

## تصميم معدل نبضي خطي عالي الاستطاعة اعتماداً على ترانزستورات الحالة الصلبة

تقديم: م. تيسير يوسف العيسى\* اشرف د: معين يونس د. غدير ماضي

### الملخص

يُعد المعدل النبضي عالي الاستطاعة البنية الرئيسية في المرسلات الرادارية التي تعتمد في عملها على الصمامات المكروية، كونه يؤمن الجهد العالي النبضي ضمن مواصفات محددة للصمام المكروي والذي يلعب الدور الرئيسي في تحديد مواصفات نبضة الرادار مما يؤثر على عمله، وحيث أنه يوجد العديد من الأنواع لهذه المعدلات النبضية إلا أن النمط الخطي Linear Type يُعد من أكثر الأنواع شهرةً، والذي يعتمد في تصميمه القديم على القواطع الغازية التقليدية Spark Gape.

نطرح في هذا العمل تصميماً جديداً للمعدلات النبضية الخطية لقيادة نبضات الجهد العالي المطبقة على الصمام المكروي عالي الاستطاعة في المرسل الراداري، والذي يمكن استخدامه أيضاً في عملية بناء أنظمة تشويش إلكتروني بطرق جديدة. سنقوم بدراسة جزئيات هذا المعدل ببناء جديد لكتلة القواطع الإلكترونية التي تلعب الدور الرئيسي في عملية التصميم، ومن ثم دراسة المحول النبضي العالي الاستطاعة وأثر العناصر الشاردية على شكل النبضة ومن ثم إجراء نمذجة حاسوبية للتحقق من صحة هذا البناء المقترح لننتقل بعدها إلى التنفيذ العملي لهذا المعدل ومقارنة النتائج العملية بنتائج النمذجة لتقييم الأداء وللتحقق من بلوغ الغاية المرجوة من بناء هذا المعدل النبضي عالي الاستطاعة.

**الكلمات المفتاحية:** المعدلات الرادارية النبضية، الاستطاعة النبضية، قواطع الحالة الصلبة، الصمامات المكروية، المغنطرون، الكترنويات الاستطاعة، المحولات النبضية.

\*طالب دكتوراه (من مركز الدراسات والبحوث العلمية) -قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة تشرين-اللاذقية-سورية.

Email: [tony.saad@yandex.com](mailto:tony.saad@yandex.com) phone: 0999852779

## **Design High-Power Linear Type Modulator depending on solid state Transistors**

Tayser Alissa\*

### **Abstract**

The high power pulse modulator is the basic structure in radar transmitter, which depends on microwave tube, because it provides the high voltage pulse in a specific parameters of microwave tube that plays the main role in determining radar pulse specification, and where there are many type of these pulse modulators, but linear type considers as the most famous, which depends in old design on traditional spark gape switches.

In this work, We present a new design of linear type modulator to lead the high voltage pulses applied to the high-power microwave tube in the radar transmitter, and which can be used in building new systems of electronic jamming, we will study the subsystems in new building of electronic switches bank, which has the main role in the design operation, then we will study the pulse transformer and the effect of parasitic elements on wave shape, and doing a computer simulation to verify the validity of this proposed construction and then the practical implementation of this modulator and compare the results of process with simulation results to evaluate performance and to verify the desired goal of building this high-power pulse modulator.

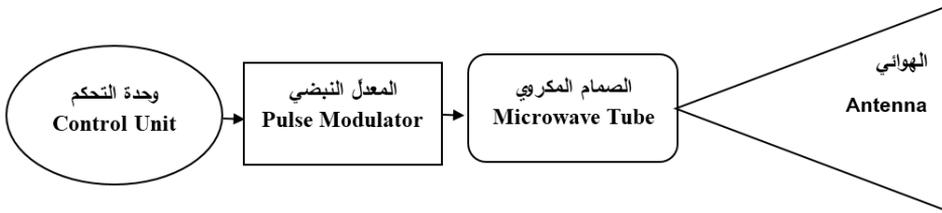
**Key words:** radar impulse modulators, pulsed power, solid-state switches, microwave tubes, magnetrons, power electronics, pulsed transformers.

---

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

## مقدمة introduction

تستخدم معظم المرسلات الرادارية القديمة ذات الاستطاعة العالية والتردد العالي الصمامات المكروية لتوليد نبضات الإرسال، وحيث أن هذه الصمامات المكروية تحتاج إلى دارة تغذية خاصة تُسمى بالمعدّل النبضي الذي يؤمن الجهد النبضي العالي بعرض نبضة وتردد تكراري محددين وفق مواصفات الصمام المكروي، لذلك تُعدّ المعدّلات النبضية ذات الاستطاعة العالية البنية الأساسية للمرسلات الرادارية العالية الاستطاعة، حيث يبين الشكل (1) المخطط الصندوقي للمرسل الراداري وتوضّع المعدّل النبضي فيه الذي يُشكّل الجزء الأصعب والأهم من حيث تصميم هذه الأنظمة حيث تكمن هذه الصعوبة في التقنيات اللازمة المتعلقة بالجهود النبضية عالية الاستطاعة بحيث تحقق جودة شكل نبضة الجهد الذي يلعب دوراً كبيراً في شكل الإشارة المكروية وبالتالي يُؤثر على عمل الرادار النبضي.



الشكل 1: المخطط الصندوقي للمرسل الراداري

إن وظيفة المعدّل النبضي Pulse Modulator هي تأمين نبضات الجهد العالي باستطاعة مرتفعة للصمام المكروي لتوليد النبضات المكروية عالية الاستطاعة، وبما أن الاستخدام الأكثر لهذه النبضات المكروية موجود في الرادارات النبضية لذلك فإن شكل ومواصفات نبضات الجهد العالي للمعدّل النبضي مهمة جداً لعمل الرادار النبضي [1]، حيث يُعدّ عرض النبضة Pulse Width (PW) العامل الرئيسي المُحدّد لقدرة الرادار على الفصل بين الأهداف وكذلك التردد التكراري النبضي (PRF) pulse repetition frequency الذي يؤثر على قيمة المدى الأعظمي لقدرة الرادار على الكشف [2].

للأسباب السابقة، تُعدّ معدّلات الحالة الصلبة النبضية عالية الاستطاعة مهمة جداً لأبحاث الرادار وتكنولوجيا الأمواج المكروية، بحيث تكون الغاية الرئيسية للمعدّل النبضي عالي الاستطاعة توليد نبضات جهد عالي بعرض نبضة صغير وزمن صعود وهبوط سريع بتردد تكراري محدد [3].

يوجد العديد من التصاميم لهذه المعدّلات النبضة عالية الجهد إلا أن أقدمها والأكثر شهرة هو التصميم المُسمى بالنمط الخطي Linear-type construction الذي ظهر منذ العام 1940م وبقي من أفضل التصاميم من حيث الكلفة المنخفضة والمرونة في عمليات الإصلاح والتبديل للمرسلات الرادارية لسنتين عديدة [4]. إن لهذه الطريقة العديد من الميزات كالخبرة الطويلة في التعامل مع هذا النمط، تخزين ثابت للطاقة في خطوط النقل، صغر الحجم، تحكم جيد بالجهد، إلا أن لها أيضاً سلبيات كالحاجة لدارة إزالة المغنطة لقلب المحول النبضي، وهو الأمر الذي سوف نقوم بحله بطريقة جديدة ضمن كتلة القواطع التي تعتمد في تصميمها على ترانزستورات الحالة الصلبة العالية الاستطاعة.

#### هدف البحث وأهميته:

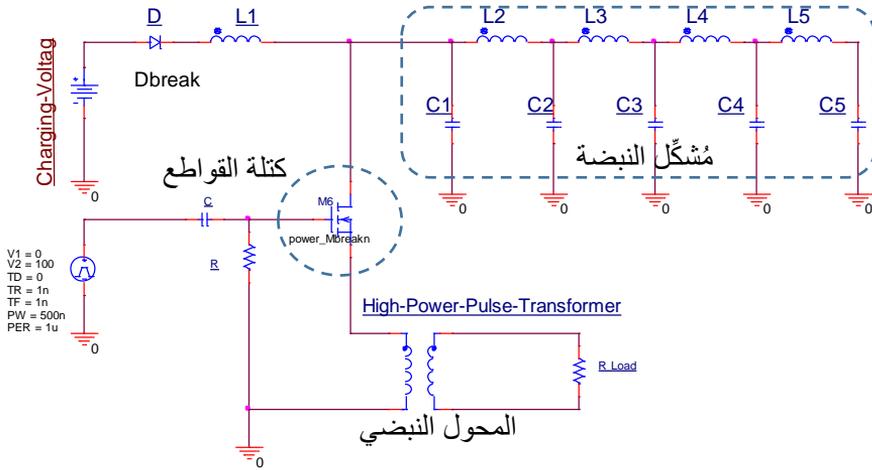
يهدف عملنا هذا إلى بناء تصميم جديد للمعدّل النبضي نظرياً وعملياً يتجنب السلبيات الموجودة في التصاميم القديمة ويكون صالحاً للعمل على طيف واسع من الرادارات الموجودة بهدف تحقيق رفع جاهزيتها عن طريق استبدالها بتكنولوجيا جديدة محلية وبكلفة منخفضة مقارنة مع الكلفة المرتفعة الحالية هذا إن توفرت قطع التبديل لكونها تعتمد على تقنيات قديمة لم تعد تُنتج الآن.

#### طرائق البحث ومواده:

#### 1-المخطط العام للمعدّل النبضي

تتكون معدّلات النمط الخطي من شبكة تشكيل النبضة Pulse Forming Network (PFN)، المحول النبضي عالي الاستطاعة High Power Pulse Transformer، والقاطعة Switch. حيث يتم تصميم شبكة تشكيل النبضة بحيث تكون ممانعتها مساوية تقريباً لممانعة الحمل المنظورة من جهة المحول النبضي (توافق

ممانعات بين المعدّل والحمل) [5]. ويُوضح الشكل (2) المخطط الكهربائي للمعدّل النبضي الخطي [6].



الشكل 2: المخطط الكهربائي للمعدّل النبضي الخطي [6]

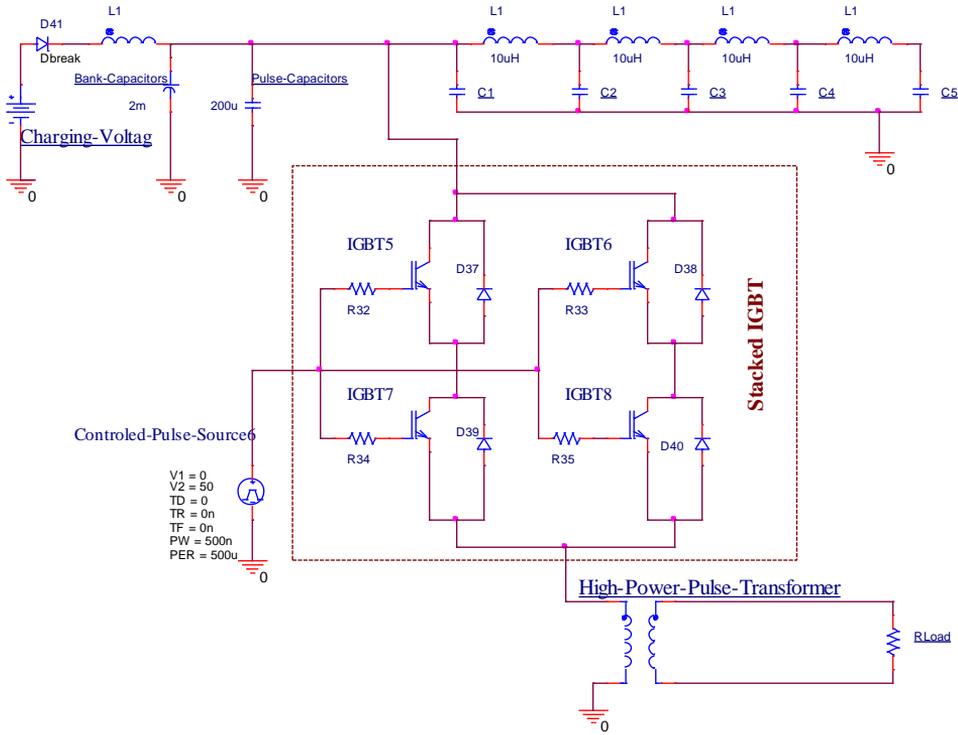
## 2- البنية المقترحة لكتلة قواطع الحالة الصلبة عالية الاستطاعة

يعتمد مبدأ عمل المعدّل النبضي المقترح على فكرة تمرير نبضات الجهد العالي المتشكلة من خلال مُشكّل النبضة عبر قاطعة غازية أو ثيراترون Thyatron الذي سنقوم باستبداله بكتلة قواطع عالية الاستطاعة مبنية على أساس تشكيلة من ترانزستورات الحالة الصلبة نمط IGBT (insulated gate bipolar transistors) بتصميم جديد كلياً عن طريق ربطها مع بعضها البعض تسلسلياً وتفرعياً، وذلك لتستطيع تحمل الجهد المطبق عليها وكذلك التيار المار بها، كما هو موضّح في الشكل (3).

وبخلاف كل التصاميم المعروفة للمعدّلات النبضية القائمة للصمامات المكروية والتي تعتمد على خطوط النقل لإيجاد نبضات الجهد العالي [7] فإن هذه الطريقة تعتمد على كتلة قواطع الحالة الصلبة عالية الاستطاعة التي تعمل على تمرير الجهد عبر ملف الأولي للمحول النبضي عالي الاستطاعة كحمل لها ومن ثم رفع الجهد بنسبة تحويل معينة لإيجاد نبضات الجهد العالي على خرج المحول النبضي [8].

## تصميم معدّل نبضي خطي عالي الاستطاعة اعتماداً على ترانزستورات الحالة الصلبة

إن لهذه الطريقة العديد من الإيجابيات من بينها إمكانية التحكم بلحظة الإغلاق وذلك بسبب استخدام قواطع مفتوحة وبالتالي حماية النظام في لحظات الفشل أو الانهيارات، عدم وجود شحن وتفريغ كامل للمكثفات، التحكم بمستوى جهد الخرج عن طريق جهد الدخل مباشرة، وبالإضافة إلى إمكانية تغيير عرض النبضة والتردد التكراري دون الحاجة إلى إجراء أي تغيير في بنية المعدّل وهو ما يجعل من تصميم معين أن يكون مناسب للعديد من الرادارات المختلفة فيما بينها بعرض النبضة أو التردد التكراري [9].



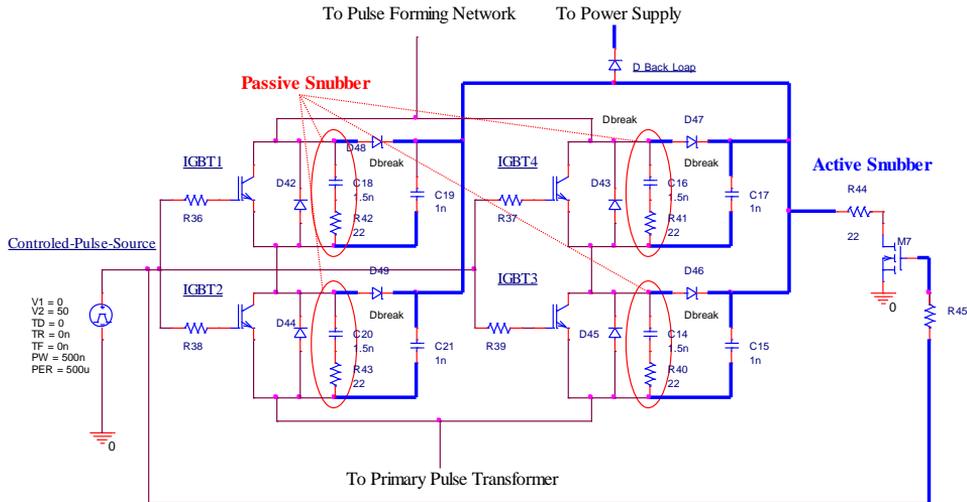
الشكل 3: تشكيلة الربط التسلسلي والتفرعي لترانزستورات الاستطاعة

## 1-2- مناقشة تصميم الدارة

بدايةً يجب الانتباه إلى قيمة مكثفات التخزين Bank Capacitors بحيث تكون كافية لتأمين الطاقة اللازمة لتوليد النبضات وكذلك أيضاً لقيمة المكثفات النبضية Pulse Capacitors لتكون قادرة على تأمين جهد نبضي عالي خلال زمن صغير (highV/ $\mu$ S).

تتعلق قيمة جهد نبضة الدخل بالقيمة العظمى التي يستطيع ترانزستور الاستطاعة أن يتحملها دون حدوث انهيار جهد (المصدر-المجمّع)، لذلك ترتبط نسبة تحويل المحول النبضي بنسبة جهد نبضة الخرج والجهد الأعظمي للمصدر-مجمّع لترانزستورات الاستطاعة هذه [10].

يجب الانتباه إلى أنه كلما زادت نسبة تحويل المحول النبضي قلّ جهد المصدر-المجمّع لترانزستور الاستطاعة، ولكن ذلك يعني أيضاً زيادةً في قيمة العناصر الشاردة للمحول النبضي كالمكثفات والذاتيات الشاردية التي تُسبب تشوّه في شكل النبضة مع وجود نبضات عابرة عالية القيمة غير مرغوبة مع زيادةً سرعة زمن الصعود والهبوط لنبضة جهد الخرج وجميع هذه العوامل غير مرغوبة في التطبيقات المتعلقة بالرادارات كونها تؤثر على عملها وأدائها [11]. وبالتالي يجب حذف هذه النبضات العابرة الموجودة على مجمّع القاطعة وذلك عن طريق اقتراح دائرة سنبر (مرشّح) غير فعّال passive snubber ( $C_S, R_S$ ) لكل ترانزستور IGBT، ودائرة سنبر فعّال active snubber واحدة لمجموعة الترانزستورات كما هو موضّح في الشكل (4).



الشكل 4: دارات السنبر الفعّال والغير فعّال لكتلة الترانزستورات

## 2-2- المناقشة النظرية للدائرة المقترحة والعلاقات الرياضية المبنية عليها

إن جهد الشحن المستمر الموجود على دخل دارة المعدّل هو  $V_{ch}$ ، وفي الحالة الأولى (النمط الأول) عندما تكون جميع ترانزستورات الاستطاعة  $M_n$  مفتوحة (كتلة القواطع مفتوحة) سوف يمر التيار من مُشكّل النبضة عبر ملفّ الأولي للمحول النبضي، وتكون معادلة الشحن لذاتية ملفّ الأولي للمحول النبضي موضحة بالعلاقة:

$$V_{ch} = L_p \frac{di_{on}}{dt} \quad (1)$$

حيث  $L_p$  ذاتية الملفّ الأولي للمحول النبضي،  $di_{on}$  تيار شحن الذاتية  $L_p$  خلال الزمن  $dt$  والذي هو عبارة عن عرض النبضة  $T_{on}$ ، ولذلك نستطيع كتابة المعادلة (1) على الشكل:

$$di_{on} = V_{ch} \cdot \frac{T_{on}}{L_p} \quad (2)$$

وإذا افترضنا أن تيار الحمل  $I_l$  فيكون لدينا:

$$di_{on} = \frac{N_s}{N_p} \cdot I_l \quad (3)$$

حيث:  $N_s$  عدد لفات الثانوي للمحول النبضي،  $N_p$  عدد لفات الأولي للمحول النبضي.

والتي يمكن كتابتها باستخدام المعادلة (2) على الشكل:

$$I_l = \frac{T_{on}}{L_p} \cdot \frac{N_p}{N_s} \cdot V_{ch} \quad (4)$$

وتكون القدرة المخزنة في ذاتية الأولي:

$$E_{L_p} = \frac{1}{2} L_p (di_{on})^2 \quad (5)$$

بتعويض المعادلتين (3 و 4) في المعادلة (5) يكون لدينا:

$$E_{L_p} = \frac{T_{on}^2 V_{ch}^2}{2 \cdot L_p} \quad (6)$$

تقوم دارات السنبر غير الفعّال ( $nC_s, nR_s$ ) بحذف ترددات الاهتزازات المنخفضة الناتجة عن الذاتيات الشاردية للمحول النبضي ومكثفات المصدر-المجمّع لترانزستورات الاستطاعة.

عندما تُغلق ترانزستورات الاستطاعة  $M_n$  سيتم شحن المكثفة  $C_b$  حيث تُعطى قدرتها التخزينية بالعلاقة:

$$E_{C_b} = \frac{1}{2} C_b V_{ch}^2 \quad (7)$$

لتحقيق إزالة مغنطة القلب الفريتي بشكل كامل يجب أن يكون تيار التفريغ لذاتية الأولي مساوياً لتيار الشحن لها، لذلك يكون الشرط اللازم لإزالة المغنطة هو:

$$di_{on} = |di_{off}| \quad (8)$$

وبالتالي يكون الزمن اللازم لإزالة المغنطة هو:

$$T_{demag} = \frac{V_{ch}}{V_{FD_{Fb}} + V_{FD_n}} \cdot T_{on} \quad (9)$$

ولأجل التطبيقات المتعلقة بعمل الرادار، يجب أن يكون زمن عرض النبضة وزمن إزالة المغنطة هما معاً أقل من المجال التكراري للنبضة pulse repetition interval (PRI)، وبالتالي:

$$T_{demag} + T_{on} < PRI$$

وبما أن معدّل عمل الرادار يُعطى كنسبة النبضة  $T_{on}$  إلى  $PRI$ ، أي:

$$DutyCycle = \frac{T_{on}}{PRI} \quad (10)$$

لتحديد قيمة المكثفات يجب أن تحقق شرط تفريغها خلال زمن فتح الترانزستورات بشكل كامل، لذلك يمكن كتابة الشرط التالي:

$$5nR_s C_b < T_{on} \quad (11)$$

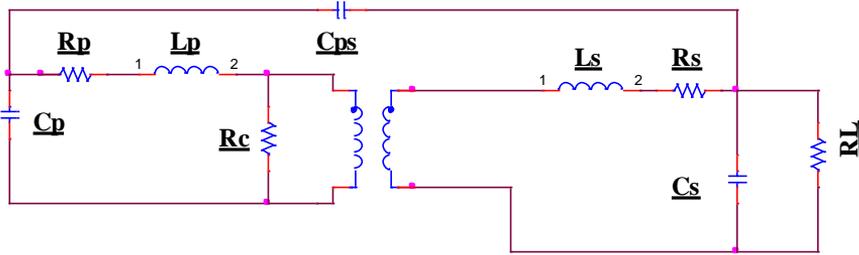
حيث  $n$  عدد مكثفات  $C_b$ .

### 3-المحول النبضي عالية الاستطاعة High Power Pulse Transformer

تظهر الحاجة إلى بناء محولات نبضية باستطاعة وجهود عالية مع زيادة استطاعة الصمامات المكروية، حيث تُستخدم المحولات بشكل عام كرافعة للجهد النبضي وعزل كهربائي، تخفيض الضجيج، وتحسين نوعية الاستطاعة، بالإضافة إلى تحقيق توافق ممانعات بين المعدل النبضي والصمام المكروي وخاصة في أنظمة الاستطاعة العالية. الفائدة الرئيسية من استخدام المحول النبضي عالي الاستطاعة في المعدلات النبضية هو تقليل جهد الشحن المطبق على قواطع الحالة الصلبة.

### 3-1- الدارة المكافئة للمحول النبضي العالي الاستطاعة

يمكن نمذجة الدارة المكافئة للمحول النبضي باستخدام برنامج الـ ORCAD PSPICE كما هو في الشكل (5)[12].

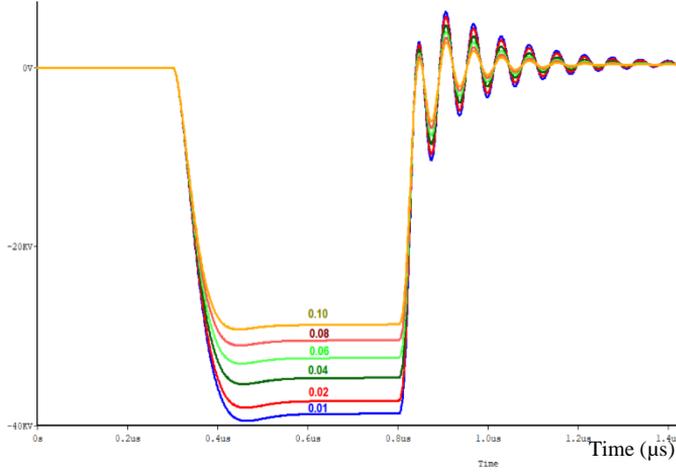


الشكل 5: الدارة المكافئة للمحول النبضي عالي الاستطاعة [12]

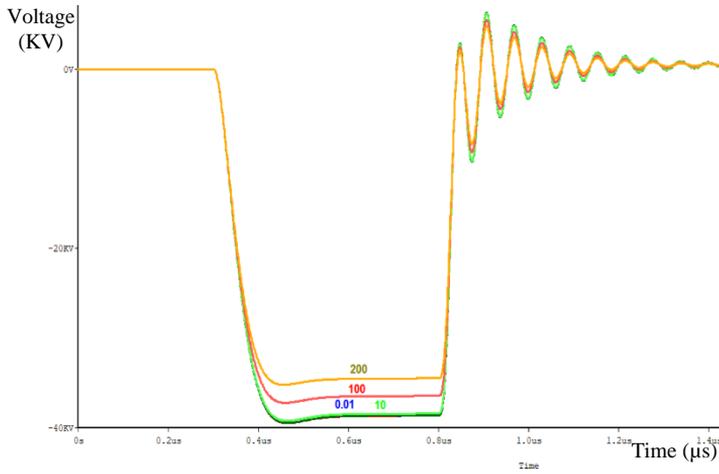
### 3-2- أثر العناصر الطفيلية على شكل نبضة الخرج

✓ الأثر على هبوط الجهد: إن الأثر الرئيسي لهبوط جهد الخرج يعود لمقاومة سلك الملف الأولي ومقاومة سلك الملف الثانوي، إلا أن أثر مقاومة الأولي أكبر من أثر مقاومة الثانوي كما هو واضح من الشكل (6) والشكل (7).

Voltage  
(KV)



الشكل 6: أثر مقاومة سلك الملف الأولى  $R_p$  على هبوط جهد الخرج  
( $R_p$ : 0.01, 0.02, 0.04, 0.08, 0.1  $\Omega$ )

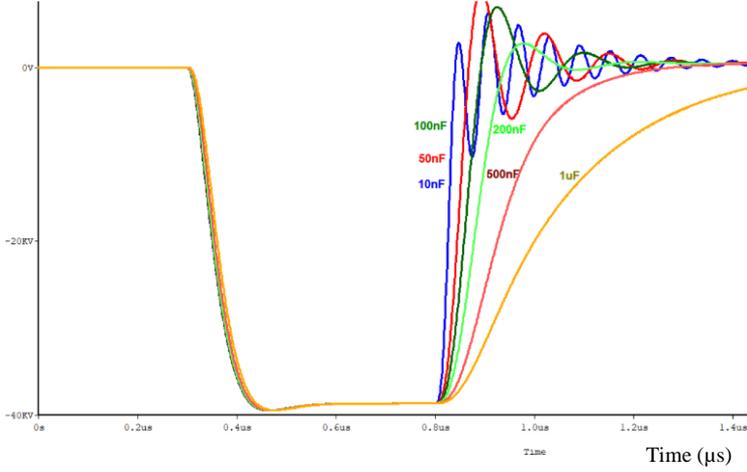


الشكل 7: أثر مقاومة سلك الملف الثانوي  $R_s$  على هبوط جهد الخرج  
( $R_s$ : 0.01, 10, 100, 200  $\Omega$ )

✓ الأثر على زمن الصعود والهبوط للنبضة: يعود سبب زيادة زمن الصعود والهبوط إلى المكثفات الشاردية للأولي والثانوي ومكثفة الربط الشاردية بينهما كما هو موضَّح في الأشكال (8, 9, 10).

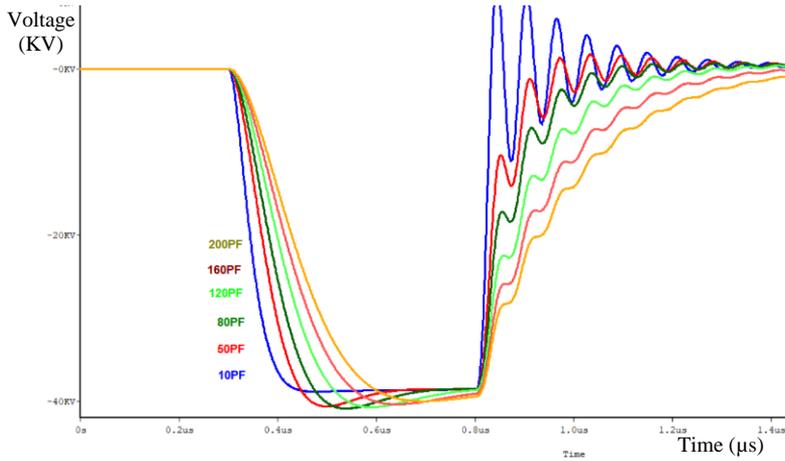
Voltage  
(KV)

تصميم معدّل نبضي خطي عالي الاستطاعة اعتماداً على ترانزستورات الحالة الصلبة



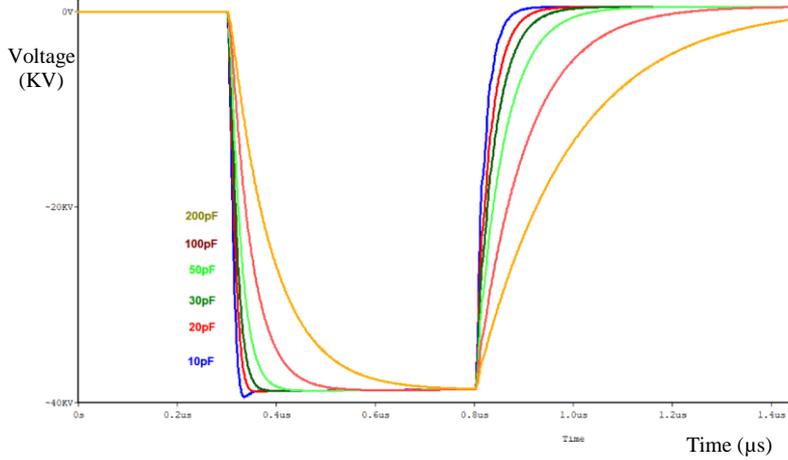
الشكل 8: أثر المكثفة الشارديّة للملف الأولي  $C_p$  على زمن الصعود والهبوط للنبضة

( $C_p$ : 10, 50, 100, 200, 500, 1000 nF)



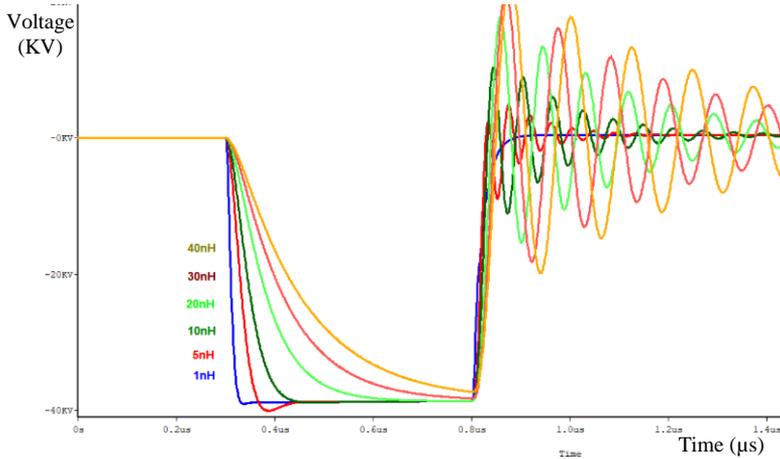
الشكل 9: أثر المكثفة الشارديّة للملف الثانوي  $C_s$  على زمن الصعود والهبوط للنبضة

( $C_s$ : 10, 50, 80, 120, 160, 200 pF)



الشكل 10: أثر مكثفة الربط الشاردية بين الأولي والثانوي  $C_{ps}$  على زمن الصعود والهبوط للنبضة ( $C_{ps}$ : 10, 20, 30, 50, 100, 200 pF)

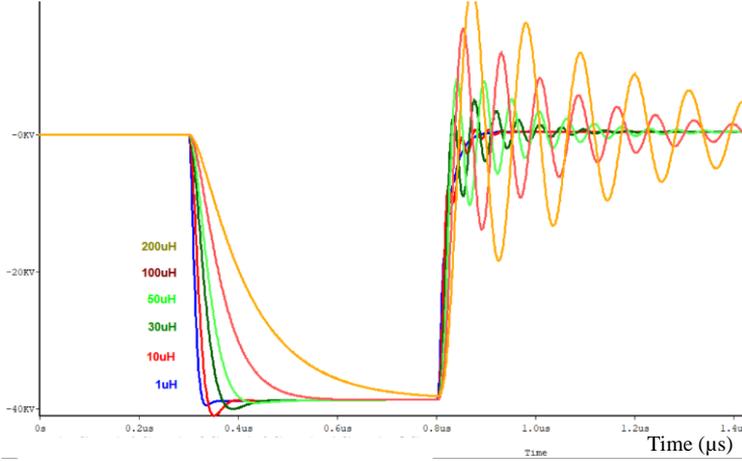
✓ الأثر على اهتزاز النبضة والجهد الراجع: يعود سبب ذلك إلى الذاتيات الشاردية للملف لأولي والثانوي كما هو موضَّح في الأشكال (11, 12).



الشكل 11: أثر الذاتية الشاردية للملف الأولي  $L_p$  على اهتزاز النبضة

( $L_p$ : 1, 5, 10, 20, 30, 40 nH)

Voltage  
(KV)



الشكل 12: أثر الذاتية الشاردية للملف الثانوي  $L_s$  على اهتزاز النبضة

$$(L_s: 1, 10, 30, 50, 100, 200 \mu H)$$

#### 4- النتائج والمناقشة:

##### 4-1- نمذجة الدارة المقترحة والتحقق من صلاحية البنية المفروضة

تم نمذجة الدارة المقترحة باستخدام برنامج الـ ORCAD 17.4 للتحقق من أداء البنية المقترحة للمعدّل النبضي ضمن السيناريو الحقيقي وباعتبار معالجة النظام غير خطية (الحالة الحقيقية)، ولهذا الغرض تم تحديد مواصفات معدّل نبضي عالي الاستطاعة بعرض نبضة قصير يناسب عمله عدد من التطبيقات من بينها العمل على بعض أنواع رادارات الدفاع الجوي. وهذه المواصفات على الشكل التالي:

جهد نبضة الخرج (جهد المهبط للصمام المكروي):  $V_{out} = -40 \text{ KV}$ .

تيار نبضة الخرج (تيار الحمل):  $I_{Load} = 25 \text{ A}$ . عرض النبضة:  $PW=500 \text{ ns}$ .

وتحت شرط المعادلة (10) نستطيع وضع قيمة التردد التكراري:  $PRF= 2 \text{ KHz}$ .

طرّاز الترانزستورات  $M_n$  هو APTI2040L2FLL.

طرّاز الديودات  $D_n$  و  $D_{Fd}$  هو DSEP30-I2CR.

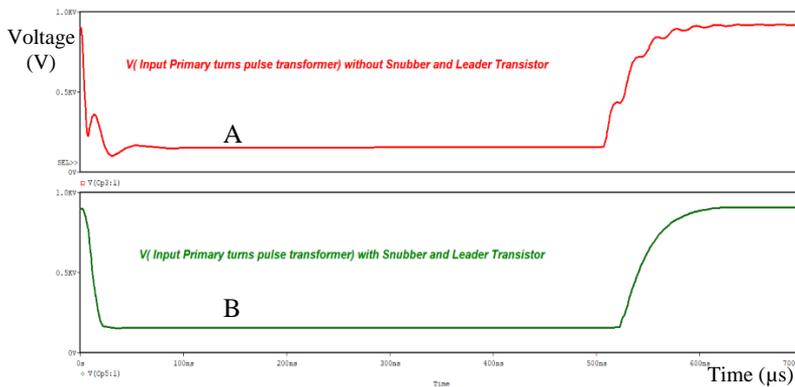
نستطيع شحن ملف الأولي للمحول النبضي حتى جهد  $= 900 \text{ VDC}$  وفقاً لمواصفات

الترانزستورات  $M_n$  و  $M_L$ .

يمكن تحديد مواصفات المحول النبضي العالي الاستطاعة انطلاقاً من قيمة جهد نبضة الخرج المطلوبة وقيمة جهد الدخل المسوح تطبيقها على ملف الأولي للمحول كالتالي:  
عدد لفات الأولي للمحول النبضي:  $N_p = 1$ . عدد لفات الثانوي للمحول النبضي:  
 $N_s = 55$ .

انطلاقاً من المعادلة (11): قيمة المكثفة  $C_b = 3nF$  ، وبالتالي بقية عناصر السنبر:  
 $C_s = 1.8\mu F$  ،  $R_s = 27\Omega$  ،  $50\text{ watt}$

يُظهر الشكل (13) نتائج النمذجة لشكل نبضة الجهد المُطبقة على لفات الأولي للمحول النبضي، حيث نشاهد بوضوح أثر وجود السنبر على شكل النبضة من حيث وجود اهتزازات ترددية غير مرغوبة أو قفزات جهد عالية تؤثر على عمل الصمام المكروي.

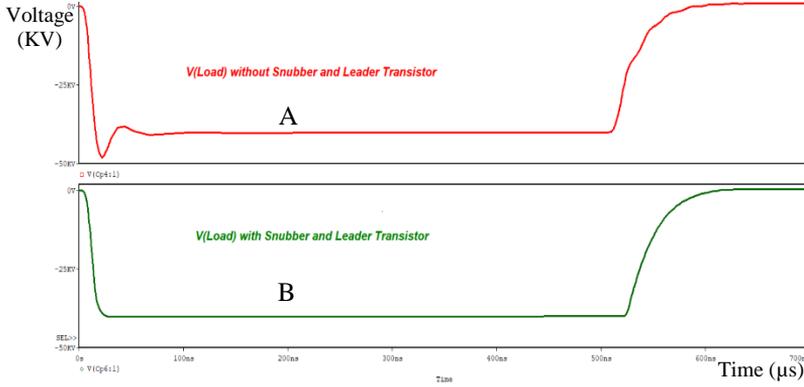


الشكل 13: شكل نبضة الجهد المُطبقة على لفات الأولي للمحول النبضي

(A) بدون وجود السنبر ، (B) مع وجود السنبر

## تصميم معدّل نبضي خطي عالي الاستطاعة اعتماداً على ترانزستورات الحالة الصلبة

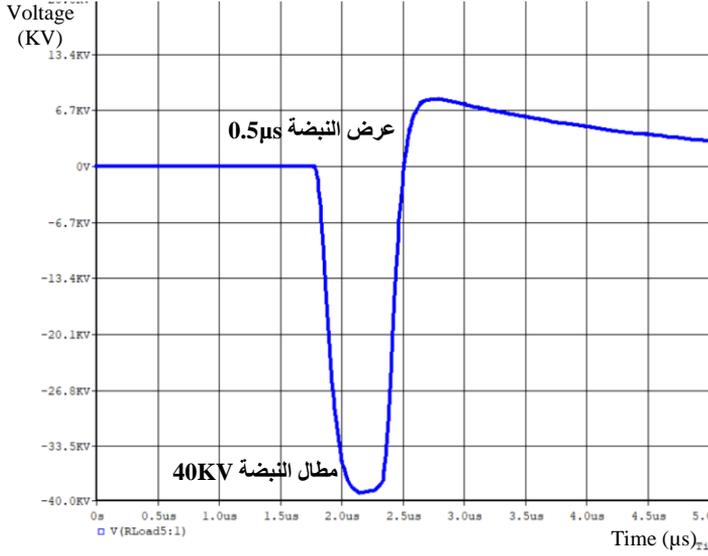
يَظهر هذا الأثر لدارات السنبر أيضاً بوضوح على شكل نبضة الجهد المُطبقة على الحمل كما هو واضح في الشكل (14.B) مقارنةً بشكل نبضة جهد الخرج بدون وجود السنبر والترانزستور القائد في الشكل (14.A).



الشكل 14: شكل نبضة جهد الخرج المُطبقة على الحمل

(A) بدون وجود السنبر ، (B) مع وجود السنبر

بتطبيق جميع الشروط المتعلقة بالمحول النبضي من حيث قيم العناصر الشاردية المناسبة واستخدام دارات السنبر نحصل على النتيجة النهائية لشكل نبضة الخرج كما في الشكل (15).



الشكل 15: شكل نبضة جهد الخرج النهائية المطبقة على الحمل

#### 4-2-التنفيذ العملي للمعدّل النبضي والنتائج التجريبية

##### ملاحظات تصميمية:

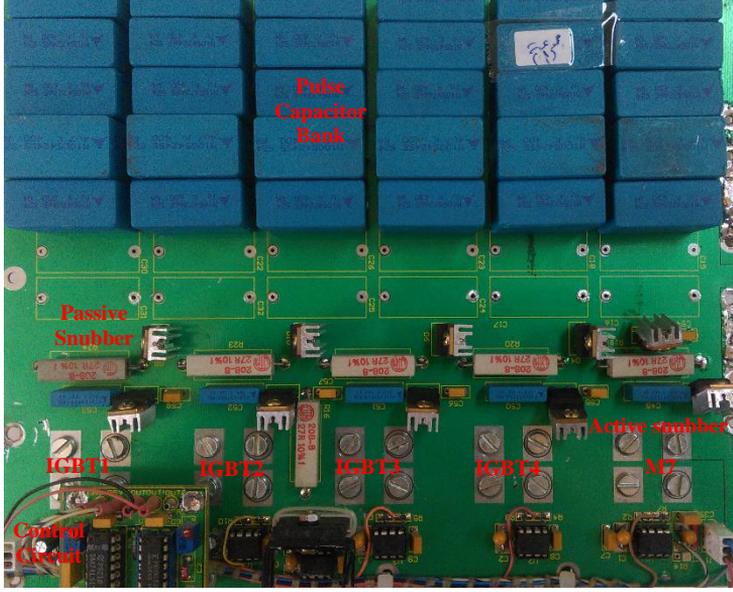
عند إخراج الدارة المطبوعة لترانزستورات كتلة القواطع بالشكل النهائي كدارة مطبوعة يجب الانتباه إلى مسألة التناظر فيما بين هذه الترانزستورات وإلا سوف يحدث خلل بمرور التيار عبر بعض الترانزستورات وعدم توازن بتوزيع مرور التيار النبضي بين مختلف فروع ترانزستورات الاستطاعة الموصولة تفرعياً.

تتحمل عائلة ترانزستورات الـ IGBT جهد أكبر من ترانزستورات الـ MOSFET، إلا أنها أبداً منها وزمن صعود نبضة الجهد فيها مرتفع، ولكنها جيدة لمعدلات النبضات الطويلة [13].

#### 4-2-1-بناء النظام

مواصفات النموذج العملي للمعدّل النبضي هي نفس المواصفات المقترحة في عملية النمذجة وخاصة فيما يتعلق بعملية بناء كتلة القواطع من حيث العدد والانتباه إلى مسألة التناظر في توضع ترانزستورات الاستطاعة كما هو واضح في صورة كتلة القواطع في الشكل (16)، علماً أنه تم تنفيذ الجزء العملي في مركز الدراسات والبحوث العلمية.

تصميم معدّل نبضي خطي عالي الاستطاعة اعتماداً على ترانزستورات الحالة الصلبة



الشكل 16: صورة كتلة القواطع

الجزء الثاني المهم في المعدّل النبضي هو المحول النبضي عالي الاستطاعة والموضحة صورته في الشكل (17). كما يُظهر الشكل (18) صورة النظام المخبري الكامل.



الشكل 17: صورة المحول النبضي

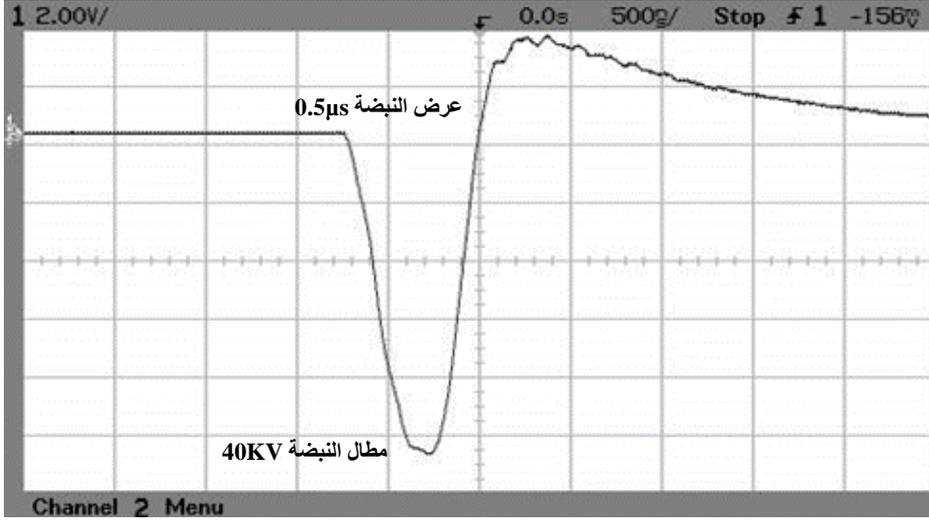


الشكل 18: صورة النظام المخبري

#### 4-2-2- النتائج التجريبية

عند بدأ الاختبار قمنا برفع جهد الدخل بشكل تدريجي وعند وصول جهد الخرج النبضي إلى قيمة 5 KV ظهرت شرارات وانهيارات بين لفات المحول النبضي، لذلك قمنا بوضع المحول النبضي ضمن زيت عازل للجهد العالي لتجنب هذا الأثر، وبعد ذلك استمرينا برفع الجهد حتى القيمة المطلوبة لنبضات جهد الخرج وهي 40KV والتي تم قياسها باستخدام مسبار جهد عالي لنحصل على الشكل (19) الذي يُظهر نبضة جهد عالي واحدة على خرج المعدّل بعرض نبضة 500 ns.

نعلم بأن حمل المعدّل النبضي هو صمام مكروي (مغنترون مثلاً) والذي يعمل كديود زنر بجهد عالي، لذلك عند فتح كتلة قواطع الجهد العالي ستهبط قيمة الجهد العالي إلى قيمة جهد القطع للصمام (الجهد الذي لا يعمل عنده الصمام المكروي) وبالتالي سيُغلق الصمام المكروي وينعدم التيار المُستجر من المعدّل النبضي، لذلك سيتم تفريغ الجهد المتبقي في دارة المعدّل النبضي من خلال العناصر الشاردية الموجودة فيها.



الشكل 19: نبضة الجهد المقاسة على خرج المعدّل النبضي

بالنتيجة النهائية نكون قد توصلنا إلى هدفنا المرجو بالحصول على نبضات جهد عالي 40KV، بعرض نبضة صغير 500ns، وتردد تكراري 2KHz، وتيار نبضي 25A، أي استطاعة نبضية 1MW وبمقارنة هذه النتيجة العملية مع نتيجة النمذجة الموضحة في الشكل (15) نلاحظ تطابق النتائج العملية مع نتائج النمذجة من حيث شكل النبضة وقيمة جهد نبضة الخرج 40KV وعرض النبضة 500ns، زمن صعود للنبضة 50ns وزمن هبوط 100ns، مما يدل على دقة التصميم ومطابقة التنفيذ العملي له، حيث تعود هذه النتيجة العملية الجيدة إلى المعالجة الجيدة للمحول النبضي من حيث تقليل قيم العناصر الطفيلية وإلى تحديد قيم عناصر السنبر بدقة جيدة مع التوزيع الجيد لترانزستورات الاستطاعة وفصل خطوط التيارات العالية في الدارة عن تيارات التحكم.

#### الاستنتاجات:

نستنتج من خلال الدراسة السابقة أنه باستخدام قواطع الحالة الصلبة عالية الاستطاعة وإضافة دارات ترشيح غير فعّالة، ودارة ترشيح فعّالة عن طريق إضافة ترانزستور استطاعة لقيادة مجموعة الترانزستورات الأخرى، نستطيع 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 التصاميم

كإمكانية تغيير قيمة جهد الخرج العالي بسهولة عن طريق تغيير قيمة جهد الدخل فقط، 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.

### التوصيات:

أهم التوصيات في نهاية هذا العمل أن يتم اعتماد هذا النظام بديلاً عن العديد من الأنظمة التقليدية القديمة الموجودة حالياً في رادارات الدفاع الجوي 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 توطيد 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] G. K. Rao, S. Rao, S.K. Chaudhury, 2017. Networking of Tracking Radars of Two Different SAM Weapons. Defense Science Journal, December Defence science journal 68(1):70.
- [2] H. Rahman, 2019. Fundamental Principles of Radar. LLC, by Taylor & Francis Group, LLC.
- [3] C. Chipman, M. Gaudreau, L. Jashari, J. Kinross, M. Kempkes, R. Simpson, A. Wheelhouse, S. Griffiths, 2018. Daresbury Laboratory Short Pulse Klystron Modulators. International Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC), IEEE.
- [4] I. Roth, 2016. Solid-State Thyatron Replacement. International Vacuum Electronics Conference.
- [5] M. Akemoto, S. fukuda, H. Honma, M. Kawamura, T. Natsui, H. Nakajima, T. Shidara, 2018. Present Status of the Klystron Modulator for SUPERKEKB Injector LINAC. High Energy Accelerator Research Organization Pulsed Power and Plasma Science Conference.
- [6] K. P Dixit, A. Tillu, R. Chavan, V. Yadav, H. Sarukte, 2014. Design and Development of Linear Type Modulators for High Impedance Electron Gun, International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). India IEEE, the Institute of Electrical and Electronics Engineers; Piscataway, NJ (United States).
- [7] J. Gilbrech, S. Heidger, J. Schrock, J. Parker, R. Richter, 2019. a Compact Solid-State Trigger Generator Utilizing a Ferrite Loaded Air Core Transformer. IEEE Pulsed Power & Plasma Science (PPPS) Conference, Air Force Research Laboratory (AFRL)/RDH, Kirtland Air Force Base, under FA9451-17-D-0070.
- [8] H. Kim, C. Yu, S. Jang, G. Kim, 2018. Gate Driver Circuit for Short Pulse Generation in Solid-State Pulsed Power Modulators. IECON - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society.
- [9] A. Author, C. Author, Jr, 2014. Robust Design of Solid-State Pulsed Power Modulator Based on Modular Stacking Structure. IEEE Transactions on Power Electronics.

[10] Z. Zhanga, X. Tana, 2012. Review of High-Power Pulse Transformer Design. 18th International Vacuum Congress, CC BY-NC-ND license.

[11] M. Collins, C. Martins, 2019. Optimal Design of a High Voltage High Frequency Transformer and Power Drive System for Long Pulse Modulators. Lund University, European Spallation Source, IEEE Pulsed Power & Plasma Science (PPPS) Conference.

[12] N. Nishizuka, M. Nakatsuyama, H. Nagahashi, 1989. Analysis of Pulse Transformer on Distributed Parameter Theory. IEEE Transactions on Magnetics.

[13] X. Chen, L. Yu, T. Jiang, H. Tian, K. Huang, J. Wang, 2017. A High-Voltage Solid-State Switch Based on Series Connection of IGBTs for PEF Applications. IEEE Transactions on Plasma Science.





