تتحدد ذروة فولتية الإدخال عند جهد انهيار زنر ($V_o=V_Z$)، اما خلال النصف السالب فيكون زنر في حالة انحياز أمامي وتتحد ذروة الجزء السالب عند جهد الحاجز لقيم فولتيات الإدخال الأكبر من جهد الحاجز ($V_o=V_B$).

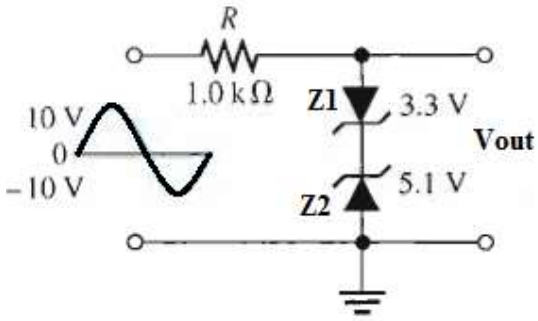


شكل (٤-١١) دائرة محدد الفولتية باستعمال ثنائي زنر

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

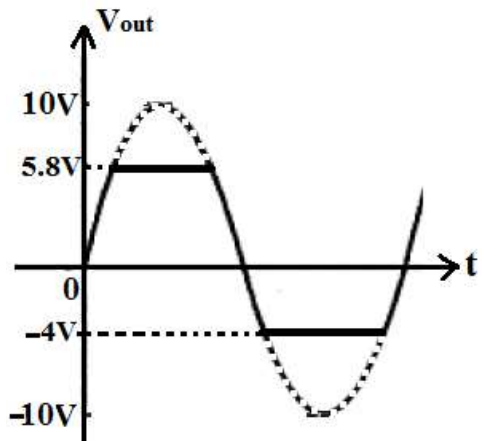


مثال (٤-٧): في الشكل المجاور، ارسم شكل الفولتية الخارجة مع توضيح عمل الدائرة.

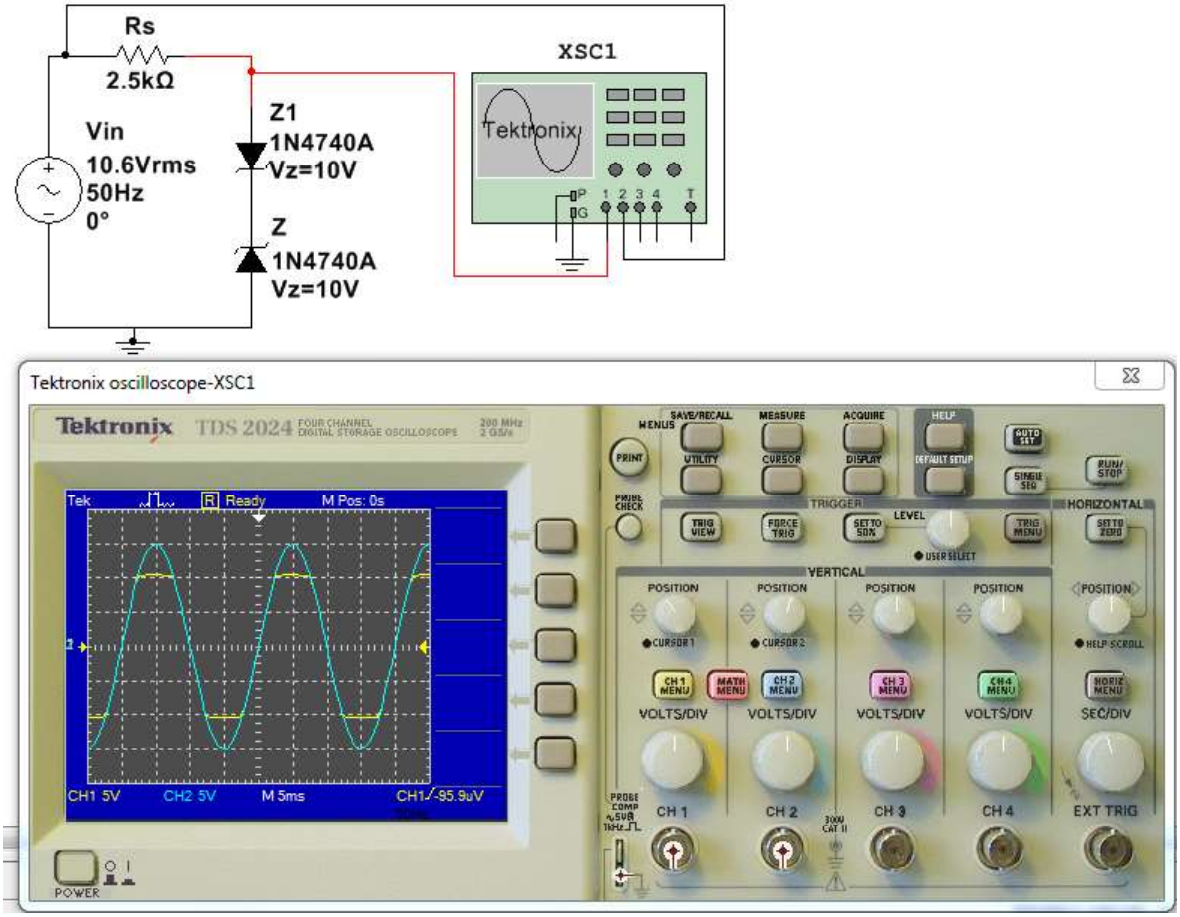


الحل:

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



الشكل (٤-١٢) يوضح استعمال برنامج المحاكات (Multilism-14) في تصميم دائرة محدد مركب باستعمال ثنائيي زنر متماثلين ($V_{Z1} = 10V\ , V_{Z2} = 10V$) وباستعمال مصدر متناوب قيمته الفعالة (10.6V) والذي يقابل فولتية جيبية ذروتها (15Vp) ولرسم الإشارة الداخلة والخارجة تم الاستفادة من جهاز المحاكات حيث تم توصيل القناة الأولى للاوسليسكوب بطرفي الإخراج للدائرة بينما تم توصل القناة الأولى بطرفي الإدخال للدائرة.

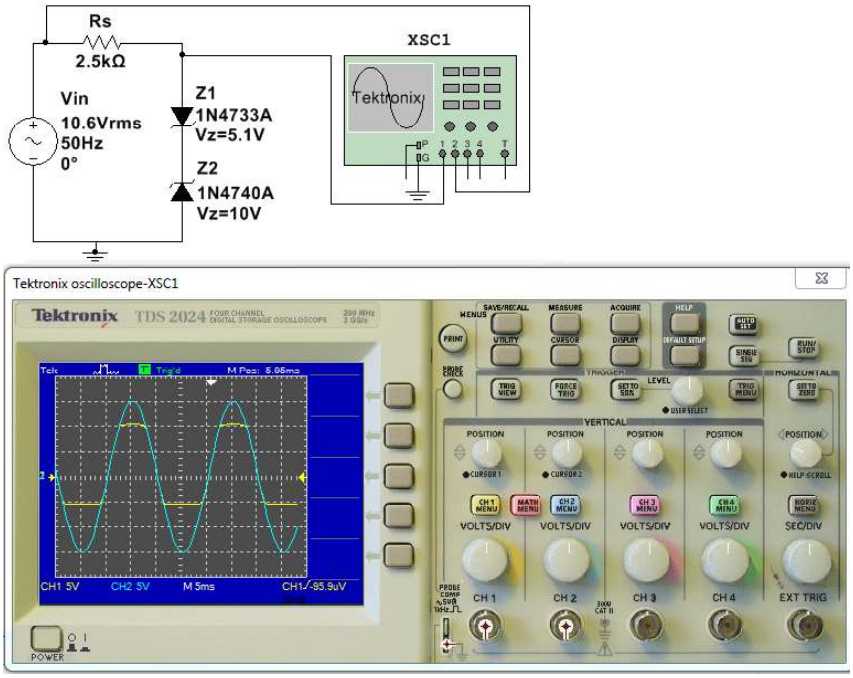


شكل (٤-١٢) محاكات لدائرة محدد مركب باستعمال ثنائيي زنر متماثلين

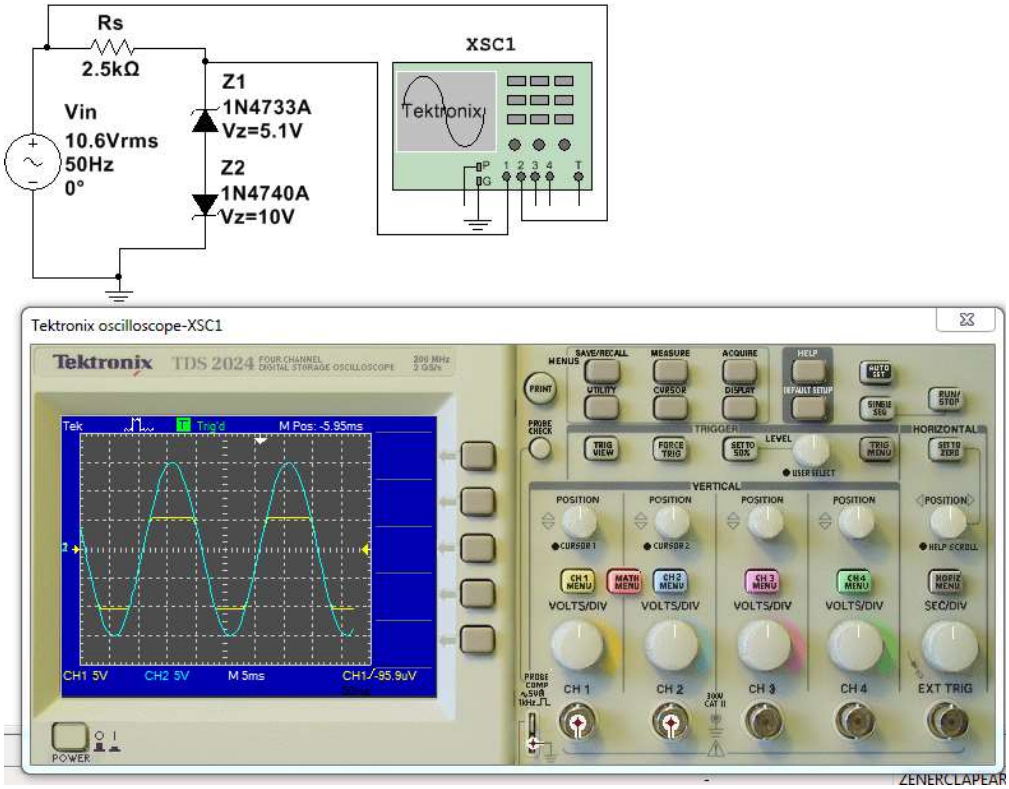
نلاحظ من الشكل ان إشارة الإدخال جيبية الشكل وذروتها (15V) والتي تقابل ثلاثة تقسيمات (Div) وكل تقسيم يقابل (5V) وما هو مثبت على شاشة الاوسليسكوب، يلاحظ ان فولتية الإخراج قد تحددت من الجزء الموجب والجزء السالب عند القيمة (10V)، حيث قام المحدد الموجب بتحديد الذروة الموجبة عند قيمة جهد الانهيار لثنائي زنر (V_{Z2})، اما الذروة السالبة فتم تحديدها بجهد الانهيار (V_{Z1}) ، ويلاحظ ان التحديد متماثل للجزء الموجب والسالب وذلك لاستعمال ثنائيي زنر متماثلين.

الشكل (٤-١٣) يوضح برنامج محاكات لدائرة محدد زنر يستعمل ثنائيي زنر مختلفين في جهد الانهيار $(V_{Z1} = 5.1V\ , V_{Z2} = 10V)$ ، حيث يقوم الثنائي الأول بتحديد ذروة الجزء السالب عند قيمة جهد الانهيار له (5.1V) بينما يقوم ثنائي زنر الثاني بتحديد ذروة الجزء الموجب عند قيمة جهد الانهيار له (10V).

الشكل (٦-١٤) يمثل محاكات لدائرة مشابهة للدائرة (٤-١٣) ولكن بعد قلب كل من ثنائيي زنر، ويلاحظ ان ذلك تسبب بجعل ثنائي زنر الأول يحدد الجزء الموجب بينما يكون ثنائي زنر الثاني هو المسؤول عن تحديد الجزء السالب.



شكل (٤-١٣) محاكات لدائرة محدد مركب باستعمال ثنائيي زنر مختلفين



شكل (٤-١٣) محاكات لدائرة محدد مركب باستعمال ثنائيي زنر مختلفين

أسئلة الفصل الرابع

س١: قارن بين كل من: ثنائي التقويم وثنائي زنر. ب-الانهيار التهدمي وانهيار زنر.

س٢: ما هي الميزة التي تجعل من ثنائي زنر العنصر الأساسي في دوائر تنظيم الفولتية.

س٣: اذا علمت بان المعامل الحرارة لثنائي زنر هو ($0.004\%/^{o}C$) وجهد انكساره يساوي ($14V$) عند درجة حرارة ($25^{o}C$)، أوجد التغير في فولتية زنر وفولتية زنر عند ارتفاع درجة الحرارة إلى ($120^{o}C$).

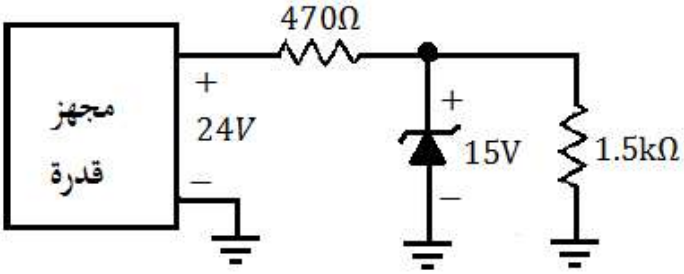
س٤: اقصى قدرة مبددة لثنائي زنر معين هي ($400mW$) عند درجة حرارة ($50^{o}C$)، أوجد اقصى قدرة مبددة عند درجة حرارة ($75^{o}C$) علماً بان معامل هبوط القدرة لذلك زنر هو ($3.1mW/^{o}C$) ؟

س٥: في الشكل المجاور أوجد

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

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

٣- احسب التيارات الثلاث بعد ربط ثنائي زنر.

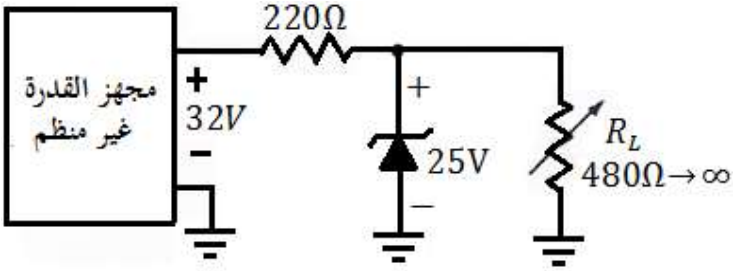


س٦: في الشكل المجاور احسب:

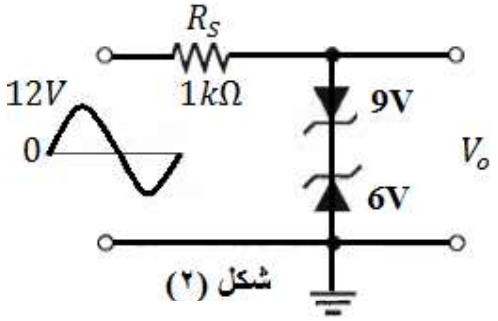
١- التيار المار في مقاومة التوالي.

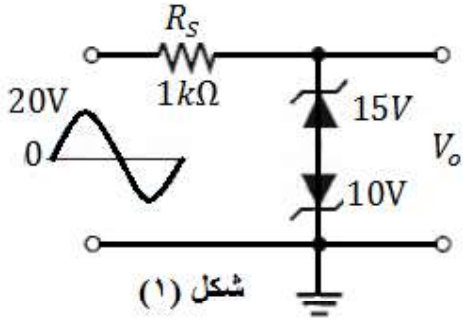
٢- اصغر واعظم تيار حمل.

٣- اصغر واعظم تيار زنر.

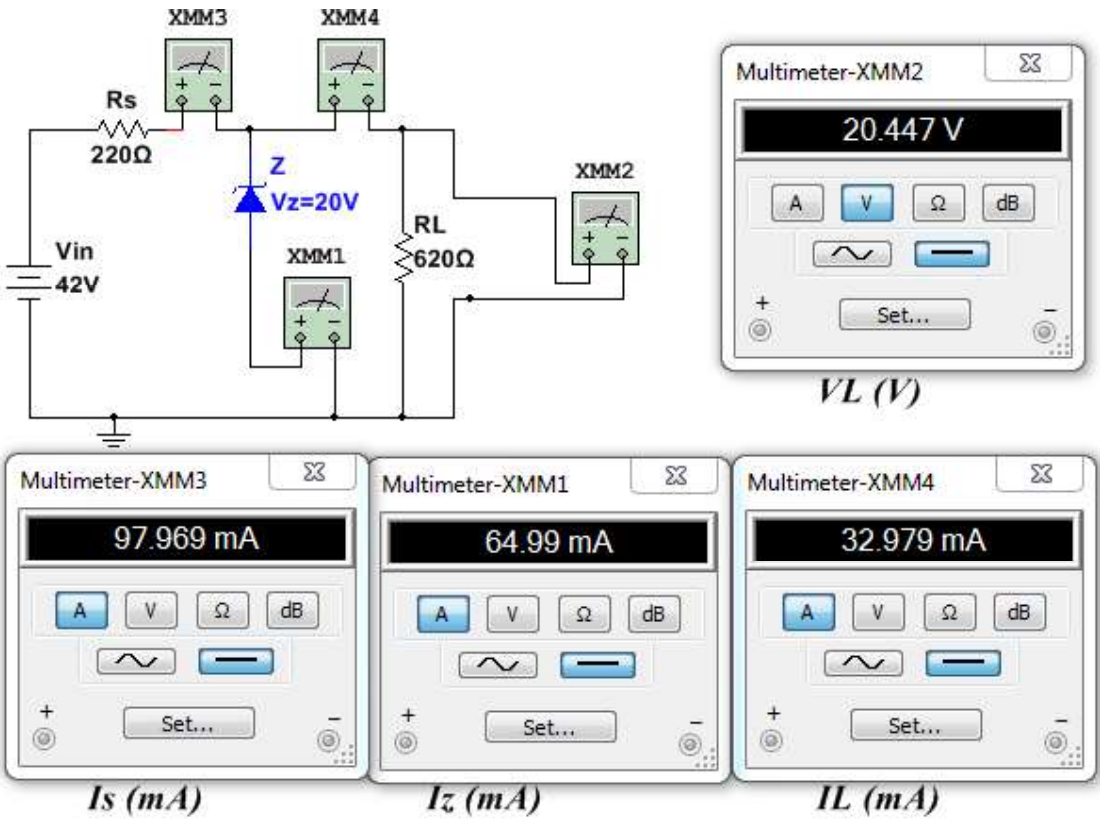


س٧: ارسم موجة الإخراج في كل دائرة من الدوائر التالية (اعتبر ثنائي زنر مثالي):





س٨: الشكل التالي يوضح نتيجة برنامج المحاكات (Multisim-14) لعمل دائرة منظم زنر، أوجد: فرق الجهد على طرفي الحمل ، تيار الحمل، تيار المقاومة Rs ، تيار زنر، ثم قارن نتائجك مع نتائج برنامج المحاكات.



س٩: وضح هل يحدث التنظيم في الدائرة التالية ولماذا.