

Pizeoelectric Rectifier Development for Low Power Energy Harvesting Applications by Dual Schottky and Op-Amp

Rayan Kudsieh *

(Received 8 / 6 / 2021. Accepted 15 / 12 / 2021)

□ ABSTRACT □

Piezoelectric rectifier circuit was studied and developed for low power energy harvesting applications based on dual schottky and op-amp . the types of rectifier diodes were studied and compared to obtain the diode with the best specifications for rectification with the least possible loss, so that the circuit could rectify a signal with a minimum value of 400mV. the two stage op-amp full wave rectifier was used to convert the AC signal to DC signal voltage received by piezoelectertic devices .study and simulations using the MULTISIM program to ensure obtaining a circuit capable of utilizing the piezoelectertic source signal with the least possible loss.

Keywords : Piezoelectertic, energy harvesting, rectifier, op-amp, schottky.

* Academic Assistant, Department of Communication, Faculty of Mechanical & Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. rayankud@gmail.com

تطوير دائرة تقويم بيزوكهربائي لتطبيقات حصاد الطاقة المنخفضة بواسطة ثنائي شوتكي ومكبر العمليات

ريان قدسية *

(تاريخ الإيداع 8 / 6 / 2021. قُبِلَ للنشر في 15 / 12 / 2021)

□ ملخص □

تمت دراسة وتطوير دائرة تقويم بيزوكهربائي لتطبيقات حصاد الطاقة المنخفضة بالإعتماد على ثنائي شوتكي و مكبر العمليات، ثم تمت مقارنة أنواع ثنائيات التقويم للحصول على الثنائي ذو المواصفات الأفضل للتقويم بأقل قدر ممكن من الضياعات بحيث تستطيع الدارة تقويم إشارة ذات حد أدنى بقيمة 400mV واستخدام مكبر عمليات على مرحلتين لتقويم الإشارة المتناوبة AC تقويم موجة كاملة لتصبح إشارة مستمرة DC من المنبع البيزوكهربائي. أجريت الدراسة والمحاكات باستخدام برنامج MULTISIM للتأكد من الحصول على دائرة قادرة على الإستفادة من إشارة المنبع البيزوكهربائي بأقل قدر ممكن من الضياعات.

الكلمات المفتاحية: بيزوكهربائي، حصاد الطاقة، تقويم، مكبر عمليات، ثنائي شوتكي.

* قائم بالأعمال - قسم الاتصالات - كلية الهندسة الميكانيكية و الكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية. rayankud@gmail.com

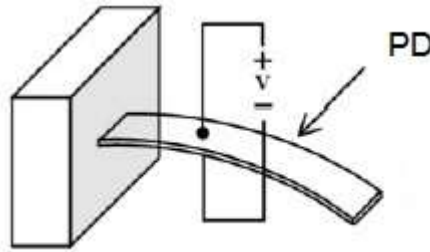
مقدمة:

حصاد الطاقة المنخفضة هي عملية يتم بها أخذ كمية صغيرة من الطاقة التي تهدر في الظروف العادية مثل الحرارة، الضوء، الصوت، الإهتزاز، الحركة، وتحويلها إلى طاقة كهربائية [1].

إن تقنية حصاد الطاقة المنخفضة لديها الإمكانية على إنشاء أنظمة إلكترونية مستقلة ذاتية القدرة بحيث لا تحتاج إلى بطاريات للتشغيل [2].

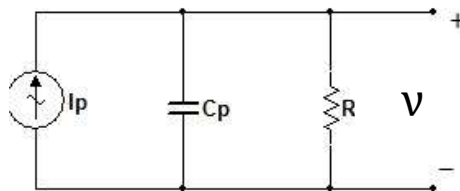
توجد طاقة متوفرة في الوسط المحيط التي تسمح بالإكتفاء الذاتي لتزويد أحمال ذات استهلاك منخفض للقدرة مثل الحساسات وأجهزة الإرسال.

يتم تحويل الطاقة الحركية إلى طاقة كهربائية عن طريق إستخدام جهاز بيزوكهربائي (كهروإجهادي) كمحول [3]. من أجل تحويل الطاقة الحركية إلى طاقة كهربائية يجب تطبيق إهتزاز أو صدمة على سطح الجهاز البيزوكهربائي (PD)، هذه الإهتزازات سوف تشوه بشكل ميكانيكي بلورات مادة الجهاز البيزوكهربائي شد أو ضغط لتوليد الشحنات الكهربائية و هذه الشحنات التي نشأت تقاس كجهد كهربائي كما هو موضح في الشكل (1) [4].



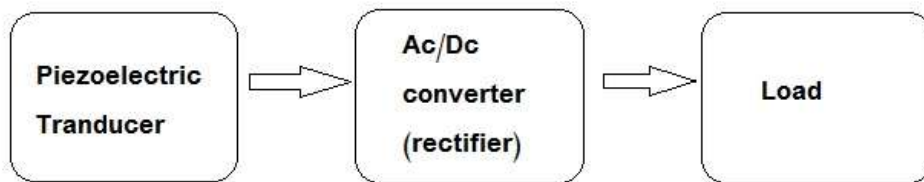
الشكل (1) مبدأ عمل الجهاز البيزوكهربائي.

تتم مكافئة الجهاز البيزوكهربائي بمنبع تيار متناوب i_p متصلاً معه مكثف C_p ومقاومة R_p متصلاً على التفرع كما هو مبين في الشكل (2).



الشكل (2) الدارة المكافئة لجهاز بيزوكهربائي.

تكون الأنظمة الإلكترونية المعتمدة على حصاد الطاقة المنخفضة متصلة مع الجهاز البيزوكهربائي عن طريق دائرة تقويم بحيث تعطي الخرج المطلوب للدائرة الإلكترونية بأقل قدر ممكن من الضياعات و تبديد الطاقة كما هو موضح في الشكل (3) [5].



الشكل (3) البنية النموذجية للأنظمة حصاد الطاقة المنخفضة البيزوكهربائي.

إن الجهاز البيزوكهربي قادر على توليد إشارة متناوبة من الإهتزازات أو الحركة المطبقة عليه، ويستخدم المقوم لتحويل الإشارة المتناوبة إلى إشارة باتجاه واحد وهو متصل مع الجهاز البيزوكهربي كمصدر للطاقة التي تمر عبر دائرة التقويم. لكي تكون الطاقة المنقولة إلى الحمل أعظم ما يمكن فإن دائرة التقويم تعتبر أهم جزئ في حصاد الطاقة المنخفضة [6]. في هذه الدراسة تستخدم ثنائيات شونكي ومكبر العمليات من أجل العمل على تخفيض الطاقة المبددة وزيادة فعالية نقل الطاقة. تمت الدراسة باستخدام برنامج المحاكات MULTISIM وإظهار خصائص الدارة من أجل التأكد من عملها في تطبيقات حصاد الطاقة المنخفضة.

أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية هذا البحث بتطوير دائرة تقويم لتطبيقات حصاد الطاقة المنخفضة بكفاءة عالية بشكل مستقل عن تردد المنبع البيزوكهربي حيث أن دارات التقويم المطورة في الأبحاث تعتمد على تقنية التبديل المتزامن التسلسلي (S-SSHI) [7] أو التبديل المتزامن التفرعي (P-SSHI) [8] وذلك يتطلب معرفة مسبقة بتردد إهتزاز المنبع البيزوكهربي، يمكن بواسطة الدارة المقترحة في هذا البحث تشغيل أنظمة حساسات أو أجهزة إرسال أو الحساسات المزروعة في جسم الإنسان (مراقبة المؤشرات الحيوية لصحة الإنسان) من طاقة الوسط المحيط وأهم تطبيقاتها التي يتم تطويرها بشكل مستمر هي إنترنت الأشياء.

طرائق البحث و مواده:

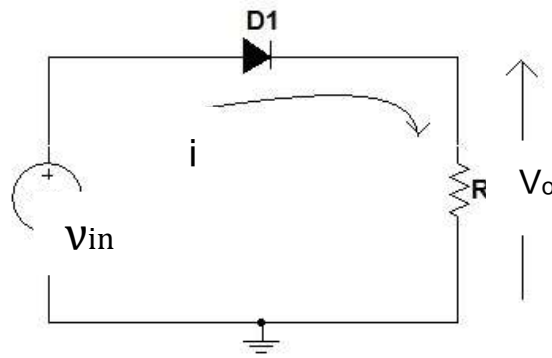
1) دارات التقويم:

تستخدم المقومات عادة كعناصر أساسية في منابع التغذية الكهربائية بالتيار المستمر للتجهيزات الإلكترونية، حيث أن الدارات المستخدمة في الحياة العملية تحتوي على عناصر الكترونية تحتاج إلى جهود مستمرة لكي تعمل كالترانزستورات مثلاً التي تتطلب جهد إنبياز مستمر ومن الناحية العملية يحتاج أي نظام الكتروني إلى منبع واحد أو أكثر من منابع التغذية الكهربائية المستمرة واداً من الضروري وجود دارات خاصة تقوم بعملية تحويل الجهد المتناوب إلى جهد مستمر وذلك لتأمين هذه التغذية.

تصنف دارات التقويم حسب شكل موجة الخرج دارات تقويم نصف موجة ودارات تقويم موجة كاملة.

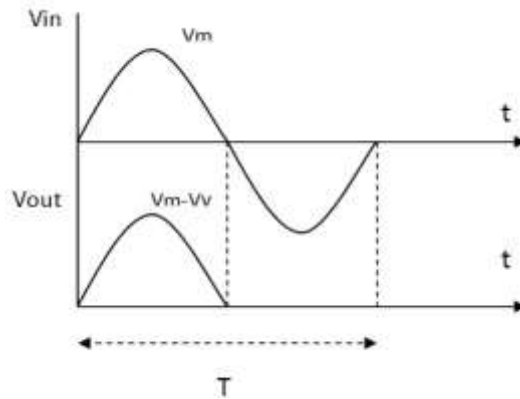
1-1) دائرة تقويم نصف الموجة:

كما هو مبين في الشكل (4) دائرة تقويم نصف الموجة تتكون من منبع إشارة متناوب V_{in} وثنائي التقويم $D1$ ومقاومة الحمل RL [9]. في نصف الموجة الموجبة يكون الثنائي $D1$ مستقطب أمامياً فيمر التيار عبره، ثم عبر المقاومة RL ومن ثم إلى القطب السالب للمنبع وبالتالي فإن نصف الموجة الموجب يمر إلى الخرج. عند ورود نصف الموجة السالب يصبح الثنائي في حالة استقطاب عكسي فييدي مقاومة لا نهائية مما يمنع مرور التيار عبره وبالتالي يمنع مرور نصف الموجة السالب إلى الخرج. عند ورود النبضة الموجبة من الدور الثاني يمررها الثنائي في حين يمنع مرور النصف السالب من موجة الدور الثاني وهكذا تتكرر العملية .



الشكل (4) دائرة تقويم نصف موجة .

المخططات الزمنية للإشارة الدخل V_{in} وجهد الخرج المقوم V_{out} على طرفي مقاومة الحمل RL مبينة في الشكل (5) (خلال دور واحد من إشارة الدخل).



الشكل (5) المخططات الزمنية لدائرة تقويم نصف موجة .

تعطى القيمة المتوسطة لجهد الخرج المقوم بالعلاقة :

$$V_{out(dc)} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{out}(t) \cdot dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{out}(t) \cdot dt = \frac{1}{\pi} (V_m - V_V) \quad (1)$$

حيث V_m القيمة العظمى للإشارة الدخل

و V_V جهد العتبة للثنائي المستخدم و يساوي 0.7V للثنائي المصنوع من السيلكون

نلاحظ أن الإستفادة في هذه الدارة هو فقط من النبضة الموجبة أو السالبة لإشارة الدخل و بالنتيجة يوجد ضياع كبير بالإضافة إلى أن القيمة الدنيا للإشارة الدخل لكي تعمل هذه الدارة هي 800mV.

1-2) دائرة تقويم موجة كاملة:

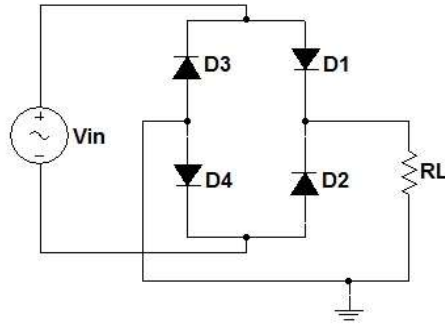
يوجد نوعان من دارات التقويم الموجة الكاملة

1- دائرة تقويم موجة كاملة ذات نقطة مشتركة

تحتاج وجود منبعين متماثلين بالقيمة مع وجود فرق بالطور بمقدار 180° و هذا الأمر صعب تحقيقه من مصدر بيزوكهربائي [10].

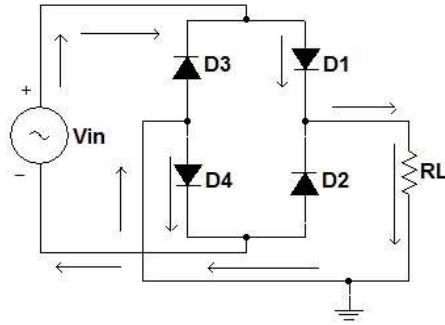
2- دائرة تقويم موجة كاملة جسرية

تتكون الدارة من أربع ثنائيات تقويم D1-D4 ومقاومة حمل RL كما هو موضح في الشكل (6) [11].



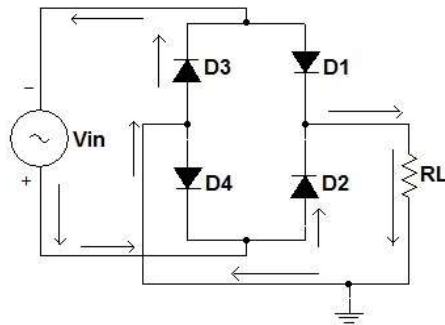
الشكل (6) دائرة تقويم موجة كاملة جسرية .

عند ورود نصف الموجة الموجب يكون D1,D4 مستقطب أمامياً في حين يكون D2,D3 مستقطب عكسياً لذلك يمر التيار عبر المسار D1-RL-D4 إلى القطب السالب لمنبع التغذية كما في الشكل (7) .



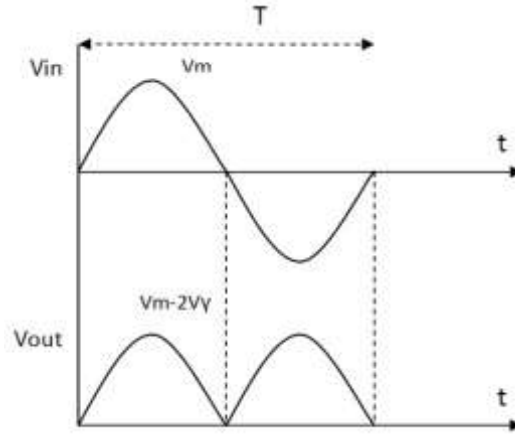
الشكل (7) مسار النبضة الموجبة للمنبع .

عند انعكاس قطب منبع التغذية يكون D1,D4 استقطاب عكسي أما D2,D3 استقطاب أمامي لذلك فإن نصف الموجة السالب هو الذي يمر عبر المسار D2-RL-D3 ومن ثم إلى القطب السالب لمنبع التغذية كما هو مبين في الشكل (8) .



الشكل (8) مسار النبضة السالبة للمنبع .

المخططات الزمنية للإشارة الدخل Vin وجهد الخرج المقوم Vout على طرفي مقاومة الحمل RL مبين في الشكل (9) (خلال دور واحد من إشارة الدخل).



الشكل (9) المخططات الزمنية لدارة تقويم موجة كاملة جسرية .

تعطى القيمة المتوسطة لجهد الخرج المقوم بالعلاقة :

$$V_{out(dc)} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{out}(t) \cdot dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} V_{out}(t) \cdot dt = \frac{2}{\pi} (V_m - 2V_{\gamma}) \quad (2)$$

في هذه الدارة تكون الإستفادة من النبضة الموجبة و السالبة معاً ولكن يجب أن تكون القيمة الدنيا لإشارة الدخل أكبر من $2V_{\gamma}$ أي أكبر من 1.4V لكي تعمل هذه الدارة .

(2) إختيار ثنائي التقويم الأقرب إلى المثالي :

نلاحظ من العلاقتين (1) و (2) أن القيمة المتوسطة لجهد الخرج المقوم تكون أكبر ما يمكن عندما يكون جهد العتبة لثنائي التقويم المستخدم $V_{\gamma} = 0V$ والضياعات تكون معدومة.

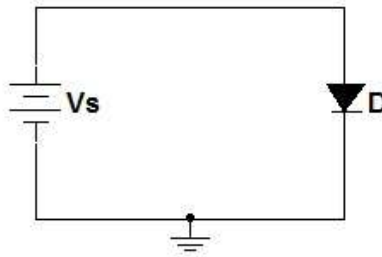
من الناحية العملية جهد العتبة لثنائي مصنوع من السيلكون $V_{\gamma(Si)} = 0.7V$ [12] أما أنصاف النواقل المصنوعة من مادة الجرمانيوم فقد توقف إنتاجها بسبب عدم الإستقرار الحراري بالرغم من أن $V_{\gamma(Ge)} = 0.3V$ ، لذلك تم الإعتماد على ثنائي شوتكي (ثنائي شوتكي عادة لا يستخدم لأغراض التقويم وإنما يستخدم في مجال الترددات العالية) المعروف بقيمة $V_{\gamma} = 0.3V$ (بسبب طريقة تصنيعه) بعد إجراء دراسة ومقارنة بين الثنائي 10BQ040 (شوتكي) والثنائي 1N4001 (ثنائي تقويم) كما يبين الجدول رقم (1) بعض المواصفات التي نحتاجها عند استخدام أي ثنائي للأغراض التقويم (المواصفات من datasheet للشركة المصنعة) .

الجدول (1) مواصفات الثنائي 1N4001-10BQ040

الثنائي المستخدم	V_{γ} (V)	I_{fmax} (A)	V_{rmax} (V)
1N4001	0.7	1	50
10BQ040	0.3	1	40

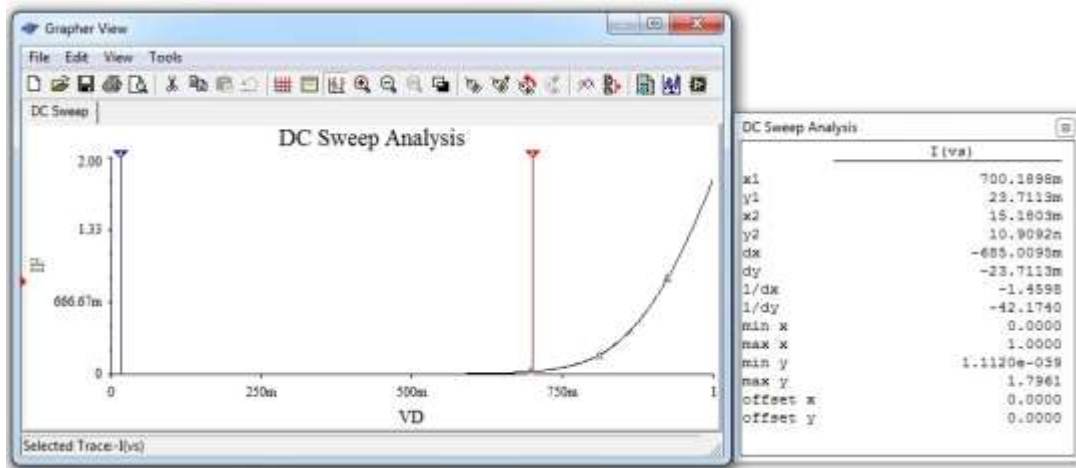
(1-2) المميّزة الأمامية و العكسية للثنائي 1N4001 :

لتحديد المميّزة الأمامية و العكسية [13] نستخدم الدارة المبينة في الشكل (10) وبرنامج المحاكات MULTISIM .



الشكل (10) الدارة المستخدمة لتحديد المميزات الأمامية والعكسية .

نقوم بتطبيق تحليل المنحني المستمر (Dc sweep Analysis) [14] وهو أحد التحليلات التي يقدمها برنامج MULTISIM بأخذ تغيير منبع الجهد Vs (المكافئ لتغير الجهد على الثنائي) بقيمة ابتدائية 0V و قيمة نهائية 1V و بخطوة 0.001V وإعتبار التيار المار في الثنائي متحول الخرج نحصل على المميزات الأمامية للثنائي كما هو مبين في الشكل (11) .



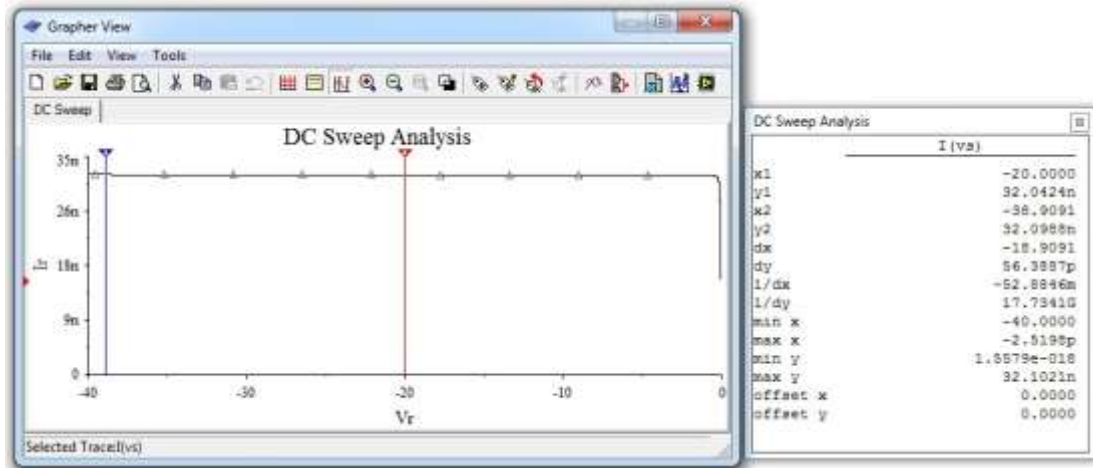
الشكل (11) مميزة الإنحياز الأمامي للثنائي 1N4001 مع مميزة cursors .

وباستخدام ميزة Cursors لتحديد إحداثيات أي نقطة على المنحني نجد أن :

$$X1 = Vf_{(1N4001)} = 700.189 \text{ mV} = V_{Y(1N4001)}$$

$$Y1 = If_{(1N4001)} = 23.77113 \text{ mA}$$

وبنفس الطريقة نحصل على المميزات العكسية بإعتبار القيمة البدائية -40V (أقل من الجهد العكسي الأعظمي) والنهائية 0V و بخطوة 0.001V كما هو مبين في الشكل (12) (عند استخدام تحليل Dc sweep Analysis القيمة البدائية هي الصغرى والقيمة النهائية هي العظمة لذلك يختلف شكل المنحني للثنائي في حالة الإنحياز العكسي عن الشكل المعروف لمميزة الثنائي ولكن بقيم دقيقة وصحيحة).



الشكل (12) مميزة الإنحياز العكسي للثنائي 1N4001 مع مميزة cursors .

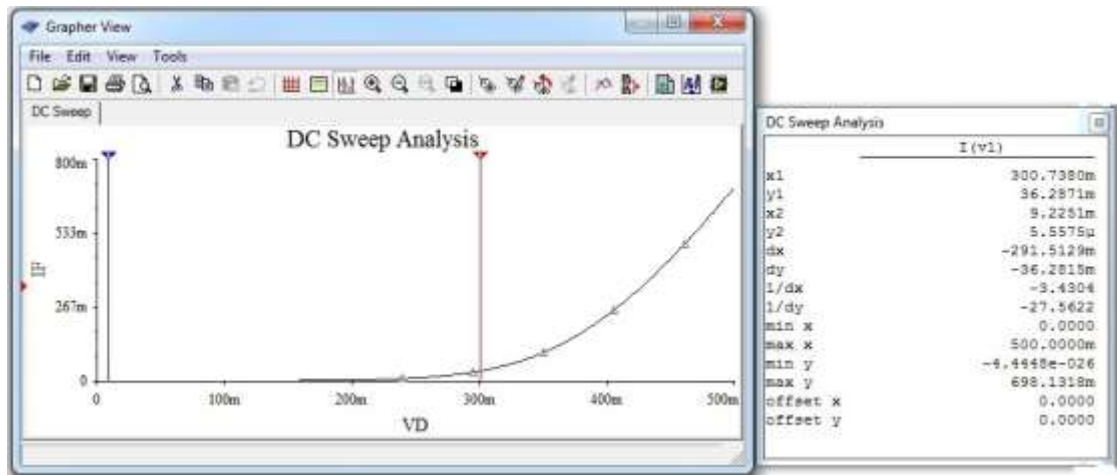
وباستخدام ميزة Cursors لتحديد إحداثيات أي نقطة على المنحني نجد أن :

$$X1 = Vr_{(1N4001)} = 20V$$

$$Y1 = Ir_{(1N4001)} = 32.0424 \text{ nA} \text{ (قيمة تيار التسريب العكسي ثابتة على كامل مجال الدراسة) .}$$

2-2) المميزة الأمامية و العكسية للثنائي 10BQ040 :

بالاعتماد على نفس الدارة المبينة في الشكل (7) (بعد استبدال ثنائي التقويم بثنائي شوتكي) وباستخدام تحليل المنحني المستمر وبأخذ تغير منبع الجهد Vs (المكافئ لتغير الجهد على الثنائي) بقيمة ابتدائية 0V وقيمة نهائية 0.5V وبخطوة 0.001V وإعتبار التيار المار في الثنائي متحول الخرج نحصل على المميزة الأمامية للثنائي كما هو مبين في الشكل (13) .



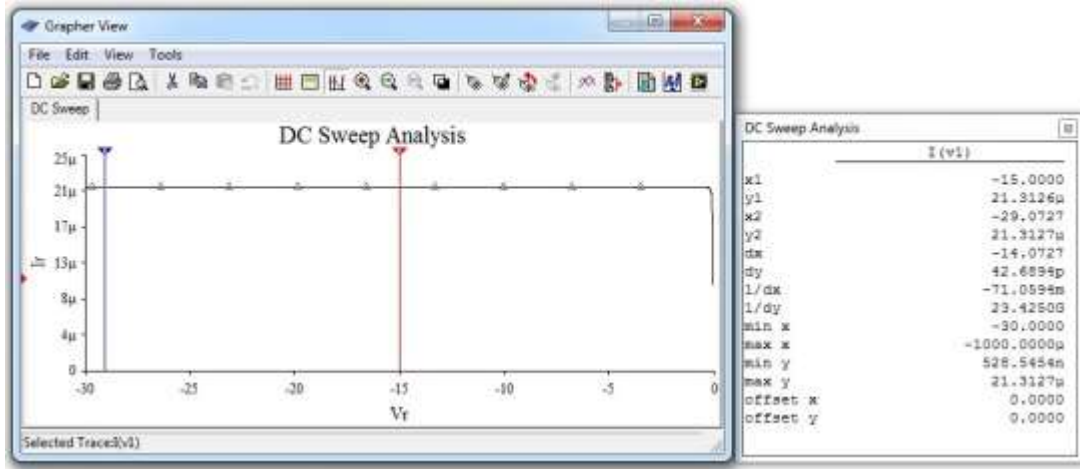
الشكل (13) مميزة الإنحياز الأمامي للثنائي 10BQ040 مع مميزة cursors .

وباستخدام ميزة Cursors لتحديد إحداثيات أي نقطة على المنحني نجد أن :

$$X1 = Vf_{(10BQ040)} = 300.738 \text{ mV} = Vf_{(10BQ040)}$$

$$Y1 = If_{(10BQ040)} = 36.287 \text{ mA}$$

وينفس الطريقة نحصل على المميّزة العكسية بإعتبار القيمة البدائية $-30V$ (أقل من الجهد العكسي الأعظمي) والنهائية $0V$ وبخطوة $0.001V$ كما هو مبين في الشكل (14).



الشكل (14) مميّزة الإنحياز العكسي للثنائي 10BQ040 مع مميّزة cursors .

وباستخدام ميزة Cursors لتحديد إحداثيات أي نقطة على المنحني نجد أن :

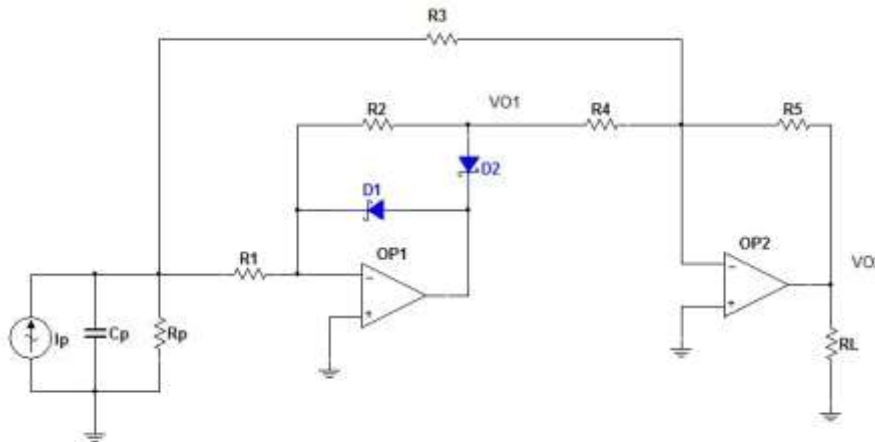
$$X1 = V_{r(10BQ040)} = 15V$$

$$Y1 = I_{r(10BQ040)} = 21.312 \mu A$$

عن طريق المقارنة بين المميّزة للثنائي 1N4001 و الثنائي 10BQ040 (شوتكي) نجد أن ثنائي شوتكي في المميّزة الأمامية أفضل في التقويم من 1N4001 أما في المميّزة العكسية فإن تيار التسرب لثنائي شوتكي أكبر من تيار 1N4001 و لكن هذا التيار يبقى من مرتبة الميكرو أمبير و ذلك يسمح لنا باستخدام ثنائي شوتكي 10BQ040 للتقويم في تطبيقات حصاد الطاقة المنخفضة .

(3) دائرة التقويم المقترحة:

دائرة التقويم المقترحة هي عبارة عن دائرة تقويم موجة كاملة قادرة على تحويل الإشارة المتناوبة من الجهاز البيزوكهربائي إلى إشارة مستمرة بقيمة جهد دخل حد أدنى $V_{in(min)} = 400mV$ كما هو موضح في الشكل (15).

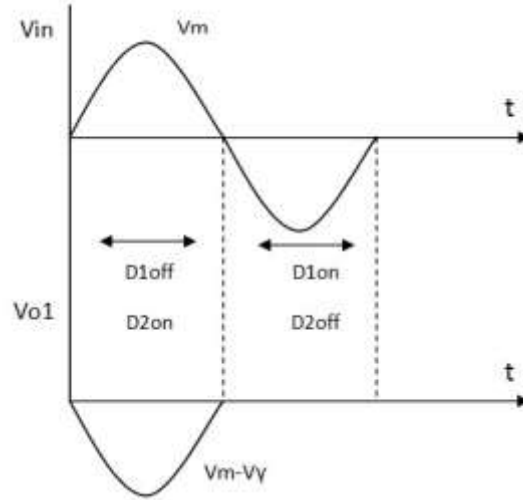


الشكل (15) دائرة التقويم المقترحة في البحث .

بفرض أن الإشارة من المنبع البيزوكهربيائي إشارة جيبية بمطال V_m (لتبسيط المخططات الزمنية للدارة).
 خلال النبضة الموجبة للإشارة الدخل V_{in} خرج مكبر العمليات OP1 يجب أن يكون ذو قيمة سالبة و بذلك يكون $D1=off$
 $D2=on$ ويكون خرج مكبر العمليات OP1 [15]

$$V_{o1} = - \frac{R_2}{R_1} V_{in}$$

و بما أن $R_2=R_1$ $V_{o1} = -V_{in} = - (V_m - V_Y)$ خلال نصف النبضة الموجبة من إشارة الدخل كما هو
 موضح في الشكل (16) .



الشكل (16) المخططات الزمنية عند خرج OP1 .

أما خلال النبضة السالبة من إشارة الدخل التي تجعل قيمة خرج مكبر العمليات OP1 ذو قيمة موجبة ويكون $D1=on$
 $D2=off$ ويكون خرج مكبر العمليات OP1 $OP1=0V$.

الإشارة النهائية لدارة التقويم (خرج مكبر العمليات OP2) يمكن حسابها باستخدام نظرية التتضد [16] أي أن الإشارة
 V_{o2} عبارة عن مجموع إشارتين إشارة قادمة من خرج مكبر العمليات OP1 وإشارة من المنبع V_{in}

$$V_{o2} = S_1 + S_2$$

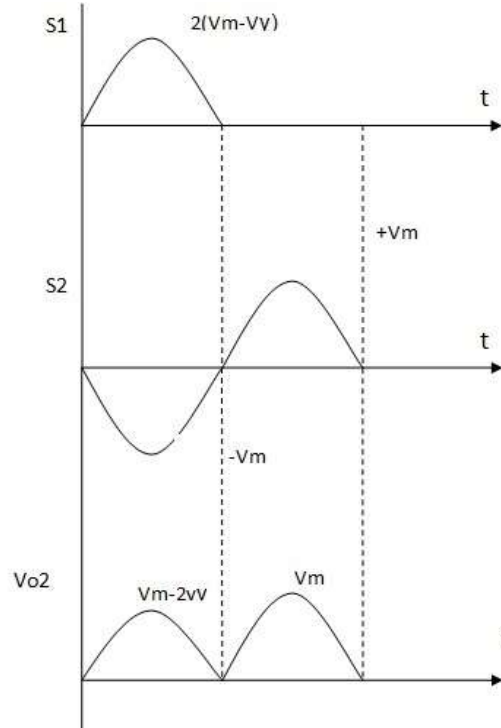
$$S_1 = - \frac{R_5}{R_4} V_{o1} \text{ و في حال } R_5=2.R_4$$

$$S_1 = - 2 V_{o1} = -2 (V_m - V_Y)$$

$$S_2 = - \frac{R_5}{R_3} V_{in} \text{ و في حال } R_5=R_3$$

$$S_2 = -V_{in} = - V_m$$

ويكون مجموع الإشارتين عبارة عن أنصاف نبضات موجبة أي دائرة تقويم موجة كاملة كما هو موضح في الشكل (17) .



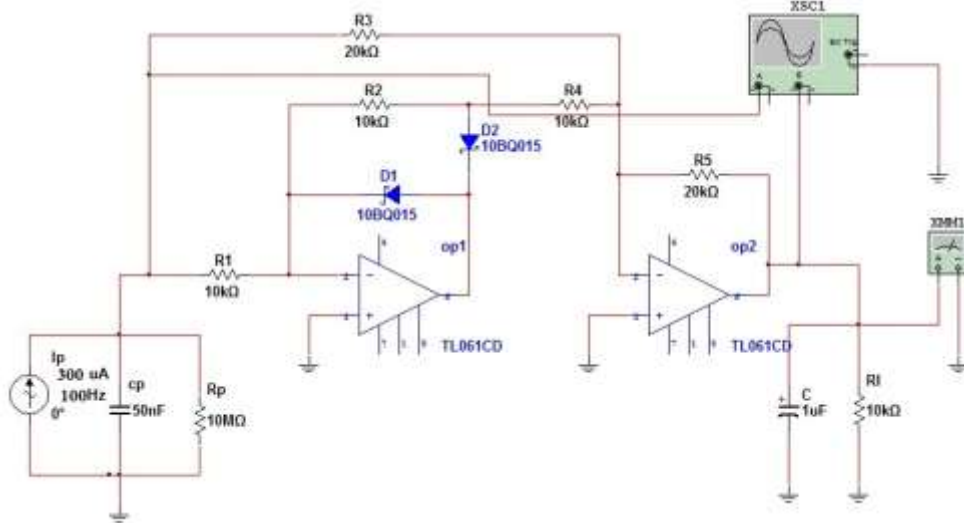
الشكل (17) المخططات الزمنية لخرج دائرة التقويم .

حيث نلاحظ أن مطال النبضة الموجبة الأولى $V_m - 2V_\gamma$ أما النبضة الموجبة الثانية مطالها V_m . القيمة المتوسطة لجهد الخرج المقوم تعطى بالعلاقة :

$$V_{out(dc)} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{out}(t) \cdot dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_{out}(t) \cdot dt = \frac{2}{\pi} (V_m - V_\gamma) \quad (3)$$

النتائج والمناقشة:

تم محاكاة الدارة المبينة في الشكل (18) باستخدام برنامج MULTISIM و باستخدام عناصر حقيقية (يوجد في البرنامج عناصر افتراضية عامة و عناصر حقيقية تعطي دقة أكبر في النتائج) .



الشكل (18) دارة المحاكات لدارة التقويم المقترحة .

$$R_1=R_2=R_4 = 10 \text{ K}\Omega \pm 5\%$$

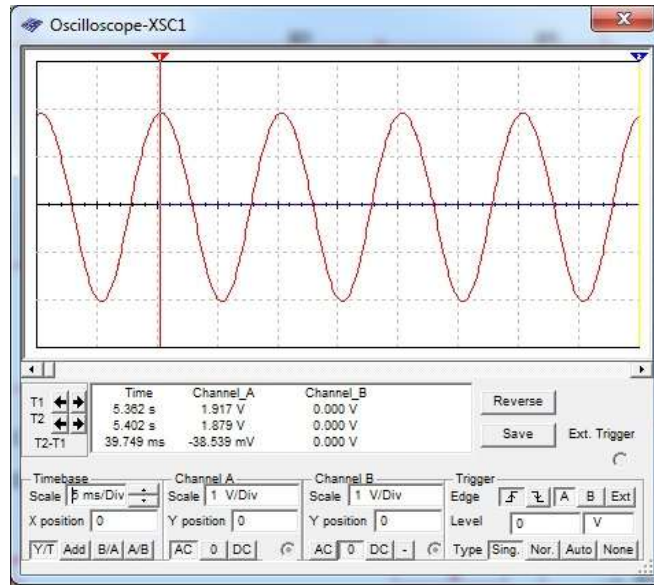
$$R_3=R_5 = 20 \text{ K}\Omega \pm 5\%$$

$$D_1=D_2=10\text{BQ040}$$

$$OP_1=OP_2 = \text{TL061CD}$$

(مكبر عمليات ذو استهلاك منخفض للطاقة مصنع بتقنية JFET [17]).

تم استخدام منبع تيار جيبى $i_p=300\mu\text{A}$ وتردد $F=100\text{Hz}$ وزاوية طور ابتدائي 0° ومكثف $C_p=50\text{nF}$ ومقاومة $R_p=10\text{M}\Omega$ وبمطال $V_m=1.914\text{V}$ لمكافئة الإشارة التي يقدمها المنبع البيزوكهربيائي والمبينة في الشكل (19).

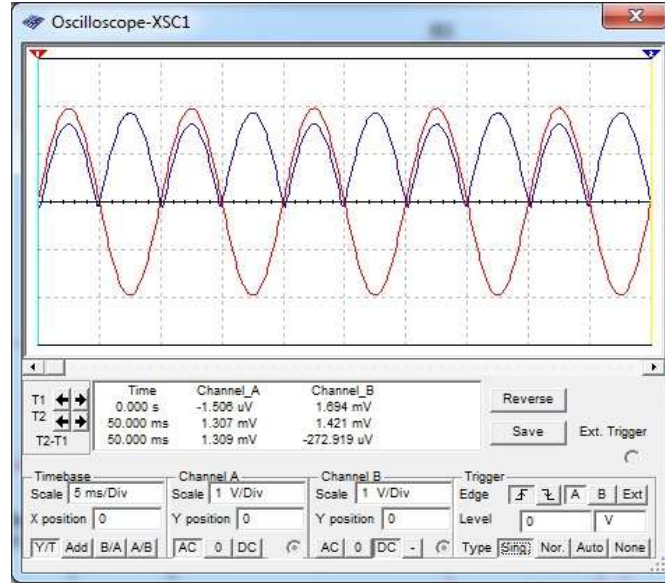


الشكل (19) الإشارة من المنبع البيزوكهربيائي.

راسم إشارة للإظهار شكل إشارة الخرج (القناة B) بالمقارنة مع إشارة الدخل (القناة A)، مقياس جهد لقياس القيمة المتوسطة لجهد الخرج بعد تعديل المقاومة الداخلية للمقياس $R_m=15\text{M}\Omega$ بديل عن القيمة الافتراضية $R_m=1\text{G}\Omega$ ليعطي قيم عملية حقيقية وليست مثالية.

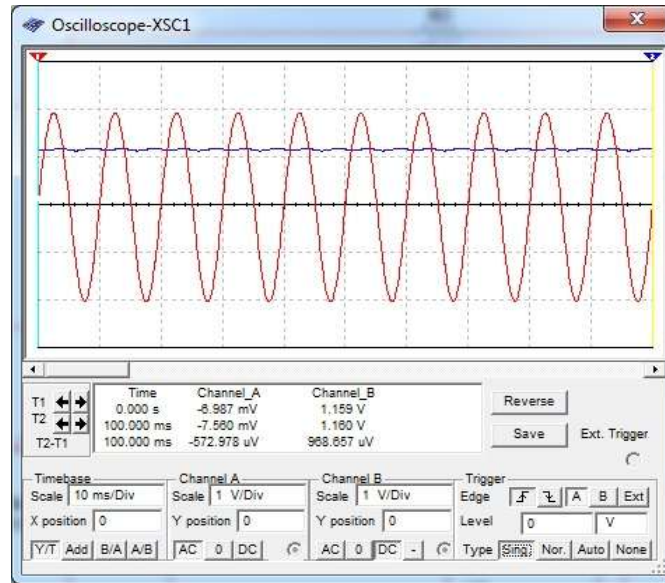
تم وصل مقاومة حمل $R_L=10\text{K}\Omega$ عند تنفيذ المحاكات

القيمة المتوسطة لجهد الخرج المقوم $V_{OUT(DC)}= 1.048 \text{ V}$ (مقياس الجهد) وهذه القيمة متوافقة تماما مع العلاقة (3) وشكل إشارة الخرج مقارنة مع إشارة الدخل مبينة في الشكل (20) عن طريق الراسم .



الشكل (20) الفرق بين إشارة الخرج المقومة و الدخل عند وجود RL .

عند وصل مكثف تتعيم على التوازي مع مقاومة الحمل بقيمة $C=500\mu\text{F}$ تصبح القيمة المتوسطة لجهد الخرج المقوم $V_{\text{OUT(DC)}}=1.2\text{V}$ (مقياس الجهد) وشكل إشارة الخرج مقارنة مع إشارة الدخل مبينة في الشكل (21) عن طريق الراسم .



الشكل (21) الفرق بين إشارة الخرج المقوم والدخل عند وجود RL و C .

نقوم بحساب المردود لمعرفة كفاءة الدارة في تقويم الإشارة من المنبع البيزوكهربيائي مع وجود مكثف التتعيم .

$$\eta = \frac{P_{\text{OUT(DC)}}}{P_{\text{in (AC)}}} \cdot 100 \quad (4)$$

$$P_{\text{OUT(DC)}} = V_{\text{OUT(DC)}} \cdot I_{\text{OUT(DC)}} = \frac{V^2_{\text{OUT(DC)}}}{R_L}$$

$$P_{\text{OUT(DC)}} = \frac{(1.2)^2}{10} = 0.144 \text{ mW}$$

$$P_{in(AC)} = V_{in(rms)} \cdot I_{in(rms)}$$

$$V_{in(rms)} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = \frac{1.914}{\sqrt{2}} = 1.353 \text{ V}$$

$$I_{in(rms)} = \frac{V_{in(rms)}}{10} + \frac{V_{in(rms)}}{20} = 0.2029 \text{ mA}$$

$$P_{in(AC)} = 0.2745 \text{ mW}$$

بالتعويض بالعلاقة (4) نجد أن $\eta = 52.45 \%$

الاستنتاجات والتوصيات:

تبين من نتائج الدراسة النظرية والمحاكات للدائرة المقترحة لتقويم إشارة من منبع بيزوكهربيائي أن هذه الدارة قادرة على الاستفادة من 52.45% من طاقة المنبع بجهد أدنى بقيمة 400 mV للإشارة الدخل، وهي مناسبة لتطبيقات حصاد الطاقة المنخفضة وتغذية أنظمة مستقلة تعمل على طاقة الوسط المحيط فقط .

References:

- [1] Minghui Yao, Pengfei Liu, Hongbo Wang. *Nonlinear Dynamics and Power Generation on a New Bistable Piezoelectric-Electromagnetic Energy Harvester*. Hindawi, Volume 2020, Article ID 5681703, 29.
- [2] Manjuan Huang, Cheng Hou, Yunfei Li, Huicong Liu, Fengxia Wang, Tao Chen, Zhan Yang, Gang Tang, Lining Sun. *A Low-Frequency MEMS Piezoelectric Energy Harvesting System Based on Frequency Up-Conversion Mechanism*. Micromachines, 2019.
- [3] Weiqi Qian, Weiyong Yang, Yan Zhang, Chris R. Bowen, Ya Yang. *Piezoelectric Materials for Controlling Electro-Chemical Processes*, Nano-Micro Lett, 2020.
- [4] Jianfeng Hong, Fu Chen, Ming He, Sheng Wang, Wenxiang Chen, Mingjie Guan. *Study of a Low-Power-Consumption Piezoelectric Energy Harvesting Circuit Based on Synchronized Switching Technology*. Energies, 2019.
- [5] Taeho Oh, Syed K. Islam, Mohamad Mahfouz, Gary ToA. *Low-Power CMOS Piezoelectric Transducer Based Energy Harvesting Circuit for Wearable Sensors for Medical Applications*, jlpea. 2017.
- [6] Raghavendran Srinivasan, Umapathy Mangalanathan, Uma Gandhi, Lakshmi Ravikularaman Karlmarx, *Bridgeless active rectifier for piezoelectric energy harvesting*, IET, 2019.
- [7] Sijun Du, Gehan A, Ashwin A. *A Cold-Startup SSHI Rectifier for Piezoelectric Energy Harvesters with Increased Open-circuit Voltage*. Department of Engineering, University of Cambridge, UK, 2018.
- [8] Huakang Xia, Yinshui Xia, Yidie Ye, Ge Shi, Xiudeng Wang, Zhidong Chen. *A self-powered PSSHI and SECE hybrid rectifier for piezoelectric energy harvesting*. IEICE Electronics Express, Vol.17, 2020.
- [9] M. gomez-alvarez, I. mejiab, V. cabrera, C. avila-avendano, R. garcía, A. diaz-cano, Y. leon-nataret, M. quevedo-lopez, L. reséndiz. *application of zno schottky diodes in rectifier circuits for implementation in energy harvesting*, digest journal of nanomaterials and biostructures, 2019, 153-159.
- [10] Xiaofan WANG, Jiliang MO, Huajiang OUYANG, Zaiyu XIANG, Wei CHEN, Zhongrong ZHOU. *Simultaneous energy harvesting and tribological property improvement*, 2020.
- [11] Haris Rosdianto. *Zener diode vs rectifier diode: The comparison of Gaussian probability distribution charts from full-wave rectifier circuits*, Journal of Physics, 2019.

- [12] K estutis Ikamas , Ignas Nevinskas , Ar unas Krotkus ,Alvydas Lisauskas. *Silicon Field Effect Transistor as the Nonlinear Detector for Terahertz Autocorellators*. Sensors ,2018.
- [13] JUNJIE AN, SHENGDONG HU. *Heterojunction Diode Shielded SiC Split-Gate Trench MOSFET With Optimized Reverse Recovery Characteristic and Low Switching Loss*.IEEE Access,2019.
- [14] Chiu Choi. *An Introductory Laboratory Course for Electrical Engineering Majors*,ASEE,2017.
- [15] Emad Samadaei , Mina Iranian , Mohammad Rezanejad , Radu Godina ,Edris Pouresmaeil. *Single-Phase Active Power Harmonics Filter by Op-Amp Circuits and Power Electronics Devices*,sustaibility,2118.
- [16] Jeong Ryeol Choi. *Superposition states for quantum nanoelectronic circuits and their nonclassical properties*,Int Nano,2017.
- [17] Zahid Abbas, Arshad Hussain. *Design of Single-Stage and Multi-Stage Op-Amp in Nanometer CMOS*,MDSRC,2019.