

تصميم وبناء معدّل نبضي عالي الاستطاعة اعتماداً على نمط جديد لمولد ماركس باستخدام ترانزستورات الحالة الثابتة ذات الاستطاعة العالية

د. غدير ماضي *

م. تيسير العيسى **

(تاريخ الإيداع 27/ 6/ 2021 . قبل للنشر في 29/ 8/ 2021)

□ ملخص □

تحتاج الأنظمة الرادارية التي تعتمد في عملها على الصمامات المكروية إلى وحدة تغذية خاصة تُسمى بالمعدّل النبضي الذي يقوم بتوليد نبضات جهد عالي باستطاعة مرتفعة، ويُعد مولد ماركس Marx Generator أحد الأنواع الأكثر شهرة من بين هذه المعدّلات كمصدر لتوليد الجهود النبضية عالية الاستطاعة والذي يعتمد في تصميمه القديم على القواطع الغازية التقليدية Spark Gape.

مع التطور التكنولوجي لترانزستورات الاستطاعة العالية ظهرت فكرة استخدامها في مولد ماركس كبديل للقواطع الغازية، وبالاعتماد على مبدأ مولد ماركس هذا سوف نقوم ببناء جديد للمعدّل النبضي باستخدام ترانزستورات الاستطاعة العالية كقواطع بدلاً من القواطع الغازية، حيث سنناقش مبدأ العمل لهذا المعدّل بالإضافة إلى دراسة شكل نبضة جهد الخرج وعرضها وزمن الصعود والهبوط لها مع دراسة كيفية تحقيق توافق الممانعات بين هذا المعدّل والحمل المطبّق عليه جهد الخرج لما له من أهمية كبيرة وخاصةً عند الحديث عن جهود عالية وبتردد تكراري عالي لتكون مناسبة لاستخدامها في التطبيقات الرادارية الحديثة التي تتطلب شكل نبضة جهد جيد بعرض نبضة قابل للتغيير مع زمن صعود وهبوط سريع دون حدوث قفزات جهد عالية أو تشوّه في شكل نبضة الخرج.

تم التحقق من صحة هذا البناء الجديد بواسطة النمذجة الحاسوبية باستخدام برنامج Pspice ومن ثم تم تنفيذ هذا النموذج ومقارنة النتائج العملية بنتائج النمذجة التي تحقق الغرض المطلوب من توليد نبضات الجهد العالي في تحسين مواصفات عمل الرادارات الحديثة.

الكلمات المفتاحية: الاستطاعة النبضية، قواطع الحالة الثابتة، الصمامات المكروية، مولد ماركس، الكترنيات الاستطاعة.

* أستاذ مساعد -قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين-اللاذقية-سورية.

**طالب دكتوراه -قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين-اللاذقية-سورية.

Design and implementation High-Power Pulsed Modulator Depending on New Type of Marx Generator Using High-Power Solid-State Transistor

Dr. GhadirMadi *

TayserAlissa **

(Received 27 / 6/ 2021 . Accepted 29 / 8 / 2021)

□ ABSTRACT □

Radar systems which depend on microwave tubes, need special power supply called pulse modulator which produce high voltage high power pulses. Marx generator considers as one of the most famous of these modulators to produce high power voltage pulses which depend in old design on spark gape switches.

In developing of high power transistors technology, new idea appears to use these transistors in Marx generator instead of spark gape switches, depending on Marx generator principle we will do new structure of pulse modulator by using high power transistors as switches instead of spark gapes. Where we will discuss work principle of this modulator, also we will study the shape of output voltage pulse and rise/fall time, and studding matching impedances between this modulator and load go rots important specially when we talk about high voltages with high repetition frequency to be suitable for using in new Radar applications which need good voltage pulse shape with changeable pulse width and fast rise/fall time without overshoot voltage or damage in output pulse shape.

Proper performance of the proposed structure is evaluated through simulations using Pspice program and experiments and comparing real results with simulation results. It verified that the proposed design could achieve the goal of producing high voltage pulses to improve Radar work specifications.

Index Terms—Pulsed Power, Solid State Switch, Microwave Tubes, Marx generator, Power Electronics.

* Associate Professor, Department of Communication and Electronics, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

** PhD. Student, Department of Communication and Electronics, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

المقدمة:

مولد ماركس MarxGenerator هو عبارة عن مولد للجهد العالي اللحظي، يعمل على مبدأ تهييج فرق جهد لحظي مرتفع باستخدام فرق جهد صغير. سُمي على اسم مخترعه إبيرون أوتو ماركس الذي طوّر هذا النوع من المولدات عام 1923 للمرة الأولى. يُستعمل هذا المولد لمحاكاة ظواهر ينتج عنها فرق جهد عالٍ مثل ظاهرة البرق وله استخدامات متعددة خاصة في مجال جهد الكهرياء العالي وأخيراً تم استخدامه في المعدّلات النبضية للمرسلات الرادارية [1].

مع بداية التطور التكنولوجي بدأ استخدام ترانزستورات الاستطاعة العالية في هذا النوع من مولدات الجهد العالي كبديل للقواطع الغازية، ومن هنا بدأ فكرة استخدام مبدأ مولد ماركس في بناء المعدّلات النبضية عالية الاستطاعة كونه أصبح بالإمكان توليد نبضات ذات مواصفات جيدة ومناسبة لعمل المرسلات الرادارية التي تعمل على الصمامات المكروية حيث قمنا في أبحاث سابقة ببناء كتلة القواطع باستخدام ترانزستورات الاستطاعة العالية وتوصلنا إلى نتائج جيدة تحقق الهدف الرئيسي لعملائنا في توليد نبضات جهد عالي وباستطاعة عالية دون حدوث تشوهات في شكل النبضة [2]، حيث استخدمنا في عملنا السابق المحول النبضي عالي الاستطاعة لتحقيق الوصول إلى النتيجة المطلوبة، والآن سوف نقوم في بحثنا هذا ببناء المعدّل النبضي دون استخدام المحول النبضي والاعتماد على تشكيلة جديدة كلياً لترانزستورات الحالة الثابتة تحقق مبدأ مولد ماركس للحصول استطاعات عالية مطلوبة في بعض التطبيقات وخاصة الصناعية منها كمعالجة المعادن أو توليد البلازما الحرارية في عملية معالجة السطوح المعدنية، بالإضافة إلى استخدامها في بعض مرسلات الرادارات الحديثة.

سنشرح في هذا البحث المبدأ الذي اعتمدنا عليه في بناء المعدّل النبضي وطريقة التصميم وحساب بارامترات العناصر المكونة للتصميم مع دراسة شكل النبضة ومواصفاتها (زمن الصعود والهبوط، عرض النبضة، التردد التكراري) بالإضافة إلى دراسة العناصر المؤثرة عليها. وكذلك سوف نقوم بدراسة مسألة توافق الممانعات بين هذا المعدّل والحمل المطبق عليه الجهد لتحقيق أعلى نسبة مردود يؤمن نقل الاستطاعة إلى الخرج دون حدوث فقد كبير أو ارتداد لها تؤدي إلى تلف النظام.

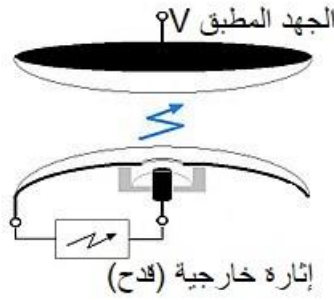
أهداف البحث وأهميته:

يهدف عملنا هذا إلى بناء تصميم جديد لمولد ماركس لاستخدامه كمعدل نبضي عالي الجهد يتجنب استخدام المحولات النبضية عالية الاستطاعة للتخلص من العناصر الطفيلية وأثرها على شكل النبضة ومواصفاتها ليكون صالحاً للعمل على الصمامات المكروية الموجودة في المرسلات الرادارية بمواصفات عالية بهدف تحقيق رفع جاهزيتها عن طريق استبدالها بتكنولوجيا جديدة محلية وبكلفة منخفضة مقارنة مع الكلفة الحالية المرتفعة هذا إن توفرت قطع التبديل لكونها تعتمد على تقنيات قديمة لم تعد تُنتج الآن. وبالإضافة إلى ذلك نكون قد وطنًا هذه التكنولوجيا محلياً حيث أنها غير موجودة حتى الآن على الرغم من أهميتها الكبيرة في العديد من التطبيقات الصناعية والعسكرية.

طرائق البحث ومواده:

1. مبدأ عمل مولد ماركس

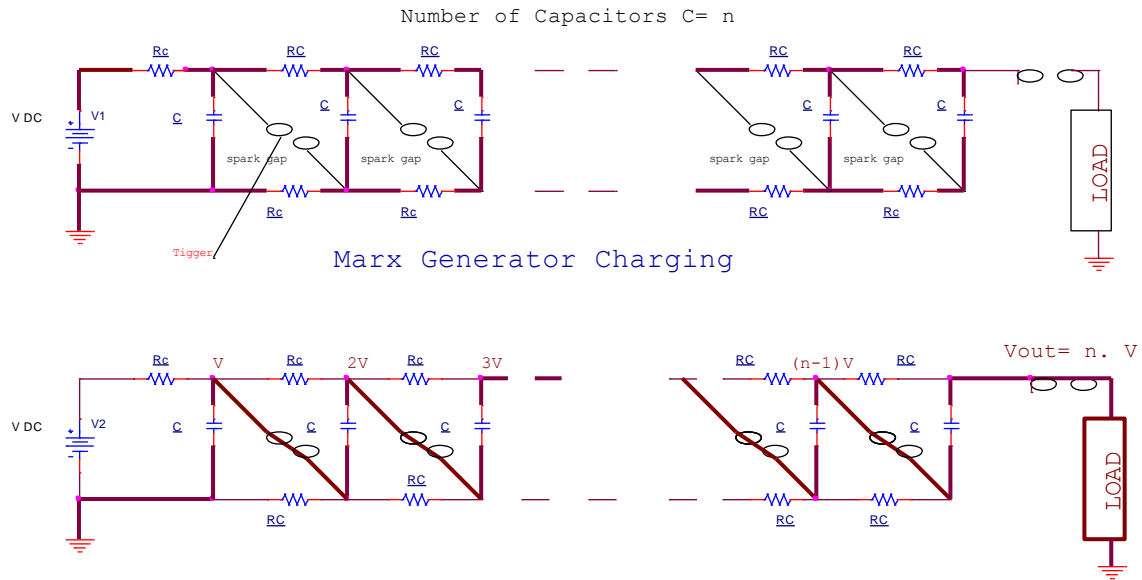
تقوم الفكرة الرئيسية في عمل مولد ماركس على شحن عدد من المكثفات الموصلة على التفرع باستخدام تيار ثابت (DC) ثم جعلها متصلة مع بعضها البعض تسلسلياً عن طريق قوادح غازية. في البداية يتم شحن المكثفات بفرق الجهد V حيث تكون الفجوة الشرارية غير موصلة بعد ولكنها بحاجة إلى قليل من فرق الجهد لتوصل (يحدث ذلك عن طريق إثارة خارجية) كما هو واضح في الشكل (1) الذي يبين بنية الفجوة الشرارية.



الشكل 1: بنية الفجوة الشرارية

يُوضح الشكل (2) عملية شحن المكثفات تفرعياً وتفرغها تسلسلياً، فعند تجاوز قيمة الجهد V عن طريق الإثارة الخارجية فإن الفجوة الأولى توصل وبالتالي يكون المكثف الأول مربوط بالثاني على التسلسل ويكون حاصل فرق الجهد عليهما مضاعف $2V$ ، وهذا بدوره يؤدي إلى أن توصل الفجوة الشرارية الثانية وهكذا بشكل متسلسل مع بقية المكثفات، وبينما تحتاج عملية شحن المكثفات إلى ثوان أو دقائق، فإن عملية التفريغ والربط على التسلسل التي تولّد جهد عال تتم بسرعة فائقة (بضع ميكرو ثانية). نظرياً يكون الجهد في المحصلة $V_{out} = n.V$ ، حيث n : عدد المكثفات، V : جهد الشحن الرئيسي، V_{out} : جهد الخرج، لكن فعلياً فإنه عندما يتم التفريغ (وصل المكثفات على التسلسل) فإن محصلة الجهد تكون أقل من $n.V$ ، حيث تُفقد بعض الطاقة عند التفريغ عبر المقاومات الموجودة في الدارة R_c ، وبعد ذلك فإن الفجوة الشرارية تُعزل (تصبح غير موصلة) وتبدأ عملية الشحن من جديد بحيث تصبح المكثفات على التفرع من جديد [3].

يُعد مولد ماركس من المولدات المهمة لنبضات الجهد العالي لأن زمن صعود جهد النبضة فيه سريع جداً، على العكس زمن الهبوط بطيء جداً، وكون جهد الشحن المستمر منخفض وبالتالي نبتعد عن مشاكل تأمين وتخزين الجهود العالية، وحيث أنه يمكن تغيير جهد الخرج بتغيير عدد مراحل المولد إلا أن لقواطعه التقليدية العديد من السلبيات من بينها العمر القصير وتردد العمل المنخفض بسبب الزمن الطويل لهبوط النبضة، بالإضافة إلى عدم إمكانية تغيير عرض النبضة وذلك بحسب كل تصميم والمحدود بالتردد التكراري للنبضات وبالإضافة إلى ذلك عدم القدرة على التحكم بلحظة الإغلاق للفجوة مما ينتج عرض نبضة كبير نسبياً وغير مناسب لعمل الرادار.



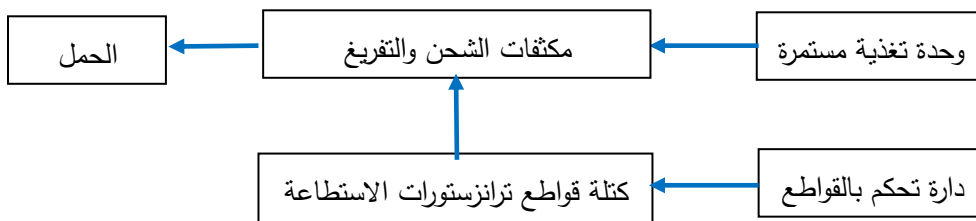
Marx Generator Discharging

الشكل 2: الشحن التفريغ والتفريغ التسلسلي لمولد ماركس

أدى التطور التكنولوجي لترانزستورات الحالة الثابتة ذات الاستطاعة العالية (IGBT، MOSFET) التي يمكن التحكم فيها بلحظة الإغلاق تماماً كما في لحظة الفتح إلى ظهور فكرة استخدام هذه الترانزستورات عوضاً عن هذه القواطع الغازية وبتركيبة جديدة تناسب الهدف المرجو بالحصول على جهد نبضي عالي بعرض نبضة صغير وزمن صعود وهبوط سريع وبتردد تكراري مناسب لعمل الرادارات [4].

2. المخطط العام لمولد ماركس باستخدام ترانزستورات الاستطاعة

يرتكز محور عملنا في هذا البحث على عمل كتلة قواطع الحالة الثابتة عالية الاستطاعة التي تعمل عوضاً عن القواطع الغازية، وطريقة الشحن والتفريغ للمكثفات، لذلك فإن بقية أجزاء المعدل النبضي كوحدة تغذية جهد الدخولدارة تسخين الفتيل للصمام المكروي ودارة التحكم والحساسات جميعها غير مشروحة في هذا البحث ويعود للقارئ دراسة المقالات والمراجع المتعلقة بها [5]، حيث يُوضح الشكل (3) المخطط الصندوقي العام لمولد ماركس المُعتمد على ترانزستورات الحالة الثابتة عالية الاستطاعة.



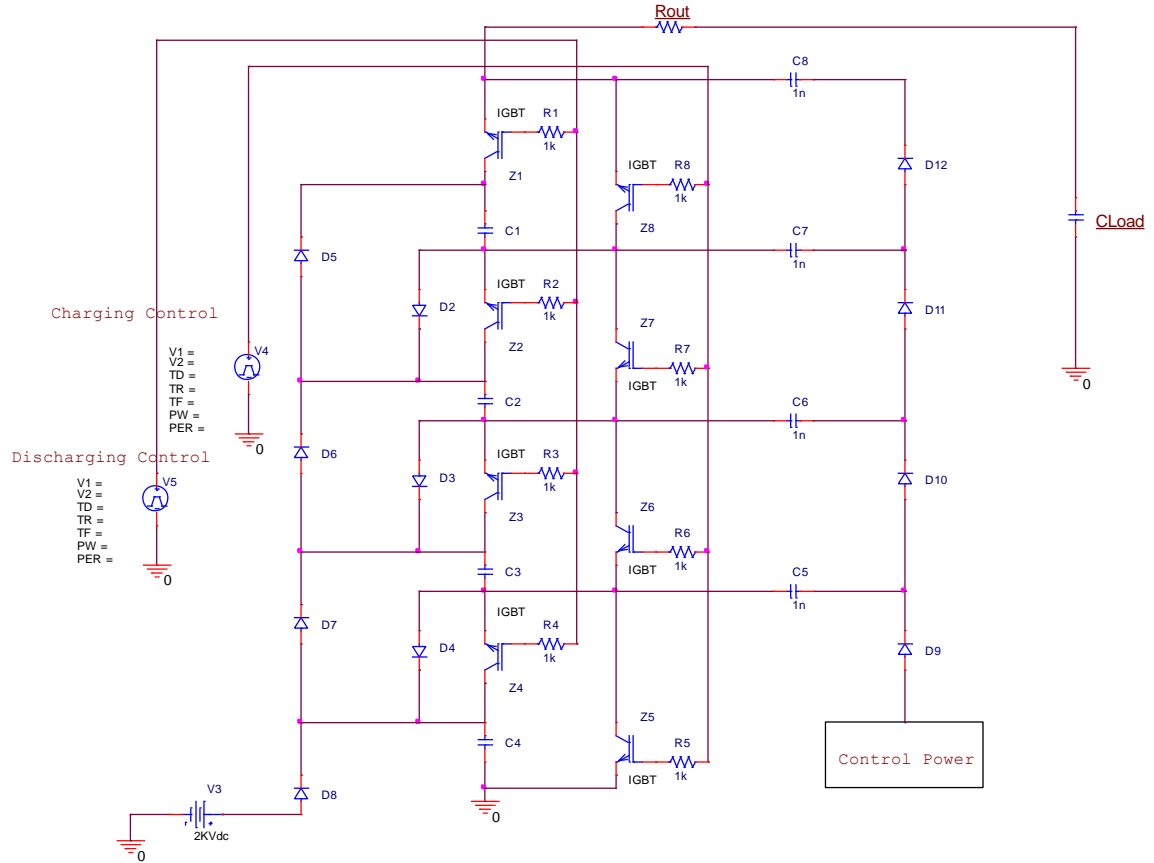
الشكل 3: المخطط الصندوقي لمولد ماركس المقترح

3. بنية المعدّل النبضي المُقترحة المبني على أساس مبدأ مولد ماركس

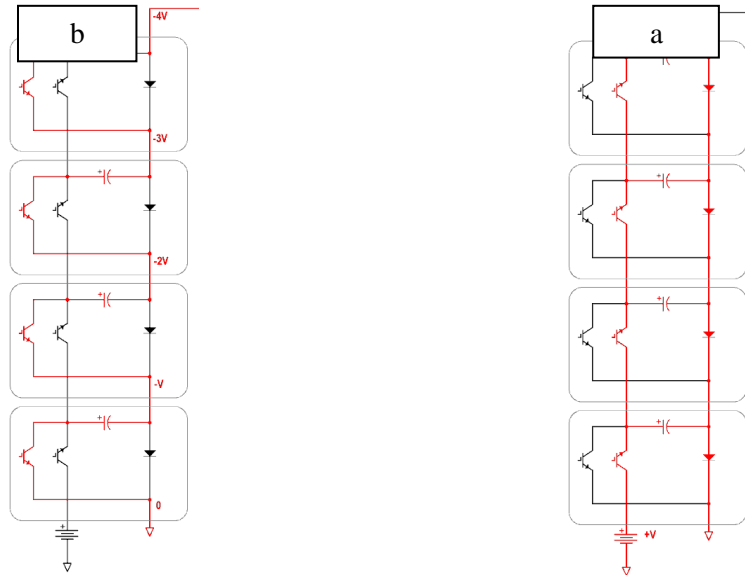
يبين الشكل (4) المخطط الكهربائي لكتلة قواطع الحالة الثابتة عالية الاستطاعة بتشكيلة جديدة تحقق مبدأ مولد ماركس، حيث يتألف التصميم الأولي من أربع مراحل متطابقة تماماً مع بعضها تعتمد في مبدأ عملها على مجموعتين من ترانزستورات الحالة الثابتة عالية الاستطاعة، تُسمى المجموعة الأولى بترانزستورات الشحن (Z_5, Z_6, Z_7, Z_8) والمجموعة الثانية بترانزستورات التفريغ (Z_1, Z_2, Z_3, Z_4)، عند عمل ترانزستورات الشحن (قواطع الشحن مغلقة) يمر تيار الشحن المستمر من وحدة التغذية عبر ديودات (D_5, D_6, D_7, D_8) إلى كل مرحلة من المكثفات المتوضعة على التفرع باستخدام مرجع أرضي واحد هو أرضي وحدة التغذية وبالتالي يتم شحن هذه المكثفات دفعة واحدة وبزمن يتعلق بقيمة هذه المكثفات كما هو مبين في الشكل (5.a). يمكن أن تتم عملية شحن مكثفات مولد ماركس في كل مرحلة على التفرع عن طريق ملف شحن (طريقة شحن inductive) وذلك لأن المردود باستخدام طريقة الشحن هذه عالي وبالتالي إمكانية الحصول على تردد تكراري عالي [6-7].

عند عمل ترانزستورات التفريغ (قواطع التفريغ مغلقة) تكون قواطع الشحن مفتوحة ويتم عملة التفريغ للمكثفات بشكل تسلسلي للحصول على جهد خرج يساوي جهد الشحن مضروباً بعدد مراحل مولد ماركس، كما هو مبين في الشكل (5.b).

في النهاية عند إغلاق قواطع التفريغ تكون قواطع الشحن مفتوحة حيث يولد تفريغ المكثفات الشاردية زمن هبوط سريع في الوقت الذي تكون فيها المكثفات في حالة شحن وبهذا نحصل على نبضات جهد عالي بتردد تكراري عالي وبزمن صعود وهبوط سريع للنبضة، ويمكن التحكم بمستوى جهد الخرج عن طريق تغيير جهد الدخل مباشرة، وتغيير عرض النبضة والتردد التكراري دون الحاجة إلى إجراء أي تغيير في بنية المعدّل، وبالتالي يمكن استخدام هذا التصميم في العديد من المرسلات الرادارات المختلفة فيما بينها بعرض النبضة أو التردد التكراري [8-9].



الشكل 4: المخطط الكهربائي لمولد ماركس بالاعتماد على قواطع الحالة الثابتة



الشكل 5: المخطط الكهربائي لعملية الشحن والتفريغ لمولد ماركس، (a) شحن تفرعي، (b) تفريغ تسلسلي

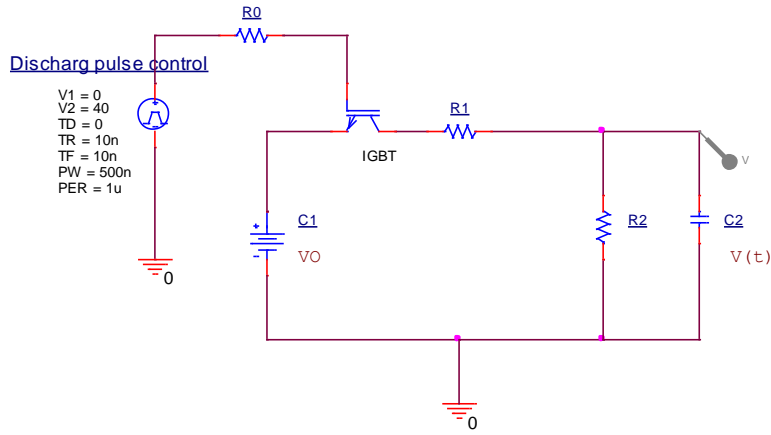
4. تحليل دائرة مولد ماركس وتحديد بارامتراتهما

4-1- تحليل مرحلة واحدة لمولد ماركس

يبين الشكل (6) مرحلة واحدة لمولد ماركس في حالة التفريغ، حيث يمكن كتابة علاقة جهد الخرج بجهد

الدخل بدلالة الممانعات كمقسّم جهد بسيط باستخدام العلاقة العامة [10]:

$$V_{out} = (V_{in}) \times \left(\frac{Z_{Load}}{Z_{in} + Z_{Load}} \right)$$



الشكل 6: المخطط الكهربائي لمرحلة واحدة لمولد ماركس

وبالتالي يمكن كتابة علاقة جهد الخرج بالدخل عن طريق تحويل لابلاس على الشكل التالي:

$$V(s) = \left(\frac{V_0}{s} \right) \times \left(\frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \right) (1)$$

حيث:

$$Z_1 = \left(\frac{1}{C_1(s)} \right) + R_1, \quad Z_2 = \left(\frac{R_2}{C_2(s)} \right) / \left(R_2 + \frac{1}{C_2(s)} \right)$$

وبتعويض هذه القيم في العلاقة (1) نحصل على:

$$V(s) = \left(\frac{V_0}{K} \right) \times \left(\frac{1}{s^2 + as + b} \right) (2)$$

حيث:

$$a = \left(\frac{1}{R_1 C_1} \right) + \left(\frac{1}{R_1 C_2} \right) + \left(\frac{1}{R_2 C_2} \right), \quad b = \left(\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \right), \quad K = R_1 C_2 (3)$$

ونحصل على التعبير الزمني لجهد الخرج من جداول تحويل لابلاس وبالتالي تكون علاقة جهد الخرج الزمنية

على الشكل التالي:

$$V(t) = \left(\frac{V_0}{K} \right) \times \left(\frac{1}{\alpha_2 - \alpha_1} \right) \times (e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}) (4)$$

حيث: α_1 و α_2 هي جذور المعادلة $s^2 + as + b = 0$ والتي تُعطى بالعلاقة:

$$\alpha_1, \alpha_2 = \frac{a}{2} \mp \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 - b} \quad (5)$$

4-2- تحديد قيم عناصر الدارة

يعتمد مردود مولد ماركس على قيم العناصر R_1, R_2, C_1, C_2 ، حيث يمكن قياس مكثفة الحمل الكلية C_2 ببساطة بشكل مباشر ويمكن حساب قيم المقامات بحل المعادلات (3) و(5) ليكون لدينا:

$$R_1 = \left(\frac{1}{2C_1}\right) \left[\left(\left(\frac{1}{\alpha_1}\right) + \left(\frac{1}{\alpha_2}\right) \right) - \sqrt{\left(\left(\frac{1}{\alpha_1}\right) + \left(\frac{1}{\alpha_2}\right) \right)^2 - \left(\frac{4(C_1+C_2)}{\alpha_1\alpha_2 C_2}\right)} \right] \quad (6)$$

$$R_2 = \left(\frac{1}{2(C_1+C_2)}\right) \left[\left(\left(\frac{1}{\alpha_1}\right) + \left(\frac{1}{\alpha_2}\right) \right) - \sqrt{\left(\left(\frac{1}{\alpha_1}\right) + \left(\frac{1}{\alpha_2}\right) \right)^2 - \left(\frac{4(C_1+C_2)}{\alpha_1\alpha_2 C_2}\right)} \right] \quad (7)$$

تحتوي المعادلتين السابقتين على الثوابت الزمنية $\frac{1}{\alpha_1}$ و $\frac{1}{\alpha_2}$ التي تعتمد على شكل النبضة حيث أنه لا توجد علاقة بسيطة بين هذين الثابتين الزمنيين وزمني الصعود والهبوط ويمكن حلها فقط عن طريق الطرق الرقمية الحاسوبية، ويُظهر الجدول التالي النتائج لبعض أشكال النبضة [11].

الجدول (1): العلاقة بين زمني الصعود والهبوط والثوابت الزمنية [11]

$\frac{1}{\alpha_2}$	$\frac{1}{\alpha_1}$	نسبة زمن الصعود إلى زمن الهبوط $\frac{T_r}{T_f}$
0.8	3.480	1.2/5
0.405	68.20	1.2/50
0.381	284	1.2/200
104	2877	250/2500

يمكن الحصول على علاقات تقريبية بين زمني الصعود والهبوط والثوابت الزمنية كون قيمة المقاومة R_2 كبيرة جداً مقارنة بالمقاومة R_1 وبالتالي يكون لدينا من المعادلة (3):

$$a = \left(\frac{2}{R_1 C_1}\right), \quad b = 0, \quad K = R_1 C_2$$

وبالتالي من المعادلة (5) يكون لدينا:

$$\alpha_1 = a, \quad \alpha_2 = 0$$

فتصبح معادلة جهد الخرج على الشكل التالي:

$$V(t) = -\left(\frac{V_0}{K}\right) \times \left(\frac{1}{\alpha_1}\right) \times (e^{-\alpha_1 t} - 1) \quad (8)$$

ويكون زمن الصعود للنبضة ثلاثة أضعاف الثابت الزمني للدائرة ويُعطى بالعلاقة [11]:

$$T_r = 3R_1 C_e \quad (9)$$

حيث تُعطى قيمة المكثفة المكافئة C_e بالعلاقة [11]:

$$C_e = \frac{(C_1 \times C_2)}{(C_1 + C_2)}$$

حيث $R_1 C_e$ الثابت الزمني للشحن بالميكروثانية.

وكذلك فإن زمن تفريغ 50% من قيمة الجهد (زمن الهبوط) يُعطى بالعلاقة:

$$T_f = 0.7(C_1 + C_2)(R_1 + R_2) \quad (10)$$

إذا أخذنا في تصميمنا هذا نسبة $20 = \frac{C_1}{C_2}$ يمكن حساب زمن الصعود والهبوط لكل مرحلة من المراحل باستخدام جداول الحساب الرقمية للمقاومات والتي يمكن الحصول عليها عملياً عن طريق المقاومات المتغيرة [11] كما في الجدول التالي:

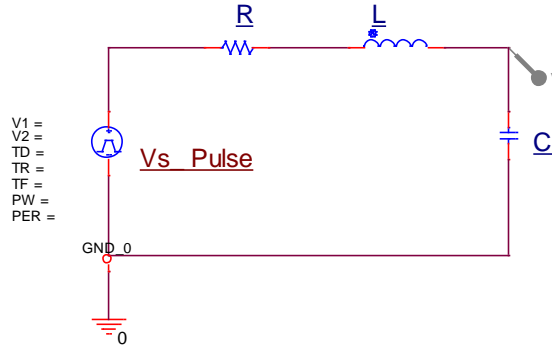
الجدول (2): البارامترات التصميمية لدارة مولد ماركس [11]

عدد مراحل مولد ماركس	R_1 (Ω)	R_2 (Ω)
1st	0.247	1.398
2nd	0.110	1.513
3rd	0.766	1.477
4th	0.060	1.428
5th	0.050	1.378
6th	0.043	1.330
7th	0.038	1.280
8th	0.035	1.240

5. توافق ممانعة خرج مولد ماركس مع ممانعة الحمل

الهدف الرئيسي من تحقيق توافق ممانعات بين مولد ماركس والحمل هو تحديد تيار خرج مولد ماركس وتأمين تيار تفريغ عالي في الحمل لحظة القدح للحصول على زمن صعود وهبوط سريع لجهد النبضة.

يمكن بناء دائرة توافق الممانعات بطرق مختلفة إما عن طريق ذاتية تسلسلية أو مكثفة تفرعية، أو خليط بين ذاتية تسلسلية ومكثفة تفرعية وهي الحالة المثالية كون وجود ذاتية تسلسلية فقط يؤدي إلى تحديد تيار مولد ماركس إلا أنها أيضاً تحدد تيار التفريغ في الحمل مما يؤدي إلى زمن صعود كبير لنبضة الخرج، ووجود مكثفة تفرعية فقط يؤدي إلى وجود تيارات شحن وتفريغ كبيرة مما يسبب تداخل كهرومغناطيسي (EMI) وإمكانية وجود تيارات عالية على ترانزستورات الاستطاعة [12].
يوضح الشكل (7) دائرة توافق ممانعات بسيطة مع ذاتية تحديد تيار L ، حيث R مقاومة لفات الذاتية.



الشكل 7: دائرة توافق ممانعات بسيطة مع ذاتية تحديد تيار

يُعطى جهد المكثفة والتيار المار بها بالعلاقتين التاليتين:

$$V_c(t) = V_s \left[1 - e^{-\alpha t} \left(\frac{\alpha}{w_d} \sin(w_d t) + \cos(w_d t) \right) \right] \quad (11)$$

$$I_c(t) = \frac{V_s \sin(w_d t) e^{-\alpha t}}{L w_d} \quad (12)$$

حيث:

$$\alpha = \frac{R}{2L}, \quad w_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad w_d = \sqrt{w_0^2 - \alpha^2}$$

5-1- نبضة الجهد الزائد

من المعادلة (11)، أول قمة لجهد المكثفة تتحقق في اللحظة الزمنية $t = \pi/w_d$ وتكون قيمتها:

$$V_{c,pk} = V_s \left(1 + e^{-\alpha \frac{\pi}{w_d}} \right) \quad (13)$$

يرتبط معامل جودة الدارة بعامل التخميد α على الشكل التالي:

$$Q_f = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{L}{R} \sqrt{\frac{1}{LC}} = \frac{w_0}{2\alpha} \quad (14)$$

من المعادلتين (13) و(14) نحصل على علاقة نسبة زيادة الجهد بعامل الجودة:

$$\text{Overshoot - Ratio} = \frac{V_{c,pk}}{V_s} = 1 + e^{-\frac{\pi}{\sqrt{4Q_f^2 - 1}}} \quad (15)$$

تُبين المعادلة (15) أنه بزيادة عامل الجودة ترتفع قيمة الجهد الزائد وهذا الجهد غير مرغوب به وبالتالي يجب أن تكون قيمة L صغيرة.

2-5- زمن الصعود

من أجل عامل جودة كبير يكون لدينا $w_d \approx w_0$ وبالتالي لدينا زمن الصعود $T_r = 2\pi/w_0 = 2\pi\sqrt{LC}$ وهنا أيضاً نلاحظ أنه من المفيد أن تكون قيمة L صغيرة للحصول على زمن صعود سريع [13].

3-5- أثر تحديد التيار

اللحظة الأولى التي يكون فيها تيار التفريغ بالحمل أعظمي هي اللحظة التي ينعدم فيها تيار شحن المكثفة C وبالتالي بجعل المعادلة (12) مساوية للصفر يكون لدينا [14]:

$$t_{i=max} = \frac{\arctan(w_d/\alpha)}{w_d} = \frac{\left(\arctan\left(\sqrt{4Q_f^2 - 1}\right)\right)}{w_d} \quad (16)$$

ويكون التيار الأعظمي:

$$I_{max} = \frac{V_s \sin(\arctan(w_d/\alpha)) e^{\frac{\alpha}{w_d} \arctan(w_d/\alpha)}}{Lw_d} \quad (17)$$

ومن أجل عامل جودة كبير للدائرة يكون لدينا $w_d \approx w_0$ و $\arctan\left(\sqrt{4Q_f^2 - 1}\right) \approx \frac{\pi}{2}$ وبالتالي:

$$t_{i=max} \approx \frac{\pi}{2w_0} = \frac{\pi}{2} \sqrt{LC} \quad (18)$$

والتيار الأعظمي في هذه الحالة:

$$I_{max} = \frac{V_s}{Lw_0} = \frac{V_s}{\sqrt{L/C}} \quad (19)$$

لتقليل فقد الطاقة على القواطع (ترانزستورات الاستطاعة) يجب أن يكون زمن الوصول إلى التيار الأعظمي أكبر من زمن الصعود، أي: $t_{i=max} > t_r \Leftrightarrow \frac{\pi}{2}\sqrt{LC} > t_r$ وبالتالي يكون لدينا شرط قيمة الذاتية:

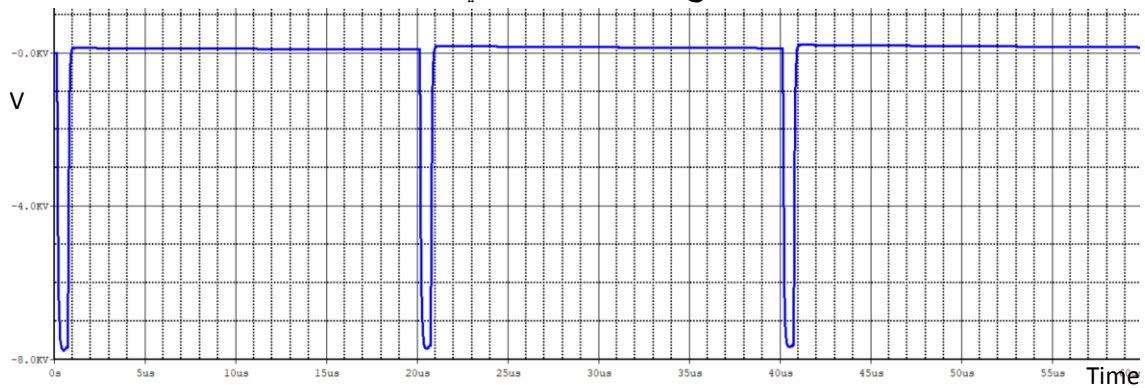
$$L > \frac{4t_r^2}{\pi^2 C} \quad (20)$$

النتائج والمناقشة:

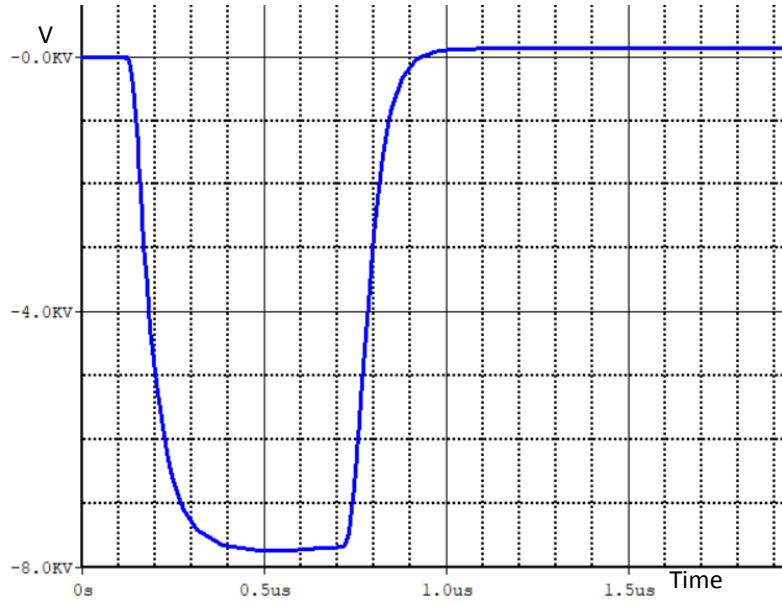
1- نمذجة الدارة المقترحة والتحقق من صلاحية البنية

تم نمذجة دارة المعدل النبضي المبني على أساس مولد ماركس باستخدام برنامج نمذجة الدارات الكهربائية ORCAD 17.4-Pspice للتحقق من أداء البنية ضمن السيناريو الحقيقي وباعتبار معالجة النظام غير خطية (الحالة الحقيقية).

يُظهر الشكل (8) نبضات جهد خرج المعدل بمطال 8KV وبتردد تكراري عالي 50KHz، حيث يمكن تغيير التردد التكراري للنبضات بتغيير تردد نبضات التحكم، وكما يُظهر الشكل (9) نبضة جهد واحدة بعرض 0.5µs التي يمكن تغييرها أيضاً عن طريق نبضات التحكم. ونلاحظ من خلال هذا الشكل سرعة زمن الصعود والهبوط للنبضة (أقل من 100ns) مع عدم وجود أي تشوه في شكل النبضة، حيث أن هذه المواصفات مناسبة لعمل هذا المعدل على صمامات الأمواج المكروية الموجودة في المرسلات الرادارية.



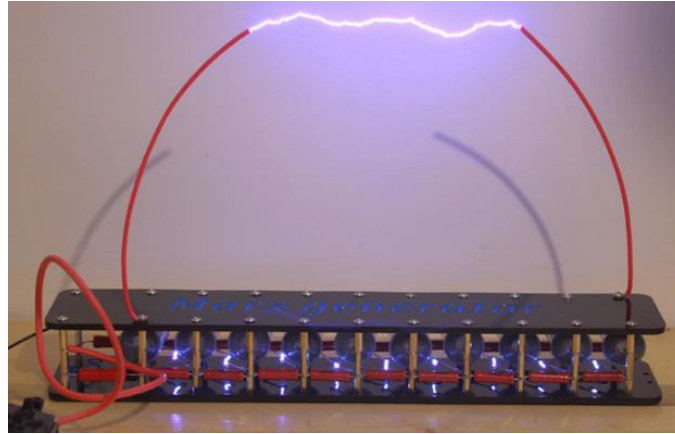
الشكل 8: نبضات جهد الخرج لمولد ماركس بتردد تكراري عالي



الشكل 9: نبضة واحدة لجهد خرج مولد ماركس بزمن صعود وهبوط سريع

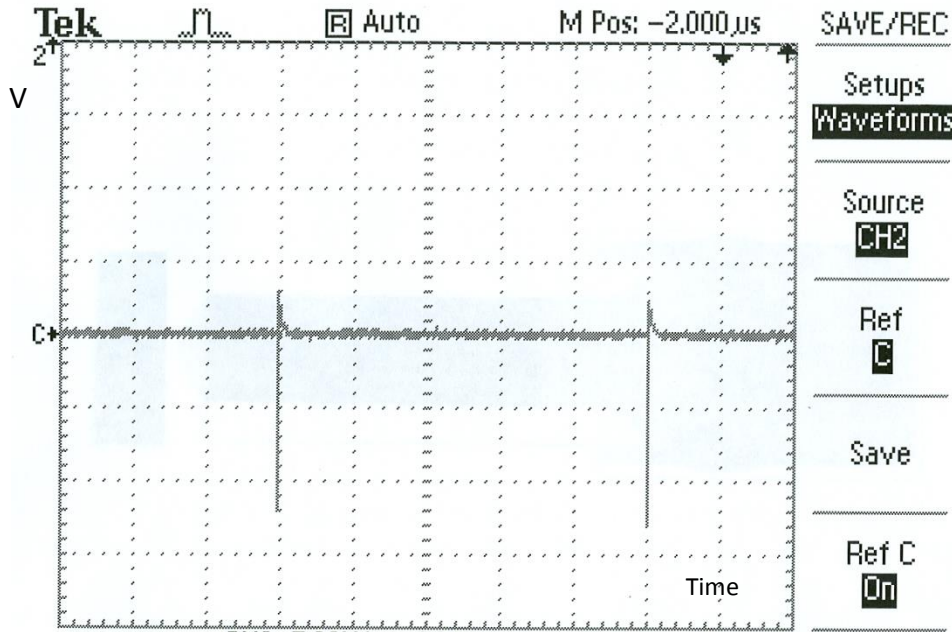
2- النتائج التجريبية

عند بدأ الاختبار قمنا بشحن النظام بجهد مستمر إلى 1KV بشكل تدريجي، وعند وصول جهد الخرج النبضي إلى قيمة 8 KV ظهرت شرارة الجهد العالي على الخرج مشكّلة تأين هوائي إلكتروني بلازمي كما هو واضح في الشكل (10). إن هذه الشرارة تماثل الحزمة الإلكترونية المتشكلة في الصمامات المكروية والتي تعتبر أساس لتوليد أو تضخيم الأمواج المكروية.



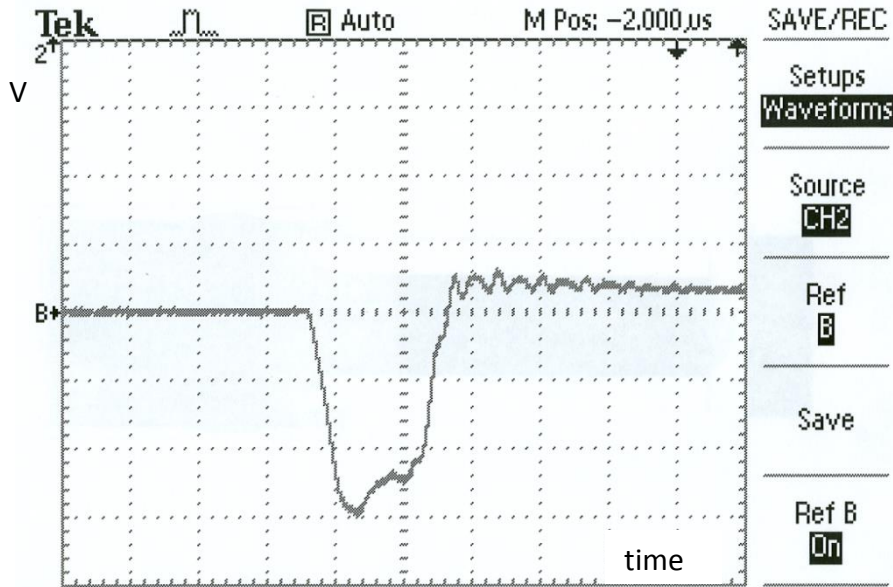
الشكل 10: المعدّل النبضي المبني على أساس مولد ماركس

تم قياس نبضات الخرج باستخدام مسبار جهد عالي لنحصل على الشكل (11) الذي يُظهر سلسلة نبضات جهد الخرج العالي المطبقة على الحمل (الصمام المكروي) بمطال 8KHz وبتردد تكراري 1kHz.



الشكل 11: نبضات جهد خرج المقاسة لمولد ماركس بتكرار عالي

يُظهر الشكل (12) نبضة جهد عالي واحدة على خرج المعدل بعرض $2\mu s$ ، وبما أننا نعلم بأن الحمل هو صمام مكروي (مغنترون مثلاً) والذي يعمل كديود زنر بجهد عالي، لذلك عند وصول الجهد العالي لقيمة جهد القطع للصمام سيغلق الصمام المكروي وينعدم التيار المُستجر من المعدل النبضي، لذلك سيتم تفريغ الدارة من خلال العناصر الشاردية الموجودة فيها وسيكون زمن هبوط النبضة سريع.



الشكل 12: نبضة واحدة مقاسة لجهد خرج مولد ماركس بزمن صعود وهبوط سريع

الاستنتاجات والتوصيات:

نستنتج من خلال الدراسة السابقة أنه باستخدام قواطع الحالة الثابتة عالية الاستطاعة يمكن بناء معدّل نبضي يعتمد على مبدأ مولد ماركس نستطيع من خلاله توليد نبضات جهد عالي مناسبة لاستخدامها في العديد

من التطبيقات الرادارية بمواصفات جيدة وتقنية جديدة وكلفة قليلة مقارنة بالمعدّلات التقليدية القديمة مع ميزات غير موجودة في غيرها من التصميمات كإمكانية تغيير قيمة جهد الخرج العالي بسهولة عن طريق تغيير قيمة جهد الدخل أو زيادة عدد مراحل مولد ماركس، وكذلك إمكانية تغيير عرض النبضة والتردد التكراري للنبضات عن طريق تغيير مواصفات نبضات التحكم فقط وذلك بدون أي تغيير في عناصر النظام مما يعطي ميزة إضافية في إمكانية استخدام نفس النظام لعدد من التطبيقات (الرادارات) المختلفة فيما بينها بقيمة الجهد أو عرض النبضة والتردد التكراري، ولذلك من أهم التوصيات في نهاية هذا العمل أن يتم اعتماد هكذا أنظمة بدلاً عن العديد من الأنظمة التقليدية القديمة الموجودة حالياً في رادارات الدفاع الجوي السوري التي بمعظمها روسية الصنع وتعتمد على الصمامات الفراغية القديمة والتي انتهى عمرها الافتراضي وأصبح من الصعوبة بمكان إصلاحها لعدم توفر قطع التبديل لها كونها تعتمد على تكنولوجيا قديمة وإن توفرت فبأسعار مرتفعة جداً، وإضافةً لهذا الهدف الرئيسي يمكن تحقيق أهداف أخرى من بينها عملية توطيق تقنية الجهود العالية النبضية في البلاد والسيطرة عليها كونه إلى الآن يتم استيراد هذه التقنية المهمة في العديد من التطبيقات المختلفة كتوليد الأمواج المكروية المستخدمة في التشويش على وسائط الاتصال ضمن منظومات الحرب الإلكترونية وكذلك في وحدات تغذية منابع الليزر المستخدم في آلات قص المعادن الصناعية.

المراجع

- [1] L. Gang; Z. Han; Lee Li; L. Fu-chang; H. Guan; L. Ning; C. Li; Z. Zheng-yang. 2010, *Research on ground potential of Marx generator in large current switch system*. IEEE International Power Modulator and High Voltage Conference.
- [2] T. Alissa; G. Madi; M. Younes. 2020, *Design and implementation High-Power Solid-State Switch Bank for Modern Pulse Radar Modulators using Parallel Stacked High Power MOSFET Transistors*. Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies, Syria, volume (42), N. 6.
- [3] S. Zabihi; F. Zare; G. Ledwich; A. Ghosh. 2010, *A resonant based Marx generator*. 20th Australasian Universities Power Engineering Conference, INSPEC, Accession Number: 11833294.
- [4] S. C. Glidden; H. D. Sanders. 2019, *Solid State Marx Generator*. Conference Record of the Twenty-Seventh International Power Modulator Symposium.
- [5] S-k Ok, H-Je Ryoo, S.-Roc Jang, S.-Ho Ahn, G. Goussev. 2012, *Design of a High-Efficiency 40-kV, 150-A, 3-kHz Solid-State Pulsed Power Modulator*. IEEE Transaction on Plasma Science, vol. 40, NO. 10.
- [6] S. Zabihi; Z. Zabihi; F. Zare. 2019, *a Solid-State Marx Generator with a Novel Configuration*. 19th Iranian Conference on Electrical Engineering.
- [7] J. Kim; M. H. Ryu; B. D. Min; S. Shenderay; J. S. Kim; G. H. Rim. 2005, *High Voltage Pulse Power Supply Using Marx Generator & Solid-State Switches*. 31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, IECON.
- [8] S. H. Ahn; H. J. Ryoo; J. w. Gong; S. R. Jang. 2014, *Robust Design of Solid-State Pulsed Power Modulator Based on Modular Stacking Structure*. IEEE Transactions on Power Electronics.
- [9] S. Wang; Q. Huang; L. Xiong; L. Xu; Q. Chen. 2018, *A Compact All-Solid-State Repetitive Pulsed Power Modulator Based on Marx Generator and Pulse Transformer*, IEEE Transactions on Plasma Science.

[10] Y. Wang; L. Tong; K. Liu. 2017, *Impedance matching for repetitive high voltage all-solid-state Marx generator and excimer DBD UV sources*. Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences and IOP Publishing.

[11] J. Mondal; S. Karmakar. 2014, *Modelling and Simulation of Impulse Voltage Generator using Marx Circuit*. National Institute of Technology, Rourkela Odisha.

[12] W. A. Stygar; K. R. LeChien; M. G. Mazarakis; M. E. Savage; B. S. Stoltzfus; K. N. Austin. 2017, *Impedance-matched Marx generators*. American Physical Society, Physical Review Accelerators and Beams 20, 040402.

[13] Tastekin D. 2011, *Pulsed voltage converter with bipolar output voltages up to 10 kV for dielectric barrier discharge*. IEEE 8th Int. Conf. on Power Electronics and ECCE (Asia Jeju, Korea) (Piscataway, NJ: IEEE).

[14] Wang Y G. 2014, *Repetitive high voltage all-solid-state Marx generator for dielectric barrier discharge pulsed plasma*. IEEE Int. Power Modulator and High Voltage Conf. (Santa Fe, NM).