



بهبود زمان مرده آشکارساز گایگر مولر با استفاده از مدار خاموش کننده فعال

حسینی پناه، میرشهرام^(۱) - ارکانی، محمد^(۱) - محمدی، سعید^(۲) - اسدی، سهیلا*^(۲)

۱ پژوهشکده راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی تهران، صندوق پستی: ۸۳۶-۱۴۳۹۵، تهران، ایران

۲ گروه فیزیک، دانشگاه پیام نور مرکز مشهد، صندوق پستی: ۹۱۷۳۵-۴۳۳، مشهد، ایران

چکیده

زمان مرده طولانی در آشکارساز گایگر مولر باعث از بین رفتن تعداد زیادی شمارش در سیستم‌های اندازه‌گیری تابشی می‌شود. این مشکل که بسیار حایز اهمیت است با استفاده از مدارهای خاموش کننده فعال و غیرفعال قابل کنترل است. مدارهای خاموش کننده فعال مورد استفاده در نمونه آشکارساز گایگر مولر مدل ZP1200GMT توسط دو نرم افزار محاسباتی و تحلیلی NGSPICE و KICAD به منظور تصحیح و کنترل پارامتر زمان مرده با بهره‌وری بیشتر نسبت به نمونه موجود، طراحی و شبیه سازی شد. به عنوان نتیجه کار در این مطالعه با تغییرات مقاومت‌های آند و کاتد آشکارساز گایگر مولر در چهار حالت مختلف در کنار استفاده از سویچ سریع‌تر، بهترین حالت از بین تغییرات، افزایش مقاومت آند و کاهش مقاومت کاتد بود چرا که علاوه بر کاهش ولتاژ شروع، باعث افزایش ۱۲۰٪ زمان شارژ و کاهش ۵۷٪ زمان دشارژ پالس مثبت در سیگنال خروجی گردید که نشانگر کاهش ۳۷٪ زمان مرده نسبت به نمونه موجود بود.

کلمات کلیدی: آشکارساز گایگر مولر، زمان مرده، مدار خاموش کننده

Improve of Geiger Müller Detector Dead Time using Active Quenching Circuit

M.S.Hosaini Panah⁽¹⁾, M. Arkani⁽¹⁾, S. Mohammadi⁽²⁾, S. Asadi*⁽²⁾

⁽¹⁾ Reactor Research School, Nuclear Science & Technology Research Institute (NSTRI), P.O. Box 14395-836, Tehran, Iran

⁽²⁾ Physics Group, Payame Noor University of Mashhad, P.O. Box 91735-433, Mashhad, Iran

Abstract

A large dead time of the Geiger Müller detector causes a large count loss in radiation measurement systems. The active and passive quenching circuits can control this problem which is very important. The active quenching circuits used in the Geiger-Müller ZP1200GMT were designed and simulated by NGSPICE and KICAD analytical soft wares in order to correct and control the dead time parameter with higher efficiency than the existing sample. As a result of this study, by changing the anode and cathode resistors of Geiger-Müller in 4 Different modes, along with using a faster switch, increase the anode resistance and decrease the cathode resistance was best case, because in addition to reducing the starting voltage, it increases the charging time about 120% and reduced positive pulse discharge time about 57% in the output signal which indicates a 37% reduction in dead time in comparison with the existing sample.

Keywords: Geiger Müller detector, Dead time, Quenching Circuit

۱. مقدمه

آشکار ساز گایگر مولر با قدمت یک صد ساله دستخوش تغییرات مختلفی به منظور بهبود و بهینه‌سازی از طریق افزایش سرعت اندازه‌گیری، کاهش زمان مرده، افزایش راندمان و عمر دستگاه بوده است.

از نظر تاریخی، کنترل سرعت عملکرد تیوپ به فاصله زمانی هشت سال پس از اختراع آن با بکارگیری مدارهای نیمه‌الکترونیکی پرسرعت توسط نهر در سال ۱۹۳۶ شروع و در ۱۹۳۸ ویرایش یافت [۲۱]. سپس روارک و گتینک در سال‌های ۱۹۳۷ و ۱۹۳۸ از مولتی‌ویراتورها به عنوان مدارهای الکترونیکی ویرایش یافته پرسرعت استفاده کردند [۳ و ۴].

هم‌زمان با رشد و توسعه مدارهای الکترونیکی در این آشکارساز، مطالعه روش‌های مختلف محاسبه و اندازه‌گیری زمان مرده جهت تشخیص بازه دشارژ گایگر مولر در فاصله زمانی بین پالس آغازین و تخلیه الکترونیکی بعدی مورد توجه واقع گردید. دو مدل ایده‌آل پاسخ فلج‌کننده و غیرفلج‌کننده زمان مرده که اغلب مرسوم اندازه‌گیری‌های تابشی بودند توسط فلر و ایوان در سال‌های ۱۹۵۵ الی ۱۹۸۸ معرفی گردیدند [۵]. بعد از آن مدل ترکیبی هیبرید با استفاده از تابع انتقال لاپلاس توسط تاکاس در سال ۱۹۵۸ و کاربرد مشتقات آن در سال ۱۹۸۸ استخراج گردید [۶].

مدل‌های جدید هیبریدی زمان مرده در آشکارساز گایگرمولر به ترتیب توسط گرنر و لی در سال ۲۰۰۰ و هم‌چنین گرنر و هون در سال ۲۰۱۵ [۷] و نهایتاً مدل جدید پدیدارشناسی برای زمان مرده آشکارساز گایگرمولر توسط عثمان و همکاران وی در سال ۲۰۱۷ ارائه شدند [۸]. قابل به ذکر است که استفاده از این مدل‌های تصحیح زمان مرده، دامنه عملیاتی ردیاب‌های موجود را به میزان قابل توجهی گسترش می‌دهد [۹].

از دیگر اقدامات صورت گرفته استفاده از مدارهای خاموش‌کننده فعال به منظور کاهش میزان مصرف گاز خاموش‌کننده داخلی آشکارساز و در نتیجه افزایش طول عمر و کارایی دستگاه بوده است. اولین نمونه این مدارها در سال ۱۹۴۸ توسط مایر ارایه گردید [۱۰] و در سال ۱۹۵۸ توسط کرول توسعه داده شد [۱۱]. سپس توسط متیو در سال ۱۹۶۹ به سمت مدارهای خاموش‌کننده دو ترانزیستوری متمایل گردید [۱۲] و مجدداً در سال ۱۹۸۶ بهبود داده شد [۱۳]. پس از آن برای مدتی تا سال ۱۹۹۹ بازدید دوباره شرایط تخلیه گایگر مولر و مقوله خودخاموش‌کنندگی در این آشکارساز از طریق بررسی تاثیر غلاف یونی مثبت و تعداد بهمن‌های منفرد درون آن مورد توجه قرار گرفت [۱۴].

در قالب مثالی تکنیکی، به‌طور معمول بیش از 10^9 جفت یون الکترون قبل از متوقف شدن بهمن، ایجاد و باعث زمان بازیابی طولانی، در حدود صد میکروثانیه، آن‌هم قبل از تنظیم کامل لوله برای دریافت پالس دیگر می‌گردد. در بیشتر تیوب‌های گایگرمولر زمان مرده حدود پنجاه تا صد میکروثانیه و به‌طور میانگین تعداد شمارش مفید حدود 10^4 شمارش در ثانیه می‌باشد. این دستاورد آماری با توجه به وجود مدارهای خاموش‌کننده فعال و تاثیر آن‌ها در کنترل کاهشی زمان مرده فراهم گردیده است [۱۵].

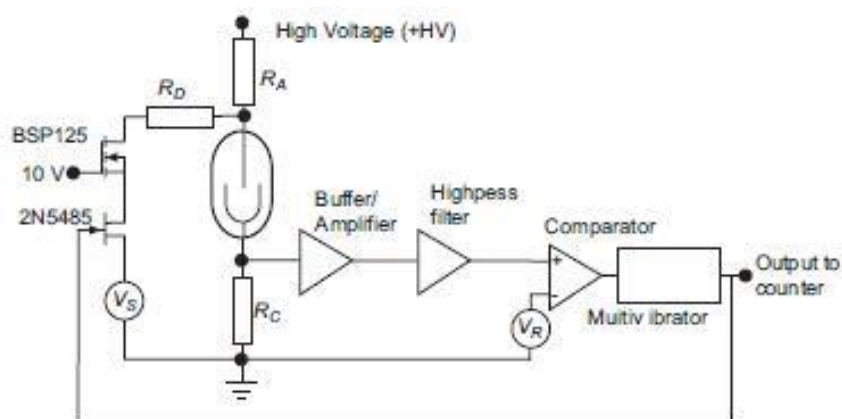
در این پژوهش با توجه به تاریخچه مطالعات و پژوهش‌هایی که در راستای بهینه‌سازی آشکارساز گایگر مولر به منظور اندازه‌گیری‌های خاص و طولانی مدت صورت گرفته و با هدف کاهش خرابی و از کارافتادگی شمارنده به خصوص در شرایط مشابه صنایع هسته‌ای، تجهیزات پزشکی، اکتشافات فضایی و ... که دسترسی جهت اعمال تصحیحات تقریباً محال است و همچنین با هدف بررسی اعمال شرایط بهینه‌سازی بیشتر در این آشکارساز، ابتدا مدار خاموش‌کننده فعال نمونه گایگر مدل ZP1200GMT منطبق با سیگنال خروجی در مقاله رفرنس (واگل و همکاران-۲۰۰۷) که مورد استفاده در مطالعات بعدی آن نیز بوده است، شبیه‌سازی و طراحی مجدد گردید [۱۶، ۱۷]. سپس دو مقاومت کنترلی آند و کاتد که مشترک در مدار قرابت‌گر غیرفعال و خاموش‌کننده فعال هستند، در بازه مشخص و مجاز، همراه

با ارتقاء ترانزیستور سوئیچ، بدون تاثیر بر سایر قسمت‌های مدار، به طور متقابل و همزمان تغییر داده شدند. در نهایت با مقایسه و آنالیز نتایج حاصله، موفقیت در افزایش سرعت سوئیچ‌زنی و کاهش زمان دشارژ گایگر و زمان مرده حاصل گردید.

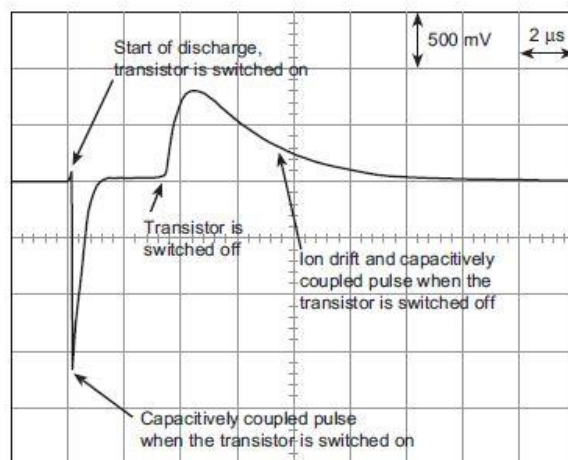
۲. روش تحقیق

۱.۲. مدار خاموش‌کننده فعال

رویکرد کلی عملکرد مدارهای خاموش‌کننده فعال مطابق شکل (۱)، تقویت و فیلتر بالاگذر سیگنال تولید شده بر روی مقاومت کوچک کاتدی است تا امکان تشخیص زودتر زمان تخلیه گایگر فراهم شود. سیگنال خروجی این مدار سپس به یک مقایسه‌کننده تغذیه می‌شود که در آن سطح مرجع بالاتر از سطح نویز مدار است.



شکل ۱. نمودار شماتیک مدار خاموش‌کننده فعال تیوپ گایگرمولر Centronic ZP1200GMT [۲۰].

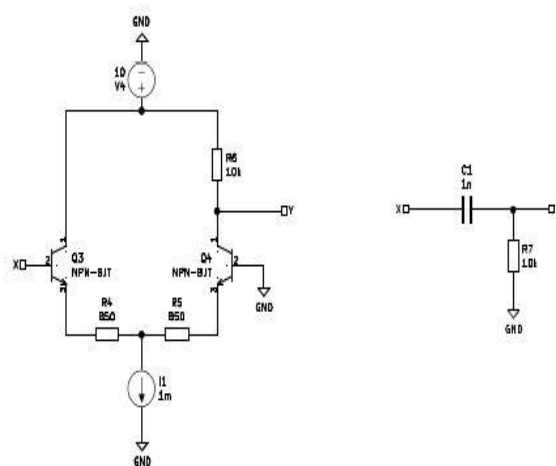


شکل ۲. سیگنال خروجی تقویت‌کننده فیلتر شده مدار خاموش‌کننده فعال در ZP1200 GMT [۲۰].

خروجی مقایسه‌کننده باعث راه‌اندازی مولتی‌ویبراتوری می‌شود که مطابق شکل (۲)، سیگنال شمارش واقعی را فراهم و ترانزیستور سوئیچینگ را کنترل نموده و ولتاژ آند را به زیر ولتاژ شروع کشانده و برای زمان از پیش تعیین‌شده در آنجا نگه می‌دارد که در نهایت باعث کاهش زمان مرده می‌شود [۲۰].

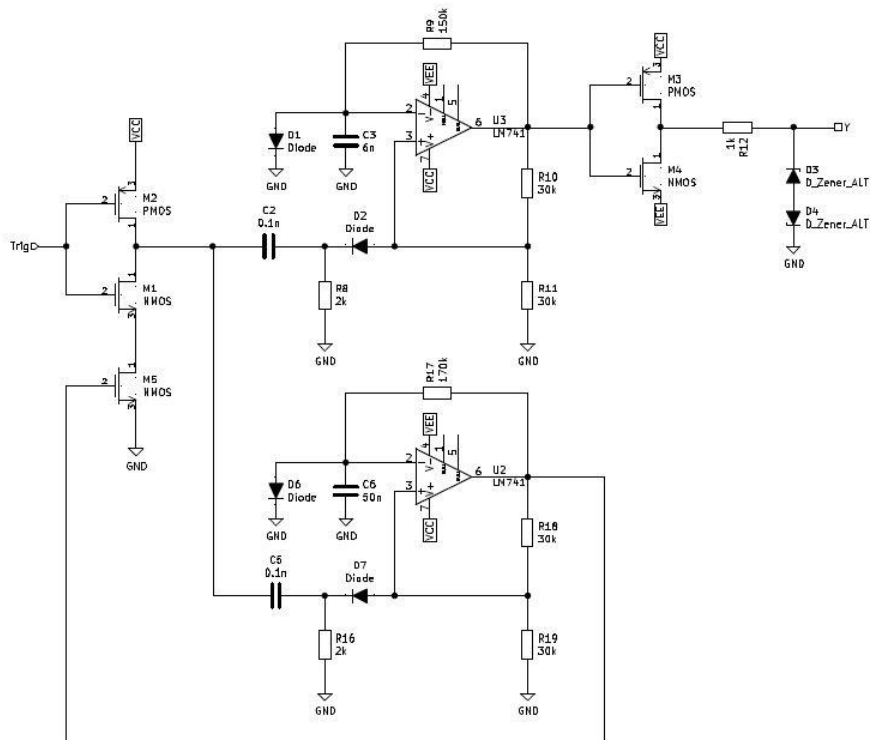
۲.۲. شبیه‌سازی مدار خاموش‌کننده فعال

به‌دنبال انجام مطالعات فوق سعی بر بررسی درصد بهینه‌سازی راندمان شمارشی آشکارساز گایگر مولر از طریق کاهش بیشتر زمان مرده و در نتیجه افزایش عمر آن گردیده است. لذا ابتدا با کمک نرم‌افزار شبیه‌سازی و آنالیز مداری NGSPICE خروجی آخرین مطالعه انجام شده



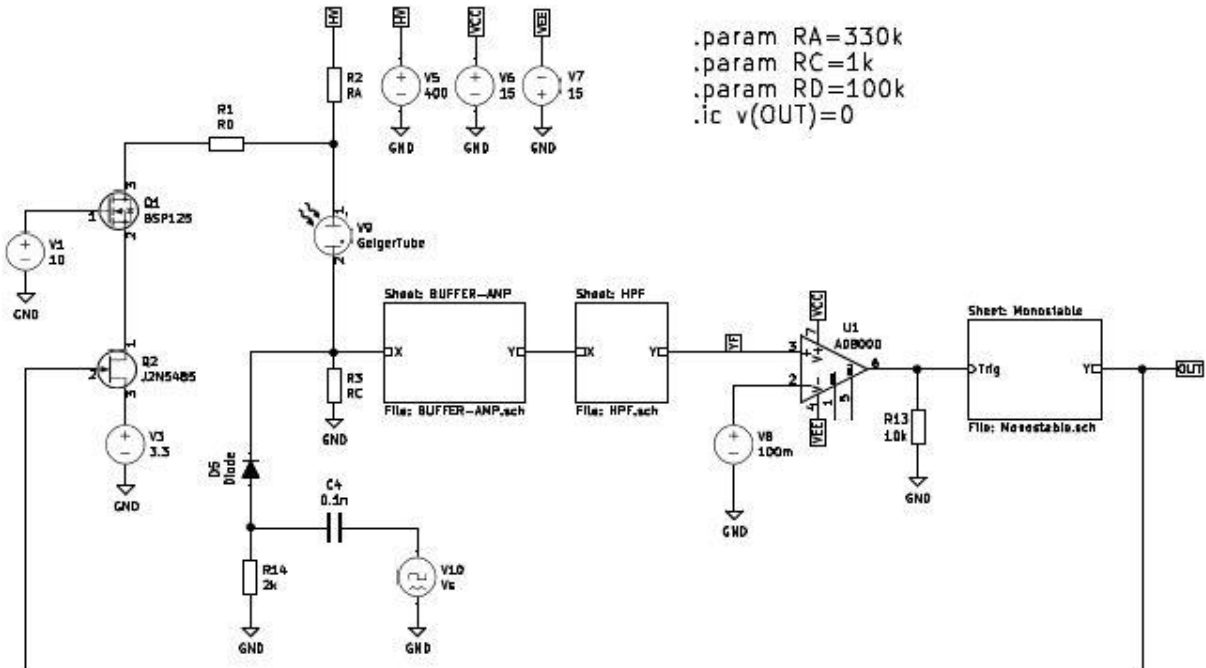
شکل ۳. بلوک‌های شبیه‌سازی شده فیلتر بالاگذر (راست) و بافر تقویت‌کننده (چپ).

(واگل و همکاران-۲۰۰۷) بر روی کاهش زمان مرده از طریق استفاده از مدارهای خاموش‌کننده فعال در آشکارساز گایگر مولر شبیه‌سازی و مدار آن مطابق شکل‌های (۳) و (۴) ترسیم گردید [۱۸].



شکل ۴. بلوک شبیه‌سازی شده مولتی‌ویبراتور مونواستابل.

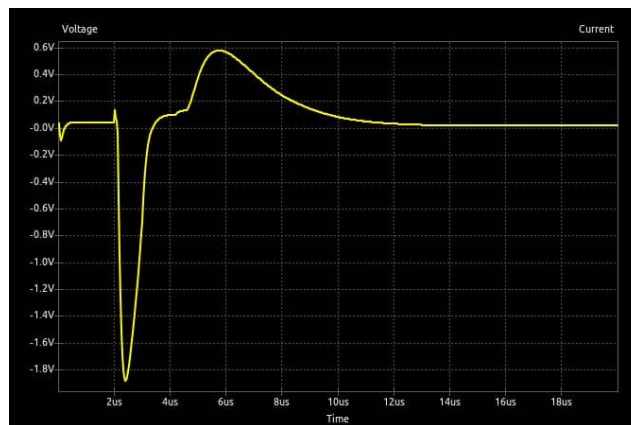
قابل به ذکر است دستگاه آشکارساز مورد استفاده در این مقاله از بین گروه آشکارسازهای سنترونیک، مدل ZP1200GMT می‌باشد که مشخصات ظاهری آن در مرجع ضمیمه شده [۱۹] موجود است.



شکل ۵. شماتیک شبیه‌سازی شده مدار خاموش‌کننده فعال ZP1200GMT با اعمال خازن ۲ پیکو فارادی.

بنابراین ابتدا شماتیک کامل مدار دیاگرام موجود شکل (۵)، بر اساس شناسایی و طراحی بلوک‌های مختلف نامعلوم آن در شکل‌های (۳) و (۴) با توجه به اطلاعات سیگنال خروجی مقاله مرجع در شکل (۲) و مدار خاموش‌کننده فعال موجود در شکل (۱) با کمک نرم‌افزارهای طراحی و آنالیز مدارهای الکتریکی (NGSPICE و CICAD) ترسیم گردید.

۳.۲. نمودارها و جداول تحلیلی



شکل ۶. سیگنال خروجی تقویت‌کننده فیلترشده با مقدار ولتاژ مقایسه ۱۰۰ میلی‌ولت.

سیگنال خروجی بازسازی‌شده در شکل (۶) که حاصل از مدار طراحی‌شده شکل (۵) است و از مطابقت خوبی با داده‌های ترسیمی نمونه اصلی موجود در مقاله (شکل (۲)) برخوردار است را با نمودارهایی که از تغییرات المان‌های حساس مداری به شرح زیر در این پژوهش

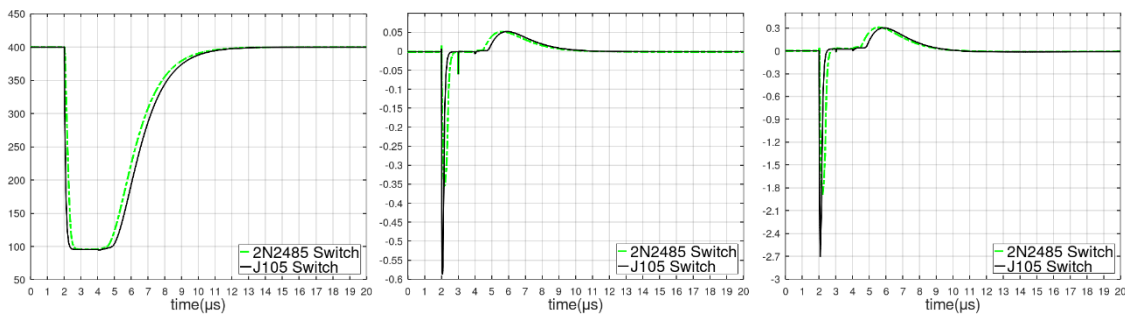
بدست آمده به منظور تعیین بهترین طرح بهینه‌سازی عملکرد آشکارساز گایگرمولر از طریق مشاهده ولتاژ خروجی سرهای آند، کاتد و مولتی‌ویبراتور مورد بررسی و آنالیز قرار می‌دهیم:

الف) تغییر ترانزیستور سوئیچ‌زنی (نمودارهای شکل (۷)).

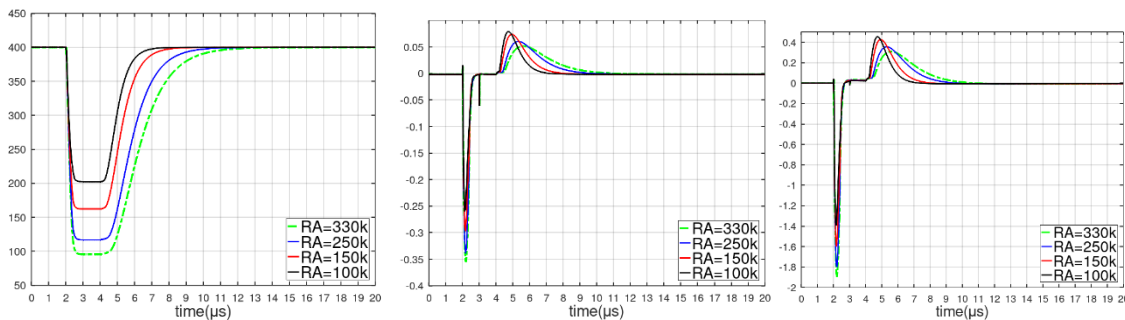
ب) تغییرات کاهشی و افزایشی مقاومت دوسر آند گایگرمولر (R_a) (نمودارهای (۸) و (۹)).

ج) تغییرات کاهشی و افزایشی مقاومت دوسر کاتد گایگرمولر (R_c) (نمودارهای (۱۰) و (۱۱)).

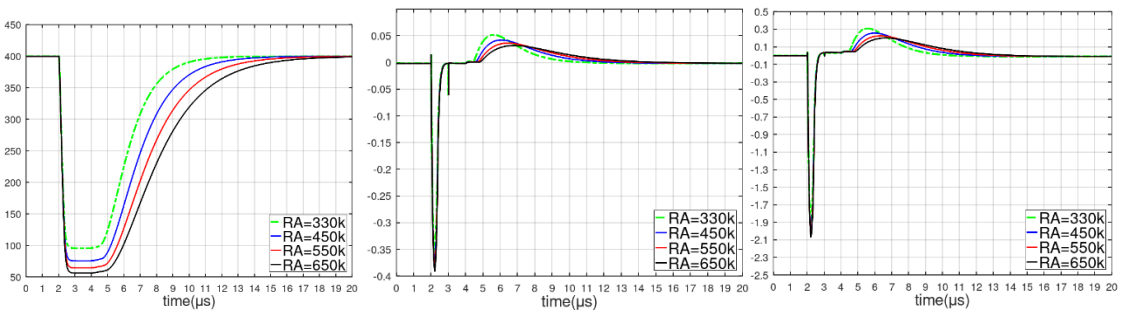
د) تغییر همزمان مقاومت‌های آند و کاتد (نمودارهای (۱۲) الی (۱۵)).



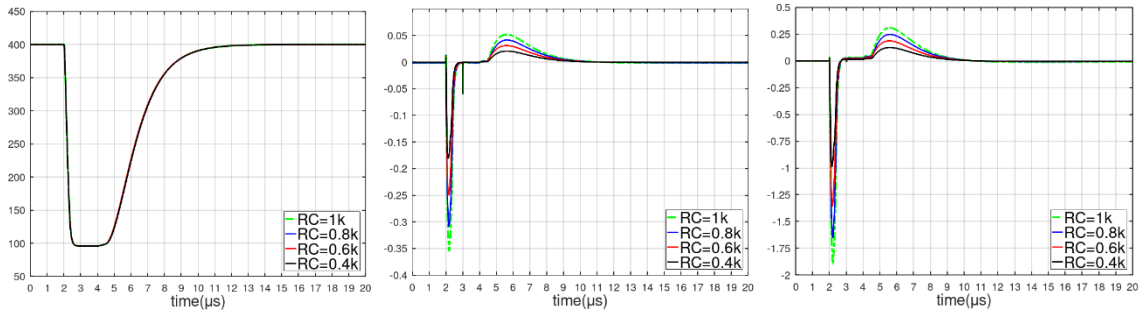
شکل ۷. تغییر سرعت سوئیچ: از چپ به راست ولتاژ خروجی سرهای آند، کاتد و مولتی‌ویبراتور.



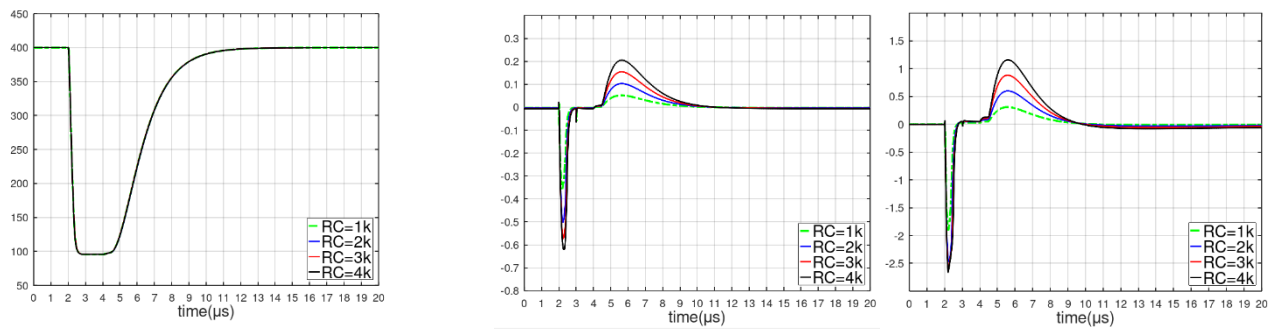
شکل ۸. کاهش مقاومت آند: از چپ به راست ولتاژ خروجی سرهای آند، کاتد و مولتی‌ویبراتور.



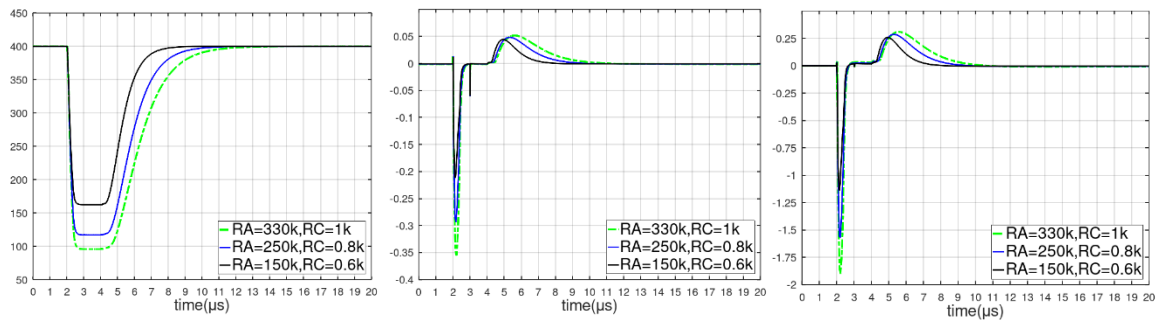
شکل ۹. افزایش مقاومت آند: از چپ به راست ولتاژ خروجی سرهای آند، کاتد و مولتی‌ویبراتور.



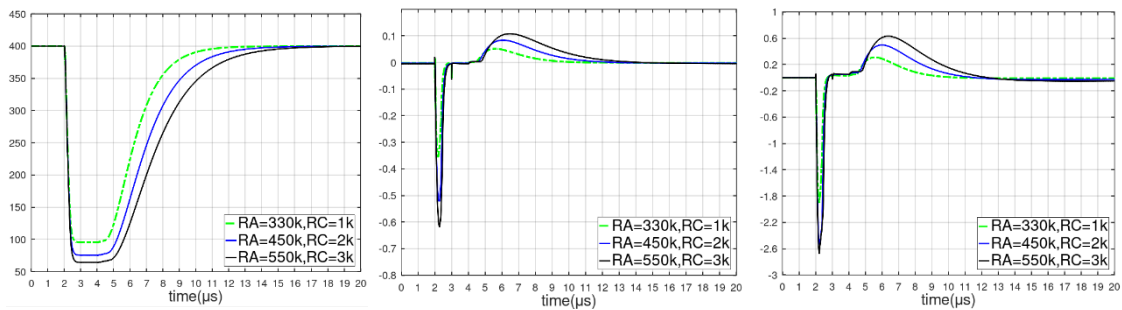
شکل ۱۰. کاهش مقاومت کاند: از چپ به راست ولتاژ خروجی سرهای آند، کاند و مولتی‌ویبراتور.



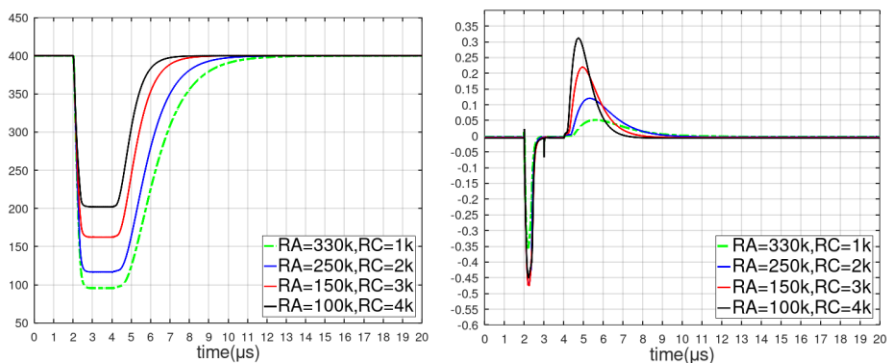
شکل ۱۱. افزایش مقاومت کاند: از چپ به راست ولتاژ خروجی سرهای آند، کاند و مولتی‌ویبراتور.



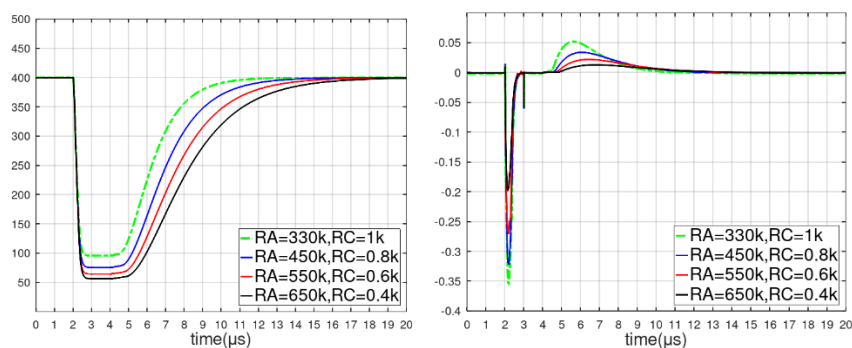
شکل ۱۲. کاهش همزمان مقاومت‌های آند و کاند: از چپ به راست ولتاژ سرهای آند، کاند و مولتی‌ویبراتور.



شکل ۱۳. افزایش همزمان مقاومت‌های آند و کاند: از چپ به راست ولتاژ سرهای آند، کاند و مولتی‌ویبراتور.



شکل ۱۴. کاهش مقاومت آند و افزایش مقاومت کاتد همزمان: از چپ به راست ولتاژ سرهای آند و کاتد.



شکل ۱۵. افزایش مقاومت آند و کاهش مقاومت کاتد همزمان: از چپ به راست ولتاژ سرهای آند و کاتد.

۳. دریافت و تحلیل نتایج

انتخاب این سه المان بویژه دو مقاومت آند و کاتد در مدارهای خاموش کننده فعال به واسطه وجود اطلاعات موجود در مقاله‌های مرتبط با این پژوهش و اهمیت تاثیر این دو المان است که عضو مشترک بین دو مدار خاموش کننده غیرفعال و فعال می‌باشند [۲۱].

نتایج تمامی موارد اعمال شده در شکل‌های (۷) تا (۱۱) که مربوط به سه حالت الف تا ج می‌باشد در جدول شماره (۱) ارائه شده است. در این جمع‌بندی ابتدا مقایسه بین حالت‌های تغییر تک‌المانه است که مطابق با پیشنهادهای مطرح شده در پژوهش‌های صورت گرفته تا کنون پیرامون مدارهای خاموش کننده فعال می‌باشد. با مشاهده جدول (۱) و بررسی تاثیر هر کدام از المان‌ها به صورت مجزا بر روی عملکرد خروجی‌ها به‌طور خلاصه به نتایج جدول شماره (۲) رسیدیم.

جدول ۱ نتایج حاصل از تغییرهای صورت گرفته در مدار خاموش کننده فعال شبیه‌سازی شده.

سیگنال خروجی کاتد			سیگنال خروجی آند		
ولتاژ مثبت	زمان	ولتاژ منفی	زمان	ولتاژ شروع	عوامل متغییر
افزایش	کاهش	افزایش	کاهش	افزایش	کاهش مقاومت آند
کاهش	افزایش	کاهش	افزایش	کاهش	افزایش مقاومت آند
کاهش	---	افزایش	---	---	کاهش مقاومت کاتد

افزایش	---	کاهش	---	---	افزایش مقاومت کاتد
---	کاهش	کاهش	افزایش	---	سرعت سوئیچ زنی

جدول ۲. نتایج حاصل از تغییرات مقاومت کاتد در مدار خاموش‌کننده فعال گایگرمولر.

افزایش Rc	کاهش Rc	پارامترهای تغییر یافته
افزایش	کاهش	دامنه ولتاژ پالس منفی کاتد
افزایش	کاهش	دامنه ولتاژ مثبت پالس کاتد

با مشاهده نتایج ارائه شده در جدول فوق کاملاً مشهود است که تغییرات مقاومت دو سر کاتد در این مدار بر روی نمودار خروجی دو سر آند گایگرمولر به‌طور کامل و همچنین بر مشخصه‌های زمانی نمودارهای دو سر کاتد گایگرمولر بی‌تاثیر است و فقط بر میزان ولتاژهای حاصله در زمان وصل ترانزیستورهای سوئیچ (پالس منفی دو سر خروجی کاتد) و قطع ترانزیستورهای سوئیچ (پالس مثبت دو سر خروجی کاتد) به‌طور مستقیم تأثیرگذار است و در واقع نقش ضریب تقویتی سیگنال را ایفا می‌کند. این امر نشانگر این مطلب است که پیشنهاد کنترل زمان مرده با اعمال تغییرات مشخص در مقاومت RC در بعضی از مطالعات صورت گرفته بسیار قدیمی، البته در این بازه‌ی محدود، غیر کاربردی است هر چند تغییرات ولتاژی آن جای بحث و بررسی دارد.

جدول ۳. نتایج حاصل از تغییرات مقاومت آند در مدار خاموش‌کننده فعال گایگرمولر.

افزایش Ra	کاهش Ra	پارامترهای تغییر یافته
افزایش	کاهش	زمان شارژ پالس آند
کاهش	افزایش	ولتاژ شروع کننده پالس آند
افزایش	کاهش	ولتاژ منفی پالس کاتد
کاهش	افزایش	ولتاژ مثبت پالس کاتد
کندتر	سریعتر	زمان شروع پالس مثبت کاتد
افزایش	کاهش	مدت شارژ پالس مثبت کاتد

ولیکن مطابق نتایج حاصل از جدول (۳) اهمیت میزان تأثیرگذاری تغییرات مقاومت آند آشکارساز گایگرمولر مشهود است و با پیشنهاد پژوهشگران سابق (نهر و همکاران) همراستا و همسو می‌باشد. برخلاف مقاومت کاتد، تغییرات مقداری مقاومت آند بر پارامترهای فیزیکی هر دو مقاومت تأثیرگذار است.

یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های سیگنال خروجی، ولتاژ شروع کننده است که با کاهش مقدار آن امکان رصد افت ولتاژهای کمتر نیز فراهم می‌باشد که این اتفاق با افزایش مقدار مقاومت Ra صورت می‌پذیرد و این نتیجه هم منطبق با پیشبینی‌های مطرح شده در مقاله‌ها [۲۳، ۲۲] می‌باشد.

طرح اصلی پیشنهادی این پژوهش اعمال تغییرات هم‌زمان هر دو مقاومت به منظور دریافت میزان مطلوب‌تر کاهش زمان مرده در آشکارساز است. لذا با این هدف شرایط حالت تعریف شده "د" در قالب ۴ مرحله به صورت زیر مورد بررسی قرار گرفت:

د-۱) کاهش هم‌زمان هر دو مقاومت آند و کاتد (شکل (۱۲)).

د-۲) افزایش هم‌زمان هر دو مقاومت آند و کاتد (شکل (۱۳)).

د-۳) کاهش مقاومت آند و افزایش مقاومت کاتد (شکل (۱۴)).

د-۴) افزایش مقاومت آند و کاهش مقاومت کاتد (شکل (۱۵)).

جمع‌بندی مقایسه‌های حاصل از آنالیز نمودارهای حاصل از شکل‌ها و نمودارهای (۱۲) تا (۱۵)، به‌طور خلاصه در جدول (۴) ارائه می‌گردد.

جدول ۴. نتایج حاصل از تغییرات هم‌زمان مقاومت‌های آند و کاتد مطابق حالات د-۱ تا د-۴.

پارامترهای تغییر یافته	حالت الف	حالت ب	حالت ج	حالت د
زمان شارژ پالس آند	کاهش	افزایش	کاهش	افزایش
ولتاژ شروع‌کننده پالس آند	افزایش	کاهش	افزایش	کاهش
ولتاژ منفی پالس کاتد	کاهش	افزایش	افزایش	کاهش
ولتاژ مثبت پالس کاتد	کاهش	افزایش	افزایش	کاهش
زمان شروع پالس مثبت کاتد	سریع‌تر	کندتر	سریع‌تر	کندتر
مدت شارژ پالس مثبت کاتد	کاهش	افزایش	کاهش	افزایش

با مقایسه نتایج جداول (۳) و (۴) مشخص می‌شود همان‌طور که قبلاً بیان شد، در تغییر هم‌زمان دو مقاومت، تغییرات مقداری مقاومت کاتد مجدداً در نتایج حاصله به‌جز در موارد مشخص‌شده در جدول (۳) تقریباً بی‌تاثیر است. بنابراین به‌طور خلاصه و با جمع‌بندی نتایج معلوم می‌گردد که:

۱- حالت د-۱ مشابه حالت افزایش مقاومت آند به تنهایی است و فقط مشخصه ولتاژ پالس مثبت دو سر کاتد تحت تاثیر مستقیم تغییرات مقاومت کاتد می‌باشد.

۲- حالت د-۲ مشابه حالت کاهش مقاومت آند به تنهایی است و فقط مشخصه ولتاژ پالس مثبت دو سر کاتد تحت تاثیر مستقیم تغییرات مقاومت کاتد می‌باشد.

۳- حالت د-۳ مشابه حالت کاهش مقاومت آند به تنهایی است و فقط مشخصه ولتاژ پالس منفی دو سر کاتد تحت تاثیر معکوس تغییرات مقاومت کاتد است.

۴- حالت د-۴ مشابه حالت افزایش مقاومت آند به تنهایی است و فقط مشخصه ولتاژ پالس منفی دو سر کاتد تحت تاثیر مستقیم معکوس مقاومت کاتد است.

با توجه به مطالب گفته‌شده به این نتیجه می‌توان رسید که با افزایش مقاومت آند و کاهش مقاومت کاتد به‌طور هم‌زمان می‌توان بهترین حالت ممکنه را برای کنترل زمان دشارژ کاتد و به‌طبع کنترل زمان مرده فراهم کرد، البته میزان و شدت این بهینه‌سازی نیاز به محاسبات و برآورد دقیق تئوری نیز دارد.

۴. نتیجه‌گیری

در نهایت با به دست آوردن میزان درصد تغییرات اعمال شده با استفاده از نرم‌افزار اکسل مطابق جدول (۵)، تاثیر تغییرات هم‌زمان افزایش مقاومت آند و کاهش مقاومت کاتد بسیار مطلوب‌تر از سایر موارد می‌باشد چرا که دارای ولتاژ شروع کمتر، زمان شارژ بیشتر آند و زمان شارژ کمتر کاتد می‌باشد. تغییر مقادیر ولتاژی پالس کاتد در هر دو قسمت مثبت و منفی پیک آن کمترین افت دامنه را ایجاد می‌نماید. این تغییرات را بسیار موثر در کنترل زمان بازیابی و به طبع آن زمان مرده (طبق فرمول: زمان برطرف سازی = زمان مرده + زمان بازیابی) می‌توان دانست.

جدول ۵. نتایج حاصل از تغییرات هم‌زمان مقاومت‌های آند و کاتد مطابق حالت‌های الف تا د.

پارامترهای تغییر یافته	زمان شارژ آند	ولتاژ شروع آند	ولتاژ مثبت کاتد	ولتاژ منفی کاتد	زمان شارژ کاتد
کاهش Ra به تنهایی	-۶۶.۷٪	-۲۰.۰٪	-۷۱.۴٪	+۱۶.۰٪	-۷.۰٪
کاهش Ra و کاهش Rc	-۷۵٪	+۱۶۷٪	-۸۵٪	-۵۷٪	-۷۵٪
کاهش Ra و افزایش Rc	-۶۶.۷٪	+۲۰.۰٪	+۶۲.۵٪	+۱۲۸.۶٪	-۷.۰٪
افزایش Ra به تنهایی	+۴۶٪	-۶۱٪	-۵۸.۸٪	+۱۱.۰٪	+۱۵.۰٪
افزایش Ra و کاهش Rc	+۱۴۵.۸٪	-۶۰٪	-۲۰٪	-۵۷٪	+۱۲.۰٪
افزایش Ra و افزایش Rc	+۱۳۳٪	-۶۷٪	+۲۰.۰٪	+۱۷۷٪	+۱۴.۲٪

در واقع افزایش ۱۲۰٪ زمان شارژ و کاهش ۵۷٪ زمان دشارژ پالس مثبت در سیگنال خروجی نشانگر کاهش ۳۷٪ زمان مرده نسبت به نمونه موجود بود، که قطعاً در کنار طرح تایید شده، استفاده از تکنولوژی سوئیچ‌های سریع باعث سرعت فرایند بهینه‌سازی مطلوب این پژوهش می‌گردد.

قابل ذکر است به صورت ریزبینانه‌تر می‌توان تمامی مشخصه‌های ریز نمودارهای حاصل از تغییرات اعمال شده (به‌عنوان مثال دامنه ولتاژهای مختلف) در این مقاله را از جنبه‌های مختلف دیگر مورد بررسی قرار داد و از آن‌جا که در این پژوهش محوریت اصلی بررسی تغییرات زمانی بوده است، به‌عنوان کار پژوهشی دیگری بررسی آن به سایر علاقمندان پیشنهاد می‌گردد.

۵. مراجع

1. H. V. NEHER, W. W. HARPER, "A High Speed Geiger-Counter Circuit," PHYSICAL REVIEW, VOLUME 49, 1936.
2. H. V. NEHER, W. H. PICKERING, "Modified High Speed Geiger Counter Circuit," Norman Bridge Laboratory of Physics, California Institute of Technology, 1938.
3. I. A. GETTING, "Multivibrator Geiger Counter Circuit," Research Laboratory of Physics, Harvard University, Cambridge, Massachusetts, 1937.
4. ARTHUR RUARK, "Multivibrator Geiger Counter Circuit," Norman Bridge Laboratory of Physics, California Institute of Technology, 1938.



5. Shoaib Usman & Amol Patil, "Radiation Detector Dead time and Pile Up: A Review of the Status of Science," Nuclear Engineering and Technology, S1738-5733(18)30259-6, **2018**.
6. Sang Hoon Lee, Robin P. Gardner, "A new $G \pm M$ counter dead time model," Applications of Radioisotopes, 53 (2000) 731±737, **2000**.
7. T. Akyurek, M. Yousaf, X. Liu, S. Usman, "GM counter dead time dependence on applied voltage, operating temperature and fatigue," Radiation Measurements 73 (2015) 26e35, **2014**.
8. S. Usman, B. Almutairi, T. Akyurek, "A New Phenomenological Model for Geiger-Müller Dead time", Advancements in Radiation Measurement and Imaging Technology, Transactions of the American Nuclear Society, Vol. 117, Washington, D.C., October 29–November 2, **2017**.
9. M. Yousaf, T. Akyurek, S. Usman, A comparison of traditional and hybrid radiation detector dead-time models and detector behavior, Progress in Nuclear Energy, 83 (**2015**) 177-185
10. H. MAIER-LEIBNITZ, "A New Quenching Circuit for Geiger Counters," THE REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, VOLUME 19, NUMBER 8, **1948**.
11. K. MATTHEWS, "A Two-Transistor Geiger-Muller Counter Quench Circuit," THE REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, **1969**.
12. D. Barclay, Improved response of Geiger Muller detectors, Nuclear Science, IEEE Transactions on, 33 (1986) 613-616.
13. D.H. Wilkinson, "The Geiger discharge revisited Part I. The charge generated," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A321 (1992) 195-210, **1992**.
14. D.H. Wilkinson, "The Geiger discharge revisited Part II. Propagation," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 383 (1996) 516-522, **1996**.
15. D.H. Wilkinson, "The Geiger discharge revisited Part III. Convergence," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 383 (1996) 523-527, **1996**.
16. D.H. Wilkinson, "The Geiger discharge revisited Part IV. The fast component," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research 435 (1999) 446}455, **1999**.
17. O. Vagle, Ø. Olsen, G.A. Johansen, "A simple and efficient active quenching circuit for Geiger-Mu" ller counters," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A 580 (2007) 358–361, **2007**.
18. <https://www.drct.com/GM-tubes/Centronic.html>, "Centronic GM-Tubes (ZP Series)".
19. G.A. Johansen, O. Vagle, Ø. Olsen, M.B. Holstad, I. Meric, "Geiger Müller detectors for gamma ray tomography," ELECTRICITY, BOOK 114, SPECIAL ISSUE Tomography, ISSN 0374-4817, **2009**.
- 20 G. F. Knoll, Radiation Detection and Measurement, John Wiley & Sons Inc., **2000**.
21. V. G. Brovchenko, A. M. Kirichenko, and M. M. Tsygankov, "A Circuit for External Quenching of the Discharge in the Geiger–Muller Counter", Instruments and Experimental Techniques, Vol.45, No. 2, pp. 175–177, **2002**.
22. I. Meric, G. A. Johansen, M. B. Holstad, A. F. Calderon and R. P. Gardner, "Enhancement of the intrinsic gamma-ray stopping efficiency of Geiger-Müller counters," Elsevier B.V., **2012**.
23. Newaz Morshed Remon, "Build very simple design and cost effective geiger-muller counter," Research Journal of Applied Sciences, **2018**.