دستور کار آزمایشگاه

مدار و اندازه گیری الکتریکی

تهیه و تنظیم:

شیما رضایی

مجید عباس‌عظیمی

امیر عباس شایگانی اکمل

پاییز ۱۳۹۷

فهرست مطالب

مقررات آزمایشگاه ۱

مقدمه ۵

آشنایی مقدماتی با نرم افزار Multisim ۱۳

۱ آشنایی با اسیلوسکوپ ۲۱

۲ آشنایی با مولتی متر های دیجیتال ۳۸

۳ مدار های مقاومتی ۴۸

۴ مدار های غیر خطی ۵۵

۵ تقویت کننده های عملیاتی ۶۱

۶ پاسخ زمانی مدار های مرتبه اول ۶۷

۷ پاسخ زمانی مدار های مرتبه دوم ۷۲

۸ پاسخ فرکانسی مدار های مرتبه اول ۸۱

۹ پاسخ فرکانسی مدار های مرتبه دوم و تطبیق امپدانسی ۹۴

۱۰ تایمر ۵۵۵ ..... ۱۱۲

۱۱ مدار های سه فاز ۱۱۸

مقررات آزمایشگاه

- پیش‌گزارش‌ها

- نرم افزار مورد استفاده: *Multisim*
- زمان تحویل: **قبل از شروع آزمایش** (پس از شروع آزمایش **تحویل گرفته نمی‌شود**)
- نحوه انجام: **گروهی**
- باید بر اساس **گروه ثبت نامی** خود (یکشنبه ۱۳-۱۶ (۰۱)، دوشنبه ۱۳-۱۶ (۰۲)، سه‌شنبه ۱۳-۱۶ (۰۳)، چهارشنبه ۸:۱۵-۱۱:۱۵ (۰۴)، شنبه ۱۳-۱۶ (۰۵)) و گروه‌بندی انجام شده در آزمایشگاه (**زوج**: *B,D,F,H* یا **فرد**: *A,C,E,G*)، **تمرینات مربوط به گروه خود** را انجام دهید.
- پیش‌گزارش‌های دریافتی که **صفحه زمینه** منحنی‌های آن به رنگ مشکی باشد، **تصحیح نمی‌گردد** و **نمره صفر** به آن تعلق می‌گیرد.

- گزارش‌کارها

- نحوه انجام: **گروهی**
- زمان تحویل: **ابتدای جلسه بعد**
- **تأخیر تحویل:** ساعتی ۰,۰۳ کسر می شود و تأخیر تحویل بعد از ساعت اداری (۱۵:۳۰) در ایام هفته معادل تأخیر تحویل ۸ صبح فردای آن روز و تأخیر تحویل بعد از ساعت اداری (۱۵:۳۰) چهارشنبه معادل تأخیر تحویل ۸ صبح شنبه محاسبه می‌شود.
- در صورت بسته بودن درب آزمایشگاه، گزارش‌کارها را از زیر درب به داخل بیندازید.
- نمره پیش‌گزارش و گزارش‌کار گروه‌هایی که **مشابه** هم باشند یا تنها بخشی از آنها شبیه هم باشد، صفر خواهد شد.

- اطلاعات لازم به ذکر در صفحه اول گزارش‌کار و پیش‌گزارش

۱- **نوع گزارشی** که تحویل داده‌اید: گزارش‌کار- پیش‌گزارش

۲- **کد ۳ بخشی** به صورت زیر:

☐ ------- ☐ ------- ☐

شماره آزمایش نام گروه شماره گروه

ثبت نامی آموزش

به عنوان مثال: ۴-A-۰۱

* شماره گروه بر اساس گروه ثبت نامی آموزش به صورت ۰۱، ۰۲، ۰۳ و ..... می‌باشد.

* نام گروه بر اساس گروه ثبت نام شده در جلسه گروه‌بندی به صورت A، B، C و .... می‌باشد.

۳- نام **اعضای گروه**

*گزارش‌هایی که فاقد مشخصات ذکر شده باشد، **تصحیح نمی‌گردند**.

- کوییز

بدون اطلاع قبلی، در ابتدای جلسه و از نکات مربوط به **آزمایش همان روز و آزمایش جلسه قبل** گرفته می‌شود.

- نحوه محاسبه نمرات

- جدول ریز نمرات آزمایشگاه به صورت زیر می‌باشد:

گزارش کار + بخش‌های نمره مثبت	پیش‌گزارش + بخش‌های نمره مثبت	کوییز	امتحان پایان ترم	نمره منفی غیبت، تأخیر در ورود و تعجیل در خروج	نمره منفی تأخیر تحویل گزارش کار	نمره منفی عدم جابه‌جایی وسایل، صندلی‌های آزمایشگاه و میز کار در پایان آزمایش	نمره منفی عدم فعالیت در کلاس	نمره مثبت فعالیت‌های اضافه و تحقیق و پروژه‌های مرتبط با آزمایشگاه	نمره مثبت شرکت در نظرسنجی اینترنتی آخر ترم
متغیر (وابسته به عملکرد دانشجویان)	متغیر (وابسته به عملکرد دانشجویان)	متغیر (وابسته به عملکرد دانشجویان)	متغیر (وابسته به عملکرد دانشجویان)	مطابق توضیحات صفحه بعد	ساعتی ۰,۰۳ نمره	متغیر	متغیر	متغیر	۰,۳

- **تأخیر ورود و خروج**: به ازای ۵ دقیقه اول ۰,۱ نمره و بعد از آن تا ۳۰ دقیقه به ازای هر ۵ دقیقه ۰,۱ نمره از نمره نهایی کسر می شود و بعد از ۳۵ دقیقه غیبت محسوب می‌گردد. (به طور مثال بعد از ۲۰ دقیقه ۰,۳ نمره و بعد از ۳۰ دقیقه ۰,۵ نمره کسر می‌گردد.)

- **غیبت:** ضمن از دست دادن نمره پیش‌گزارش، گزارش‌کار و کوئیز مربوط به آن آزمایش، ۰,۵ نمره دیگر نیز از نمره کل، کسر خواهد شد.

- فقط غیبت‌هایی قابل جبران است که از نظر مسئول آزمایشگاه موجه باشد. با توجه به اینکه در طول هر هفته تمام گروه‌های ثبت‌نامی آزمایش یکسانی را انجام می‌دهند، لذا جهت جبران غیبت موجه دانشجو موظف است با هماهنگی مسئول آزمایشگاه و در صورت وجود جای خالی حتماً در یکی از جلسات همان هفته شرکت کند. پس از گذشت هفته مورد نظر امکان جبران غیبت به هیچ عنوان میسر نخواهد بود.

- در صورتی‌که غیبت شما پس از بررسی مسئول آزمایشگاه غیرموجه اعلام شود، اگر دانشجو بتواند آزمایش را با یکی از گروه‌ها (در صورت امکان جابه‌جایی) یا در نهایت به صورت انفرادی انجام دهد، تنها نمره پیش‌گزارش، گزارش‌کار و کوئیز مربوط به آن آزمایش از او کسر شده و ۰,۵ نمره منفی غیبت از او کسر نمی‌گردد.

- آزمایش‌ها

- در صورتی که هر کدام از وسایل آزمایشگاه دچار مشکل گردید، موضوع باید بلافاصله به اطلاع سرپرست آزمایشگاه برسد.
- قبل از شروع آزمایش هر دانشجو باید دستور آزمایش را با دقت مطالعه نمایند.

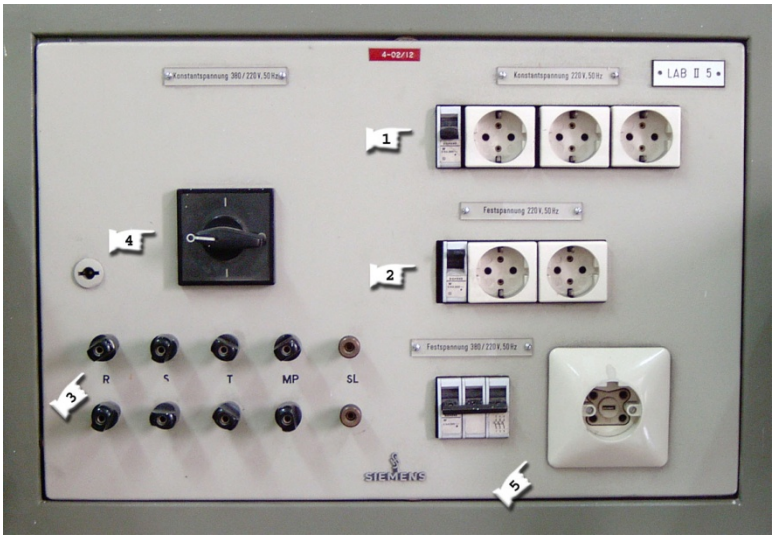
- جلوگیری از حوادث

- انتخاب وسایل مورد احتیاج برای هر آزمایش و تغییر اتصالات مدار بایستی فقط به دستور و حضور سرپرست آزمایش صورت گیرد.
- به قسمت‌هایی که احتمال برق‌گرفتگی در آنها وجود دارد نباید دست زد. تعویض وسایل آزمایش بایستی فقط در حالت قطع مدار صورت گیرد.
- در صورت وقوع خطر، مدارها باید فوراً قطع شوند. برای قطع برق دکمه اضطراری را فشار دهید.

مقدمه

آشنایی با برخی تجهیزات

✓ تابلوی برق



شکل(۱): یک نمونه تابلوی برق

شکل بالا تصویری از تابلوی برق آزمایشگاه مدار را نمایش می‌دهد. اجزای تابلوی برق که با شماره در تصویر مشخص شده اند به شرح زیر است:

۱- ولتاژ کاملا ثابت ۲۲۰ ولت تک فاز به همراه فیوز مینیاتوری قطع و وصل آن. وضعیت پایین فیوز به معنای قطع برق می‌باشد. سعی کنید پس از کنترل تمامی اتصالات از فیوز برای اتصال جریان برق استفاده کنید.

۲- برق متناوب تک فاز با ولتاژ حدوداً ۲۲۰ ولت به همراه فیوز مینیاتوری قطع و وصل.

۳- برق سه‌فاز. نمادهای R، S و T هر یک از خطوط فاز را نمایش می‌دهند. خط MP نول مدار و SL مسیر یا سیم زمین را نشان می‌دهد. این پایانه دارای آمپر بالا بوده و دو سیستم سه‌فاز را در دسترس قرار می‌دهد.

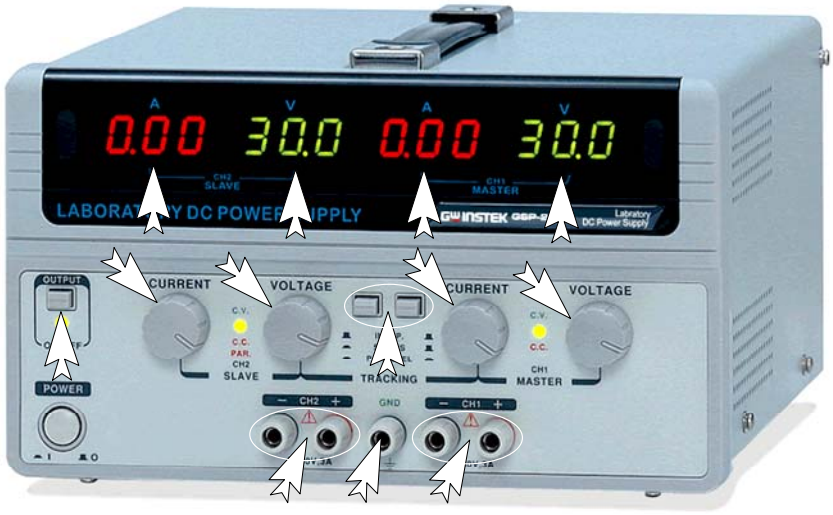
۴- کلید گردان، برای اتصال برق سه‌فاز به خروجی‌های تابلوی برق که در بند قبلی ذکر شدند. مقدار صفر قطع برق را نشان می‌دهد.

۵- پریز برق سه‌فاز با آمپر ۱۶ و سیم نول

✓ منبع تغذیه *DC*

منبع تغذیه DC یک منبع ولتاژ یا یک منبع جریان با دامنه قابل تنظیم است. یک نمونه منبع تغذیه در شکل (۲) نشان داده شده است که دارای دو خروجی است و می‌تواند تواماً هم به عنوان منبع ولتاژ (۰ تا ۳۰ ولت) و هم منبع جریان (۰ تا ۳ آمپر) مورد استفاده قرار گیرد. این دو منبع می‌توانند به هم وابسته شوند و

منابع ولتاژ سری و یا منابع جریان موازی به وجود آورند. در این حالت منبع سمت راست به عنوان منبع اصلی در نظر گرفته می‌شود و باید مقادیر ولتاژ و جریان از صفحه نمایش این منبع قرائت شوند. عملکرد مهمترین قسمت‌های این دستگاه در ادامه ذکر شده است.



شکل (۲): یک نمونه منبع تغذیه *DC*

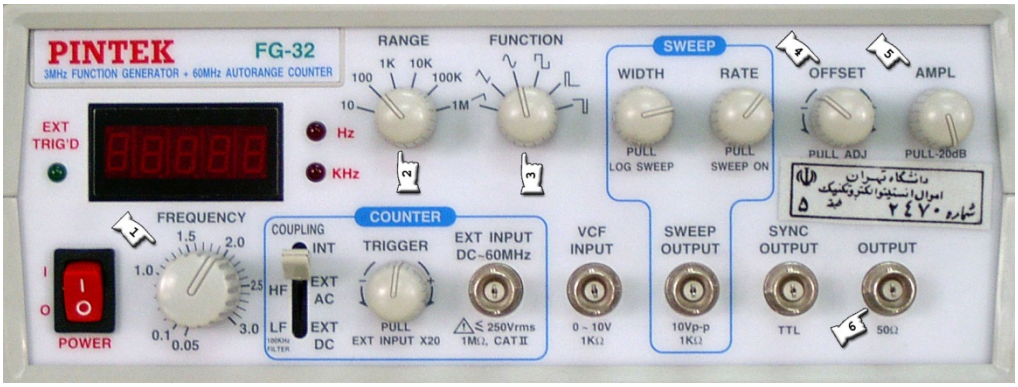
۱- کلید قطع و وصل خروجی (در حالت قطع با وجود روشن بودن دستگاه، خروجی‌ها صفر خواهند بود.)
۲- تنظیم مقدار دامنه ولتاژ خروجی
۳- تنظیم حداکثر جریان خروجی
۴- نمایشگر مقدار دامنه ولتاژ خروجی کانال ۱
۵- نمایشگر مقدار دامنه ولتاژ خروجی کانال ۲
۶- نمایشگر حداکثر جریان خروجی کانال ۱
۷- نمایشگر حداکثر جریان خروجی کانال ۲
۸- سرهای مثبت و منفی خروجی کانال ۱
۹- سرهای مثبت و منفی خروجی کانال ۲
۱۰-سیم زمین
۱۱-دکمه‌های ارتباط دهنده دو کانال:

*زمانی که هر دو بیرون باشند، دو کانال مستقل کار می‌کنند
*زمانی که فقط دکمه چپ داخل باشد، منابع ولتاژ سری می‌شوند و حداکثر تا ۶۰ ولت ولتاژ می‌دهند.
*زمانی که هر دو دکمه داخل باشند، منابع جریان موازی می‌شوند و حداکثر تا ۶ آمپر جریان می‌دهند.

برای تنظیم حداکثر جریان خروجی هر منبع می‌توان سرهای مثبت و منفی مربوط به آن منبع را اتصال کوتاه کرد و با دکمه‌های ۳ حداکثر جریان را تعیین کرد.

✓ سیگنال ژنراتور

سیگنال ژنراتور یا مولد سیگنال دستگاهی است برای تولید شکل موج‌های متناوب مختلف که قابلیت تنظیم فرکانس، دامنه و ولتاژ *Offset* را دارد. شکل‌های زیر نمونه‌هایی از سیگنال ژنراتورها را نمایش می‌دهند که شرح عملکرد مهمترین اجزای آنها ذکر شده است.



شکل(۳): یک نمونه سیگنال ژنراتور

۱- درجه تنظیم فرکانس ولتاژ تولید شده
۲- درجه تنظیم محدوده و اشل فرکانس موج تولیدی
۳- تعیین شکل موج دلخواه
۴- تعیین مقدار *Offset* و ولتاژ ثابت جمع شونده با *AC*
۵- تنظیم مقدار دامنه ولتاژ خروجی تولید شده
۶- موج خروجی از این محل قابل استفاده می‌باشد.

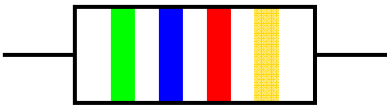
شکل (۴): یک نمونه دیگر از سیگنال ژنراتورهای آزمایشگاهی

✓ مقاومتها

برای مشخص کردن مقدار یک مقاومت از نوارهای رنگی روی آن استفاده می‌شود این رنگ‌ها بدین ترتیبند:

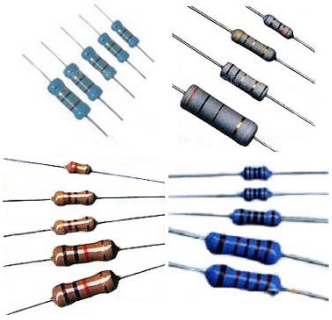
سفید	خاکستری	بنفش	آبی	سبز	زرد	نارنجی	قرمز	قهوه‌ای	سیاه
۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	۰

رنگ آخر که معمولا طلایی یا نقره‌ای است تلرانس یا درصد خطای مقاومت را مشخص می‌کند. بدین‌صورت که اگر آخرین رنگ طلایی باشد درصد خطا ۵٪ ، اگر نقره‌ای باشد درصد خطا ۱۰٪ ، اگر قهوه‌ای باشد درصد خطا ۱٪ باشد اگر قرمز باشد درصد خطا ۲٪ می‌باشد. برای خواندن مقدار مقاومت با چهار باند رنگی، مقدار اولین و دومین رنگ را نوشته و به ازای رنگ سوم به همان تعداد صفر می‌گذاریم، مثلاً :



طلایی قرمز آبی سبز

$$۵۶۰۰\,\Omega = ۵/۶\ K\Omega\ \ (\pm ٪۵)$$



شکل (۵): انواع مقاومتها، یک نوع مقاومت کربنی و نحوه خواندن مقدار آن

مقاومت‌های معمولی به هر اندازه دلخواه در بازار موجود نیستند بلکه مقادیر نرم شده‌ای از آنها وجود دارند که بدین ترتیبند:

۱ ۱/۲ ۱/۵ ۱/۸ ۲/۲ ۲/۷ ۳/۳ ۴/۷ ۵/۶ ۶/۸ ۸/۲

و کلیه مضارب اعشاری آنها، مثلاً مقاومت‌های $۲/۷\Omega$، ۲۷Ω، ۲۷۰Ω، $۲/۷K\Omega$ و . . . موجود هستند ولی فرضاً مقاومت معمولی ۳۰Ω در بازار یافت نمی‌شود و اگر این مقدار را لازم دارید یا باید مقاومت‌های نرم را سری موازی کنید یا اینکه باید در مجموعه مقاومت‌های نرم، نزدیکترین مقدار به آن را انتخاب کنید (اینجا ۲۷ یا ۳۳ اهم) و دوباره مدارتان راتحلیل کنید و جوابش را بدست آورید.

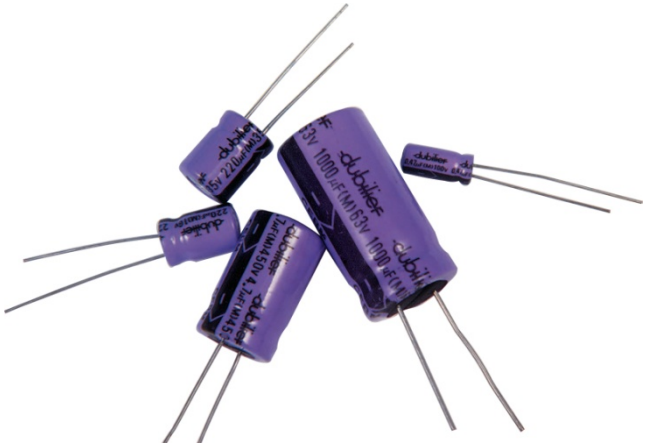
توجه به حداکثر توانی که مقاومت می‌تواند تلف کند نیز مهم است معمولاً مقاومت‌های کوچکی که درآزمایشگاه بکار می‌روند ۰/۵ و ۰/۲۵ وات هستند.

توجه: اگر مقاومتی دارای ۵ حلقه رنگی باشد، سه حلقه اول معرف رقم اول تا سوم و حلقه چهارم معرف تعداد صفرها و حلقه پنجم معرف تلرانس مقاومت خواهد بود.

✓ خازن‌های الکترولیتی (شیمیایی)

این خازن‌ها برای ظرفیت‌های زیاد بیشتر از μF ۱ ساخته می‌شوند. این خازن‌ها دارای قطب مثبت و منفی هستند، بنابراین هنگام قرار دادن در مدار ابتدا مشخص کنید کدام سر دارای ولتاژ DC بیشتری خواهد بود وخازن را بطور صحیح در مدار قرار دهید. معمولاً پایه منفی دارای یک باند رنگی متفاوت است که بر روی آن علامت منفی درج شده است. علاوه بر این، پایه فلزی متصل به پایه منفی معمولاً کوتاهتر از پایه فلزی متصل به پایه مثبت است.

حداکثر ولتاژ قابل تحمل خازن نیز روی آن قید می‌شود. مثلاً یک خازن V ۱۶ و μF ۱۰۰۰ می‌تواند حداکثر تا ۱۶ ولت را تحمل کند و بکارگیری آن در کمتر از این ولتاژ نیز مجاز است. نشتی این خازن‌ها زیاد است (مقاومت موازی با آن کوچک است) و در فرکانس‌های بالا خوب کار نمی‌کنند.



شکل (۶): خازن‌های الکترولیتی یا شیمیایی

✓ خازن‌های سرامیکی

این خازن‌ها مشخصه ایده‌آل‌تری دارند ولی در ظرفیت‌های کمتر از μF ۱ ساخته می‌شوند و برای فرکانس‌های بالا مناسبند. مقدار ظرفیت نیز به صورت یک عدد سه رقمی روی آنها ذکر می‌شود که رقم اول و دوم دو رقم اول ظرفیت و رقم سوم تعداد صفرها را مشخص می‌کند و عدد بدست آمده برحسب پیکوفاراد، ظرفیت خازن خواهد بود.

مثلاً ۱۵۴ یعنی pF ۱۵۰۰۰۰ که معادل nF ۱۵۰ است یا مثلا ۱۰۴ یعنی nF ۱۰۰ یا μF ۱.

شکل (۷): خازن سرامیکی از نوع عدسی

به طور معمول در کنار عدد سه رقمی یکی از حروف انگلیسی قرار می‌دهند که در روش استاندارد این حروف مقدار تلرانس خازن را نشان می‌دهد. جدول زیر مقدار تلرانس متناسب با هر یک از حروف را نشان می‌دهد. به عنوان مثال $۱۰۳K$ یعنی خازن $۱۰،۰۰۰pF$ با تلرانس $\pm ۱۰٪$ که به این مفهوم است که مقدار خازن عددی بین $۹،۰۰۰pF$ تا $۱۱،۰۰۰pF$ می‌باشد.

حروف انگلیسی درج شده روی خازن	F	G	J	K	M	Z
مقدار تلرانس خازن متناسب با هر یک از حروف	۱٪	۲٪	۵٪	۱۰٪	۲۰٪	+۸۰٪ تا -۲۰٪

✓ پتانسیومترها

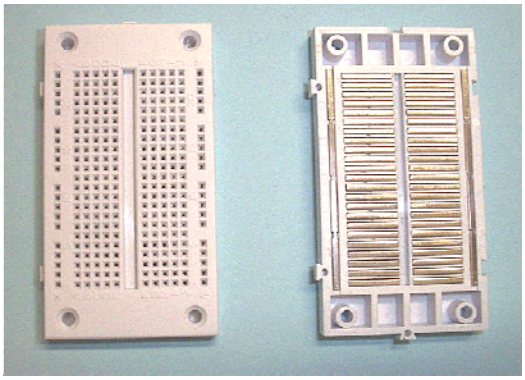
پتانسیومترها مقاومت‌های متغیری هستند که دارای سه پایانه می‌باشند. معمولاً از پتانسیومترها برای تغییر ولتاژ در مدار به طور مثال برای تغییر بلندی صدا (ولوم) در یک سیستم آمپلی‌فایر استفاده می‌شود.
بسته به نوع نیاز، دو سر یا هر سه سر این عنصر می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. یک نمونه از پتانسیومترهای مورد استفاده در آزمایشگاه‌ها مقاومت‌های ده‌دهی هستند (شکل (۶)). در این نوع مقاومتها، یک سلکتور وجود دارد. در زیر سلکتور عددی نوشته شده است که نشان‌دهنده مقیاس مقاومت است؛ به طور مثال اگر سلکتور عدد ۴ را نشان دهد و مقیاس زیر آن ×۱۰۰۰ باشد، آنگاه مقدار مقاومت بین سرهای ۰ و x برابر $۴ \times ۱۰۰۰ = ۴ k\Omega$ و مقدار مقاومت بین سرهای x و ۱۰ برابر $۶ k\Omega = ۱۰-۴$ خواهد بود.

شکل (۸): یک نمونه پتانسیومتر و مدل مداری آن

✓ برد بورد (Bread Board)

برد بورد وسیله‌ای است که به شما در چیدمان اولیه و آزمایشی مدار کمک می‌کند. بیشتر افرادی که در زمینه پروژه‌های الکترونیک کار می‌کنند ابتدا مدار خود را بر روی برد بورد می‌بندند و پس از جواب گرفتن، آن را بر روی مدارات چاپی یا بردهای سوراخدار مسی پیاده می‌کنند. در آزمایشگاه مدار و اندازه‌گیری، تمام

مدارات الکترونیکی بر روی برد بورد بسته می‌شوند. به نحوه ارتباط افقی و عمودی سوراخ‌های موجود بر روی برد توجه کنید (شکل (۹)).



شکل (۹): یک نمونه برد بورد و نحوه ارتباط سوراخ‌های آن

آشنایی مقدماتی با نرم‌افزار *Multisim*

در این بخش مختصری از مهمترین نکات در طراحی و شبیه‌سازی مدارهای الکتریکی توسط محیط نرم‌افزاری *Multisim* بیان شده و این امکان فراهم می‌شود تا قبل از اجرای عملی هر آزمایش و بعد از مطالعه گزارش‌کار، با طراحی و پیاده‌سازی مدار توسط محیط *Multisim* مفاهیم مورد نظر در هر آزمایش را درک و تحلیل نمایید.

✓ *Multisim* چیست؟

Simulation Program for Integrated Circuits Emphasis یا بطور خلاصه *SPICE* نرم افزاری قدرتمند برای شبیه‌سازی مدارهای مختلف آنالوگ و دیجیتال می‌باشد. ویرایش‌های مختلف این نرم‌افزار ابزار مناسبی در اختیار مهندسین برق امروزی است. دو نسخه معروف آن شامل *Multisim* کاری از شرکت *National Instrument* و *Hspice* کاری از شرکت *Avant* می‌باشند و به ترتیب برای کارهای آموزشی-پژوهشی و کارهای صنعتی کاربرد روزافزونی پیدا کرده‌اند. در آزمایشگاه مدار و اندازه‌گیری *Multisim* جایگزین نرم‌افزار قدیمی *Pspice* از شرکت *Microsim* شده‌است. لازم به ذکر است که در اکثر کتاب‌های امروزی مدار از این نرم‌افزار و نرم‌افزار *Matlab* برای شبیه‌سازی استفاده می‌شود و هر دو *Help* جامعی دارند که برای کاربران بسیار مفید می‌باشد.

✓ آماده سازی شماتیک برای طراحی مدار

هنگامی که نرم‌افزار اجرا می‌شود، به صورت خورکار شماتیک جدیدی برای ترسیم با اسم *Design*۱ به وجود می‌آید، برای ایجاد شماتیک جدید می‌توانید از *Ctrl+N* یا *File->New->Design* استفاده کنید. برای باز کردن شماتیک ذخیره شده از طریق منوی *File* اقدام نمایید. لازم به ذکر است فایل‌های شماتیک دارای پسوند *ms*۹، *ms*۱۰ و *ms*۱۱ می‌باشند که عدد آخر آن مربوط به نسخه نرم‌افزار مورد استفاده است، نسخه شماره ۱۱ مربوط به سال ۲۰۱۰ می‌باشد.

✓ انتقال شماتیک به فایل *WORD*

برای انتقال مدارهای طراحی شده توسط *Multisim* به محیط‌های نرم‌افزاری دیگر شامل *word*، تنها کافیست قطعات مورد نظر یا تمام مدار (*Ctrl+A*) را انتخاب کرده و همانند تمام نرم‌افزارهای امروزی کپی کرده (*Ctrl+C*) و منتقل کنید (*Ctrl+V*).

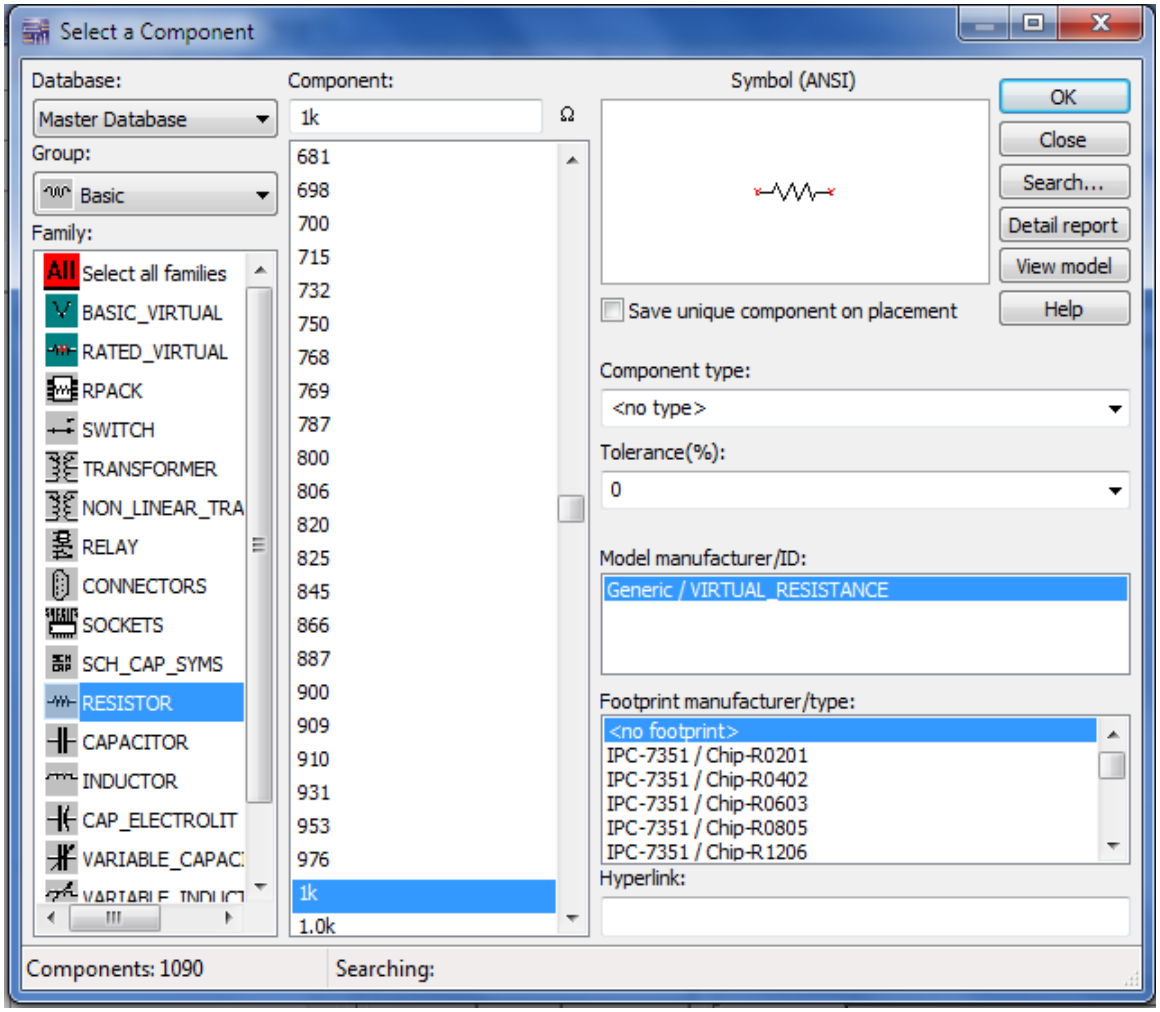
✓ طراحی مدار در شماتیک باز شده

برای طراحی مدار مورد نظر خود باید اجزای آن را در ابتدا تعیین و در صفحه بچینید. برای این منظور نوار ابزار قطعات را که در شکل زیر نشان داده شده، از مسیر زیر فعال کنید:

View-> Toolbars-> Components & Virtual

سپس بر روی نماد مورد نظر در نوار ابزار قطعات کلیک کنید و یا با فشردن *Ctrl+W* این کار را انجام دهید.

در ادامه پنجره زیر باز می‌شود:



پس از انتخاب قطعه مورد نظر، با کلیک بر روی دکمه *OK* یا فشار دادن *Enter* می‌توانید المان مورد نظر را در بخش‌های مختلف مدار و صفحه شماتیک قرار دهید.

- برای دوران دادن هر المان در صفحه جاری با انتخاب آن المان و فشردن کلیدهای *Ctrl+R* یا *Ctrl+Shift+R* می‌توانید این کار را انجام دهید.
- برای آینه کردن المان و یا بخش‌هایی از مدار نیز با انتخاب آنها و فشردن *Ctrl+Y* یا *Ctrl+X* می‌توانید این کار را انجام دهید.
- حذف کردن هر المان با فشردن کلید *delete* بعد از انتخاب المان انجام می‌پذیرد.
- برای انتخاب منبع ولتاژ ثابت می‌توانید از المان *Source-> DC_Power* استفاده نمایید.
- برای منابع جریان و یا ولتاژ وابسته از *E*، *F*، *G* و *H* استفاده می‌شود که به ترتیب منبع ولتاژ وابسته به ولتاژ، منبع جریان وابسته به جریان، منبع جریان وابسته به ولتاژ و منبع ولتاژ وابسته به جریان می‌باشند.*(Source-> Controlled)*

- منبع ورودی پله‌ای با عنوان *Pulse_Voltage* معرفی می‌شود.

برای برقراری اتصالات بین اجزای مختلف مدار یا تنها بر روی سرهای قطعات کلیک کرده یا نقطه اتصالی دیگر به جز سرها در مدار بسازید، *Ctrl+J* یا *Ctrl+Shift+W* را فشار دهید و یا در منوی نرم‌افزار گزینه *Place->Wire* را انتخاب کنید. برای حذف یک اتصال آن را انتخاب کرده و *delete* را بزنید.

برای تغییر نام، مقدار و یا پارامترهای هر المان باید بر روی هر یک از موارد ذکر شده دوبار کلیک کنید. به این ترتیب می‌توانید نام، مقدار و پارامترهای مدار را تغییر دهید. در محیط *Multisim* مخففهای زیر از پیش تعریف شده اند:

m: میلی	u: میکرو	n: نانو	p: پیکو
	G: گیگا	M: مگا	k: کیلو

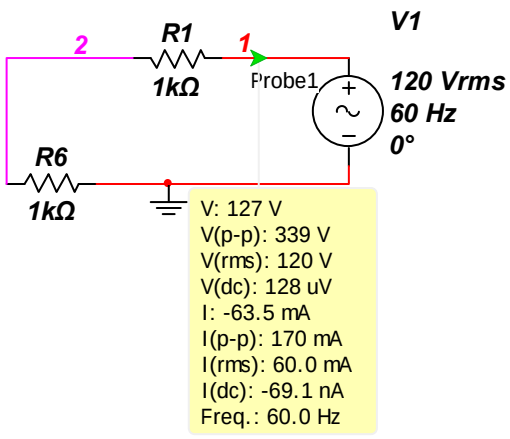
✓ تحلیل مدارهای طراحی شده

۱- در تحلیل مدارهای طراحی شده نخست گره‌هایی از مدار را که برایتان دارای اهمیت است نام و یا علامت‌گذاری کنید. با انتخاب هر سیم، راست کلیک و انتخاب *Properties* یا *Ctrl+M* می‌توانید برای آن سیم نامی اختیار کرده و در تحلیل‌های ولتاژ استفاده نمایید، در غیر این صورت نام آن عدد نمایش داده شده خواهد بود. علاوه بر این از نام قطعات نیز می‌توان به منظور مشخص کردن جریان شاخه‌ها استفاده کرد، ، به عنوان مثال جریان گذرنده از خازن $C1$.

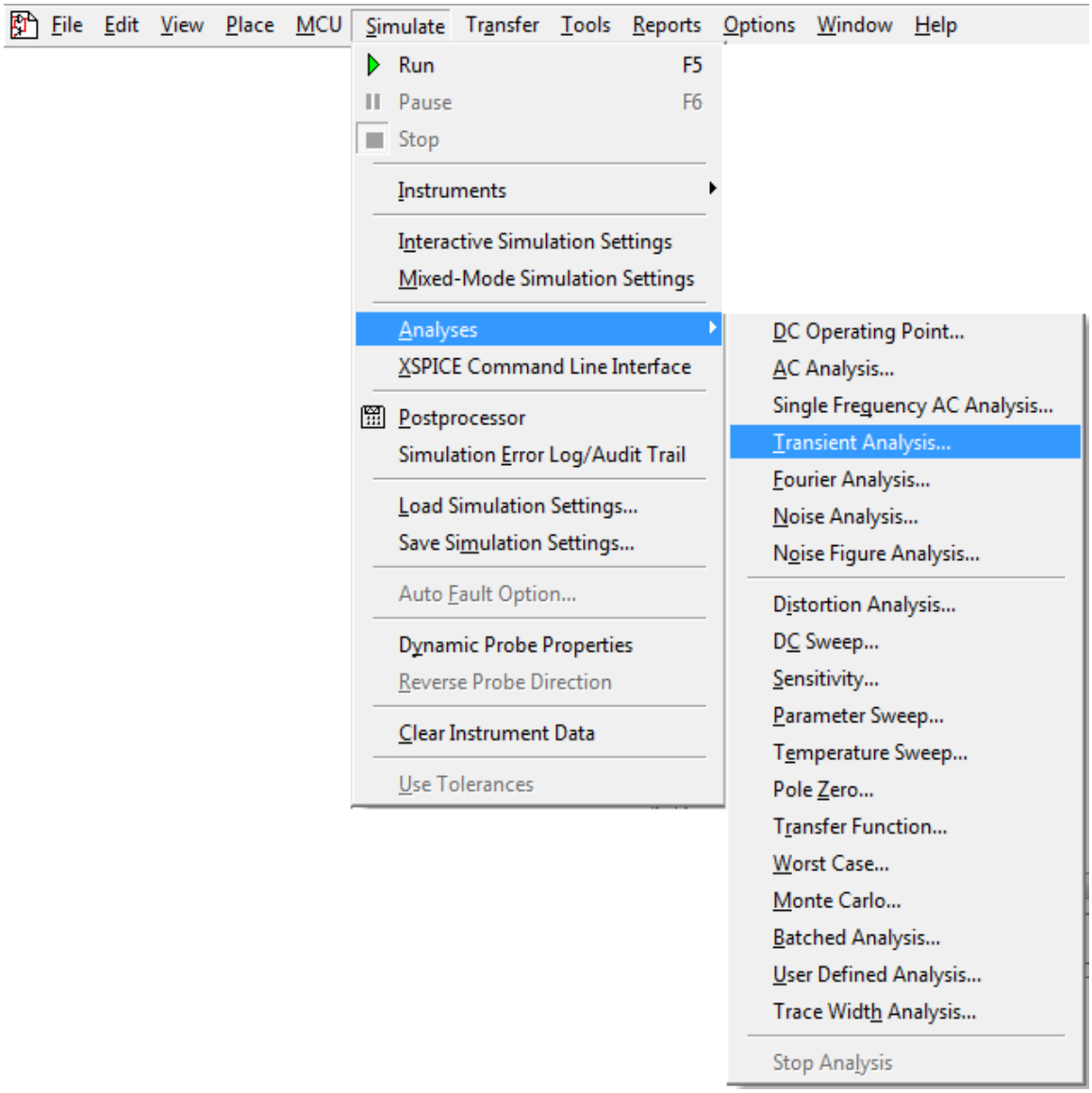
از نماد با نام *Measurement probe* نیز برای علامت‌گذاری سیم‌ها به منظور اندازه‌گیری ولتاژ و یا جریان می‌توانید استفاده کنید. در زمان اجرای برنامه نیز می‌توانید به صورت متغیر و تنها با تکان دادن پروب اندازه‌گیری مورد نظر، ولتاژ نقاط را در هرلحظه اندازه بگیرید. این پروب در نوار ابزار *Instruments* قرار دارد که از مسیر زیر فعال می‌شود:

View-> Toolbars-> Instruments-> Measurement probe

شکل زیر یک نمونه از خروجی این پروب، کادر زرد رنگ، را نشان می‌دهد.



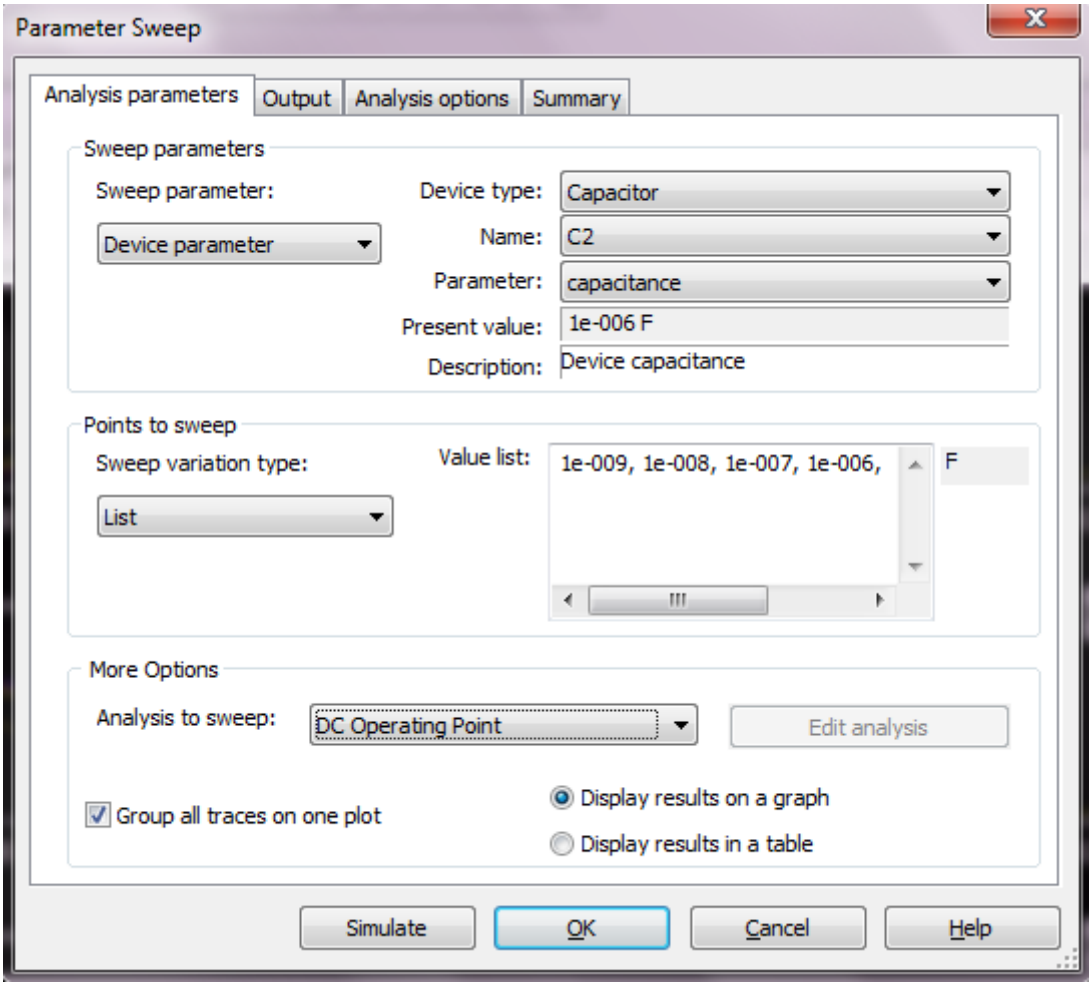
۲- جهت تحلیل مدار با انتخاب گزینه *Simulate->Analyses* در منوی نرم‌افزار صفحه زیر را مشاهده خواهید کرد:



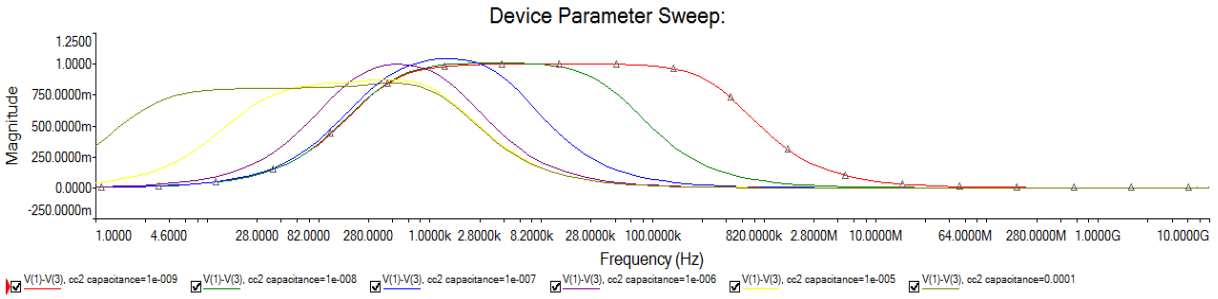
برای تحلیل پاسخ گذرا یا همان پاسخ حوزه زمان مدار بر روی *Transient Analysis* کلیک کرده و پارامترهای مربوطه را تنظیم می‌کنیم. در تحلیل پاسخ فرکانسی بر روی *AC Sweep* کلیک کرده و پارامترهای آن را تنظیم می‌نمائیم.

نکته: به منظور رسم منحنی‌ها بر حسب تغییرات منابع یا عناصر موجود در مدار نظیر مقاومت و ... می‌توانید به ترتیب از *DC Sweep* و *Parameter Sweep* استفاده کنید. در صورت استفاده از *Parameter Sweep* باید پس از تنظیمات لازم، در بخش *more options* نیز گزینه *dc operating point* را در قسمت *analysis to*

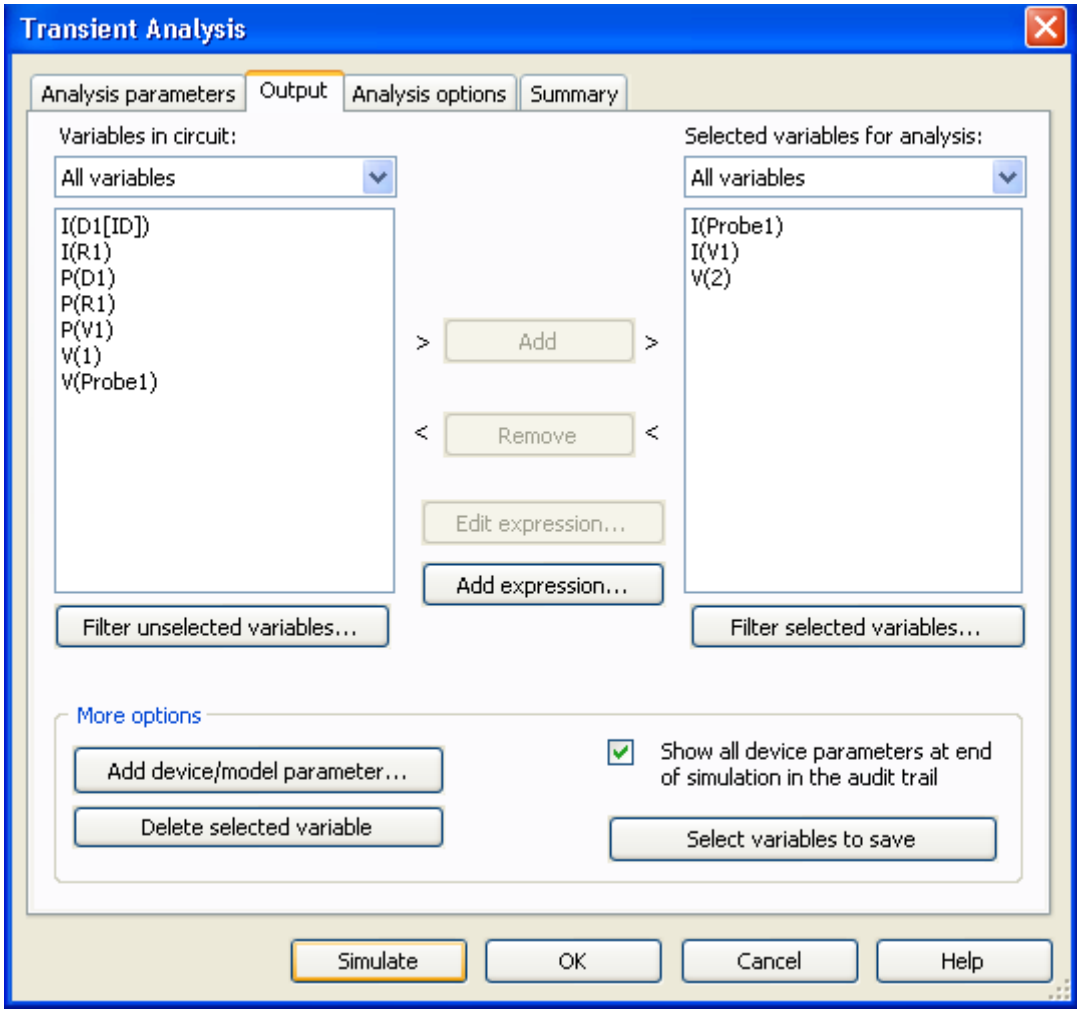
sweep انتخاب نمائید. در شکل زیر یک نمونه از تنظیمات پنجره *Parameter Sweep* را برای مقادیر مختلف خازن مشاهده می‌کنید.



به کمک *Parameter Sweep* همچنین می‌توانید پاسخ حوزه زمان و پاسخ حوزه فرکانس را همزمان برای مقادیر مختلف یک پارامتر رسم نمائید. در این حالت باید در بخش *more options* گزینه *transient* یا *ac analysis* را در قسمت *analysis to sweep*، وابسته به نوع پاسخ مورد نظرتان انتخاب کنید. شکل زیر یک نمونه پاسخ حوزه فرکانس را به ازای مقادیر مختلف خازن مداری نشان می‌دهد.



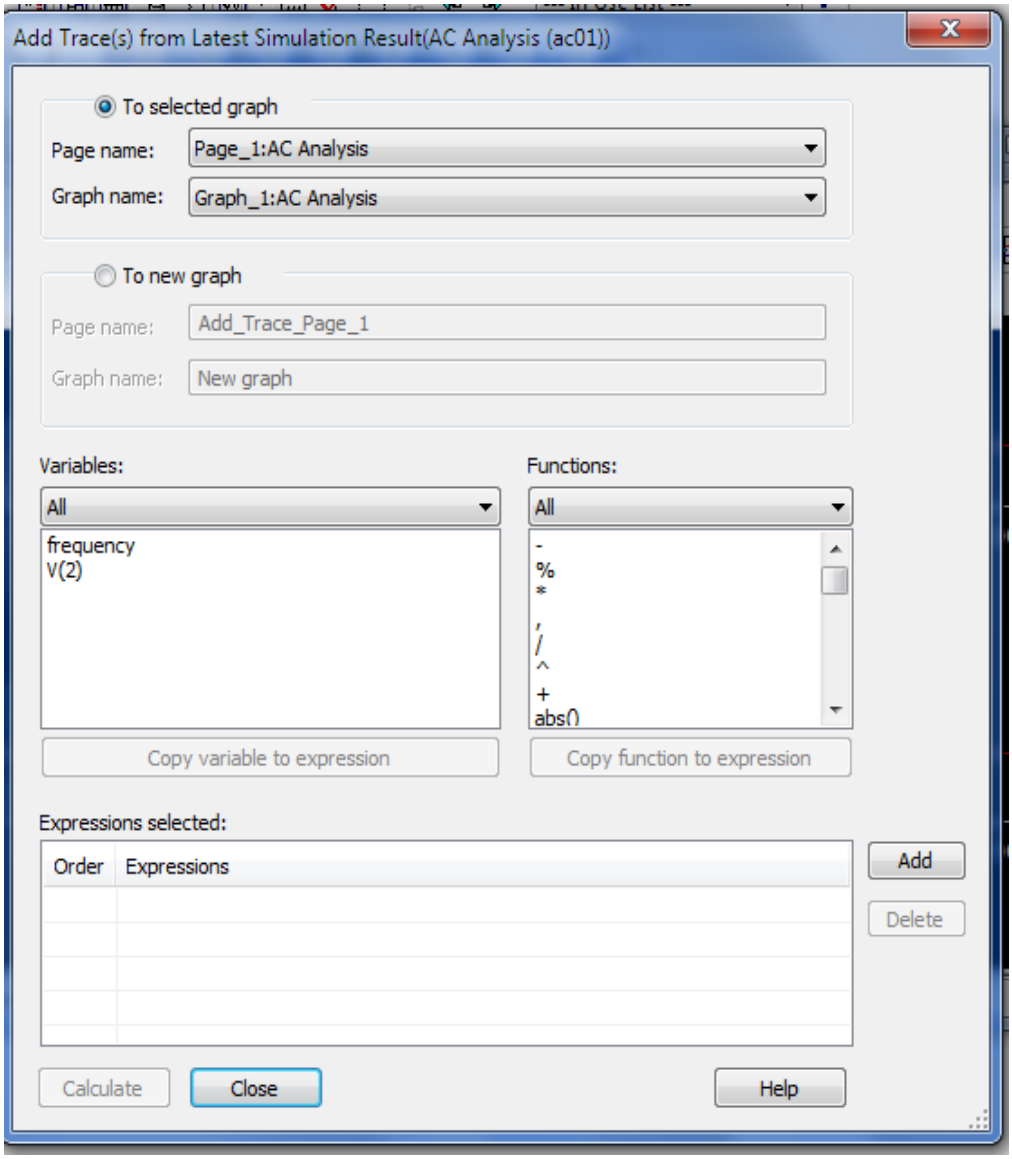
نتیجه اینکه با توجه به نوع و شیوه تحلیل مورد نیاز مدار، گزینه مورد نظر را انتخاب نموده، پارامترهای اولیه آن را تنظیم و خروجی‌های مورد نظر را در پنجره *Output* مطابق شکل زیر انتخاب می‌کنیم. در این پنجره امکان مشاهده کلیه متغیرهای مدار و توابع ریاضی مختلف جهت ترکیب آنها با استفاده از گزینه *add expression* وجود دارد. سپس برای تحلیل نهایی گزینه *Simulate* را در همان پنجره کلیک می‌کنیم.



در این حالت تحلیل مدار برای پروب‌های تعیین شده، روی شماتیک مدار و نیز برای متغیرهای تعیین شده، در پنجره *Grapher view* نمایش داده می‌شود. پس از شبیه‌سازی مدار، امکان افزودن شکل موج‌های جدید با انتخاب مسیر زیر در پنجره *Grapher view* مقدور می‌باشد:

Graph -> Add trace(s)...

در این حالت شکل زیر ظاهر می‌شود که در این پنجره نیز امکان مشاهده شکل موج‌های انتخاب شده و توابع ریاضی جهت ترکیب آنها وجود دارد.

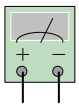
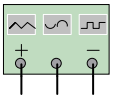
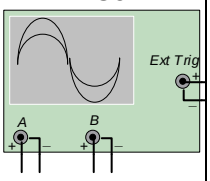
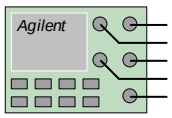


✓ معرفی وسایل اندازه‌گیری:

در این قسمت شما با جعبه‌ابزار وسایل اندازه‌گیری *(Instruments Toolbar)* آشنا می‌شوید که به شکل روبه‌رو است:

View-> Toolbars-> Instrumensts

در اینجا ۴ دستگاه اندازه‌گیری پرکاربرد معرفی شده و با بقیه‌ی آن‌ها می‌توانید از طریق جستجو در *Help* نرم‌افزار و اینترنت آشنا شوید.

XMM1 	اولین دستگاه در این نوار ابزار مولتی‌متر است که توانایی اندازه‌گیری ولتاژ و جریان در حالت متناوب و غیرمتناوب را دارد. علاوه بر این شما می‌توانید مقاومت دیده شده از دو سر ورودی آن را نیز اندازه بگیرید. توجه کنید که هیچکدام از دستگاه‌های مشاهده شده ایده‌آل نیستند و همانند تمام دستگاه‌ها دارای خطا و به خصوص اثر بارگذاری هستند. به عنوان مثال در حالت آمپرمتر مقاومت دستگاه $1n$ اهم است که مقدار ناچیز ولی در بعضی حالات غیرقابل چشم‌پوشی است. مقاومت مولتی‌متر در حالت ولت‌متر و آمپرمتر قابل تغییر می‌باشد.
XFG1 	دومین دستگاه پرکاربرد مولد ولتاژ یا *Function generator* است که شما می‌توانید شکل موج مورد نظر و دامنه آن را همانند محیط آزمایشگاه تنظیم کنید.
XSC1 	دستگاه بعدی اسیلوسکوپ است که برای مشاهده شکل موج به کار می‌رود. این مدل دو ورودی دارد و آنالوگ است.
XMM2 	آخرین موردی که ممکن است مورد استفاده قرار بگیرد نمونه‌های کارخانه‌ای و دو بعدی مولتی‌متر و اسیلوسکوپ است که در اینجا محصولات شرکت *Agilent* و *Tektronix* دیده می‌شود.

آزمایش ۱

آشنایی با اسیلوسکوپ

هدف از این آزمایش آشنایی شما با مقدمات استفاده صحیح از اسیلوسکوپ‌ها و سیگنال ژنراتورهای معمولی است. در این آزمایش با تنظیم مقدماتی اسیلوسکوپ، تنظیم پروب، تریگر کردن سیگنال و اثربارگذاری اسیلوسکوپ آشنا خواهیم شد. جهت کسب اطلاعات تکمیلی می‌توانید به آدرس *http://www.virtual-oscilloscope.com* مراجعه نموده و از بخش‌های *oscilloscope simulation* و *oscilloscope tutorial* آن دیدن فرمائید.

مقدمات

✓ کاربرد اسیلوسکوپ

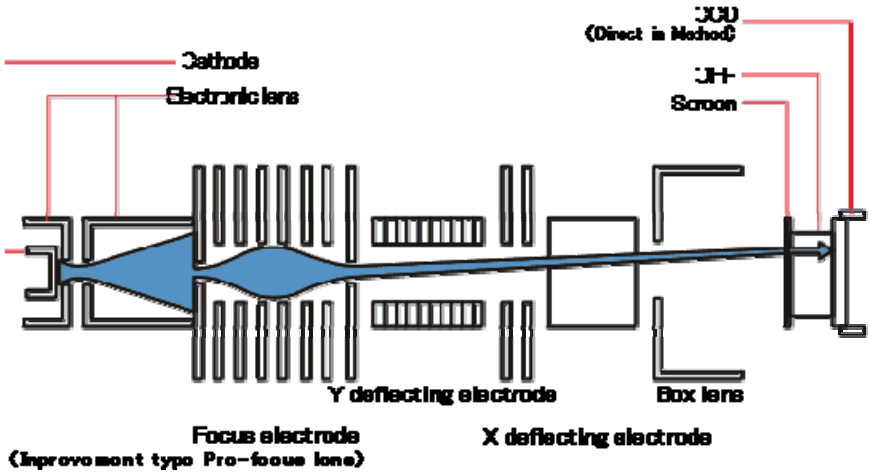
اسیلوسکوپ وسیله‌ای برای اندازه‌گیری و نمایش انواع شکل موج‌های ولتاژ می‌باشد.

✓ انواع اسیلوسکوپ

- آنالوگ
- دیجیتال (حافظه‌دار و ...)

✓ آشنایی با مدارات داخلی اسیلوسکوپ و روش کار آن *Cathode Ray Oscilloscope(CRO)*

قلب اسیلوسکوپ لامپ اشعه کاتدی آن است که در داخل آن اشعه ایجاد می‌شود و برخورد آن با صفحه فلورسان ایجاد نور می‌کند. قسمت‌های مهم این لامپ در شکل(۱- ۱) نشان داده شده‌اند.

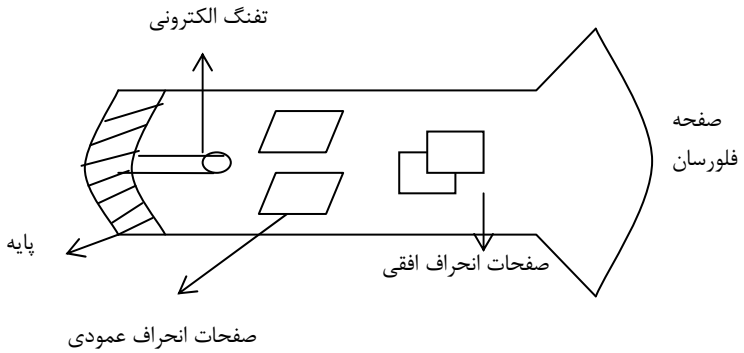


شکل (۱- ۱): قسمت‌های مهم لامپ اشعه کاتدی

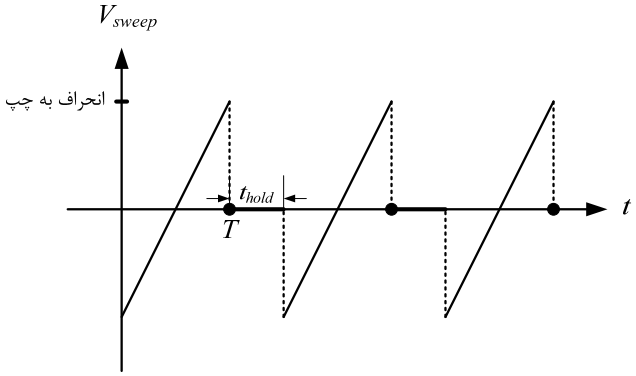
اشعه از کاتد جدا می‌شود و به صفحه فلورسان می‌خورد. هدف، هدایت این اشعه توسط ولتاژ ورودی است بطوریکه محل برخورد اشعه به صفحه نمایانگر خصوصیات زمانی سیگنال ورودی باشد.

دو جفت صفحه موازی هم وجود دارند که یک جفت افقی و یک جفت عمودی است (شکل (۱- ۲)). اشعه از بین این دو عبور می‌کند؛ یک ولتاژ متناسب با زمان به صفحاتی که انحراف افقی می‌دهند وصل می‌شود و

سیگنال ورودی نیز به صفحات انحراف عمودی داده می‌شود؛ این دو ولتاژ به کمک هم اشعه را منحرف می‌کنند، یکی در جهت افقی، یکی درجهت عمودی و نهایتاً اشعه به صفحه می‌رسد. انحراف از نقطه مرکز به طرف راست یا چپ (افقی) با ولتاژ V_{sweep} انجام می‌شود، پس چون این انحراف با زمان متناسب است می‌تواند نمایانگر طی شدن زمان باشد. در همین حین اشعه از مرکز به سمت بالا یا پائین (عمودی) منحرف می‌شود که متناسب با سیگنال ورودی است، پس می‌تواند نمایانگر دامنه ورودی باشد. شکل موج ولتاژ V_{sweep} در شکل (۱- ۳) نشان داده شده است.



شکل (۱- ۲): CRT

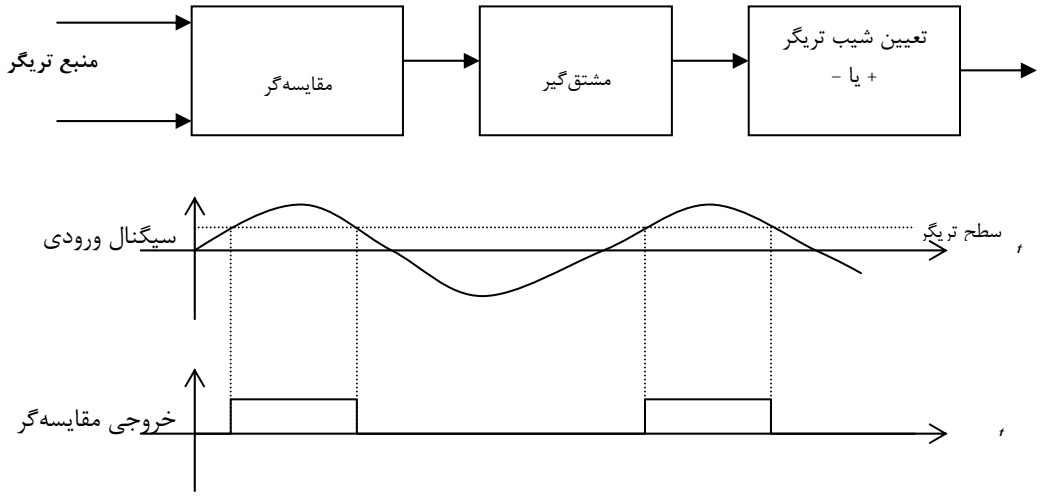


شکل (۱- ۳): ولتاژ صفحه افقی

با توجه به شکل بالا مدت زمان T طول می‌کشد تا V_{sweep} اشعه را از سمت راست به سمت چپ جابه‌جا کند. این بدین معنی است که مدت T از سیگنال ورودی نیز انتخاب می‌شود که اشعه را تواماً از بالا تا پائین منحرف سازد و اگر سیگنال ورودی دامنه کافی را نداشته باشد، فقط قسمتی از صفحه در جهت عمودی جاروب می‌شود نه از بالاترین تا پایین‌ترین نقطه صفحه.

✓ مدار تریگر

برای سنکرون کردن سوئیچ ژنراتور با سیگنال ورودی از مدار تریگر استفاده می‌شود. شکل (۱- ۴) بلوک دیاگرام مدار تریگر را نشان می‌دهد:

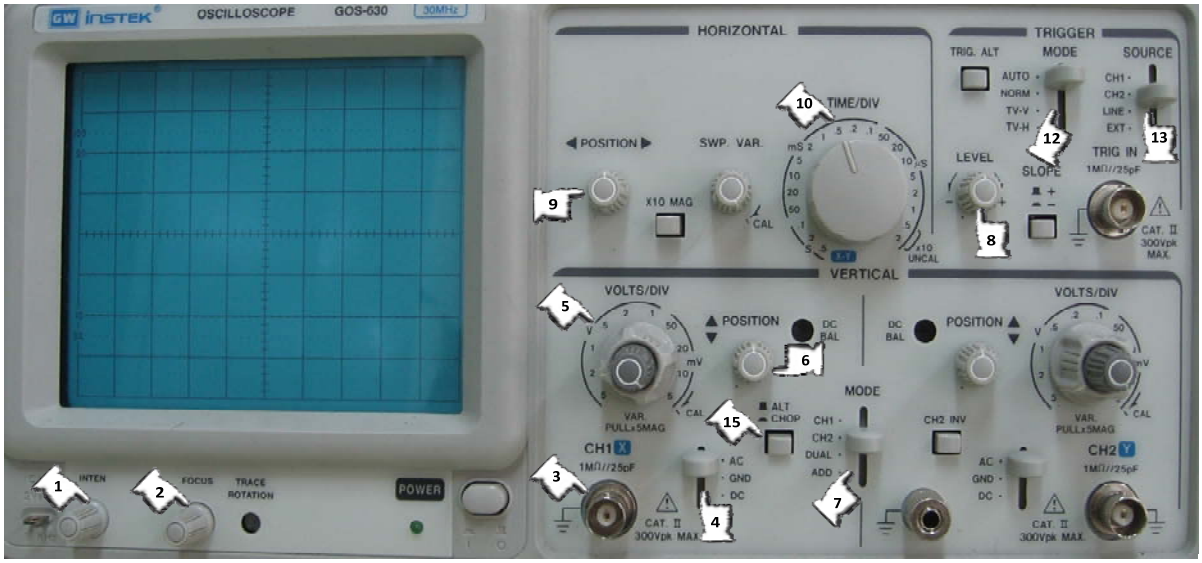


شکل (۱- ۴): بلوک دیاگرام بخش تریگر

در نمودار آخر می‌بینیم مدار تریگر در دو نقطه مشابه از سیگنال ورودی به مولد دندانه اره‌ای دستور می‌دهد که سوئیپ کند. از مدار اشمیت تریگر برای ورودی‌هائی که اعوجاج (نویز) دارند استفاده می‌شPود تا مقایسه‌گر درست تشخیص بدهد.

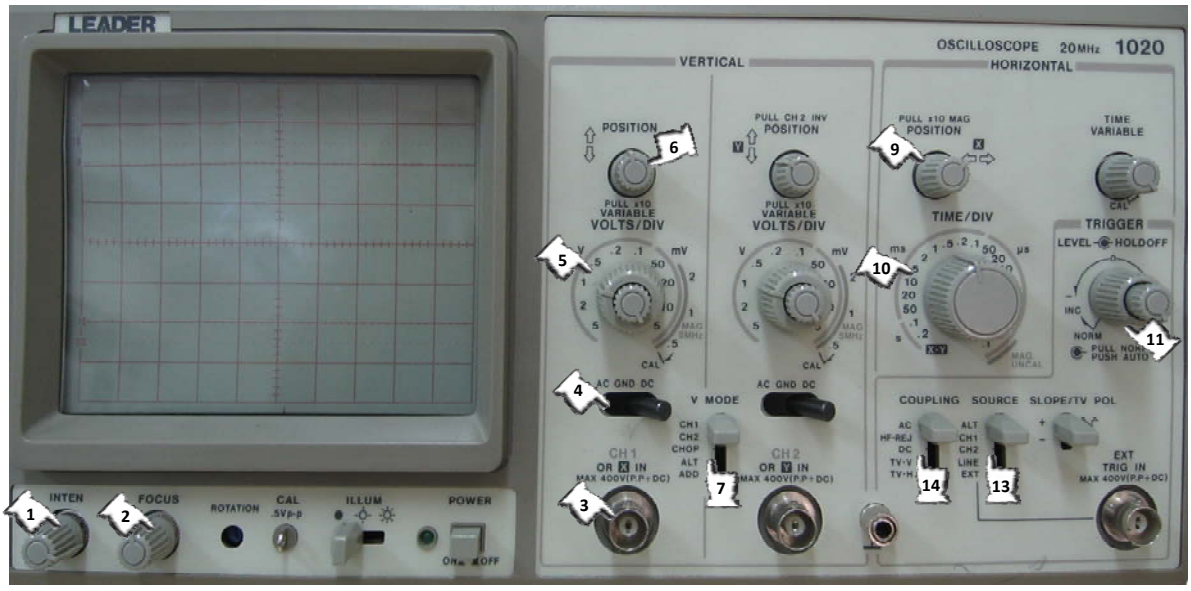
✓ آشنایی با پانل کنترل اسیلوسکوپ

پانل کنترل انواع اسیلوسکوپ‌ها دارای اجزای اصلی زیر می‌باشد که در شکل (۱- ۵) نمایش داده شده است.



(الف): اسیلوسکوپ شرکت گودویل اینستک (*GW INSTEK*) ۳۰ مگاهرتز مدل *GOS-۶۳۰*

(ب): اسیلوسکوپ شرکت گودویل اینستک (*GW INSTEK*) ۳۵ مگاهرتز مدل *GOS-۶۳۵*



(ج): اسیلوسکوپ شرکت لیدر (*LEADER*) ۲۰ مگاهرتز مدل ۱۰۲۰

شکل (۱- ۵): نمایی از چند نوع اسیلوسکوپ موجود در آزمایشگاه

✓ این اجزا را به طور کلی به پنج دسته می‌توان تقسیم نمود:

الف) کلیدهای مربوط به تنظیمات روشنایی و فوکوس صفحه تصویر

ب) کلیدهای مربوط به کنترل محور افقی یا محور زمان

ج) کلیدهای مربوط به کنترل محور عمودی یا محور سیگنال اعمال شده (*CH۱*)

د) کلیدهای مربوط به کنترل محور عمودی یا محور سیگنال اعمال شده ($CH۲$)

ه) کلیدهای مربوط به مدار *triggering*

✓ عملکرد کلیدها بر حسب شماره به شرح زیر می‌باشد:

۱- درجه تنظیم شدت اشعه تابش (قدرت ابر الکترونی تولید شده)

۲- درجه تنظیم وضوح و فوکوس تصویر

۳- ورودی کانال ۱ یا X (کانال دیگر نیز کاملاً مشخص است)

۴- کلید تنظیم وضعیت نمایش موج کانال ۱ به سه حالت مختلف:

- *GND* : برای تنظیم و نمایش خط زمین کانال
- *AC* : برای حذف مقادیر *DC* ورودی و نمایش شکل موج متناوب
- *DC* : برای نمایش شکل موج ورودی با در نظر گرفتن مقادیر *DC* و *AC*

۵- درجه تنظیم ولتاژ نمایش یا در حقیقت مقیاس محور Yها برای کانال ۱

۶- درجه تنظیم موقعیت شکل موج در صفحه نمایش در راستای عمودی (کانال ۱)

۷- کلید تنظیم کانال و وضعیت نمایش که دارای ۴ حالت می‌باشد:

- انتخاب کانال ۱
- انتخاب کانال ۲
- نمایش ترکیبی هر دو کانال
- شکل موج برآیند دو کانال (حاصل از جمع اسکالر)

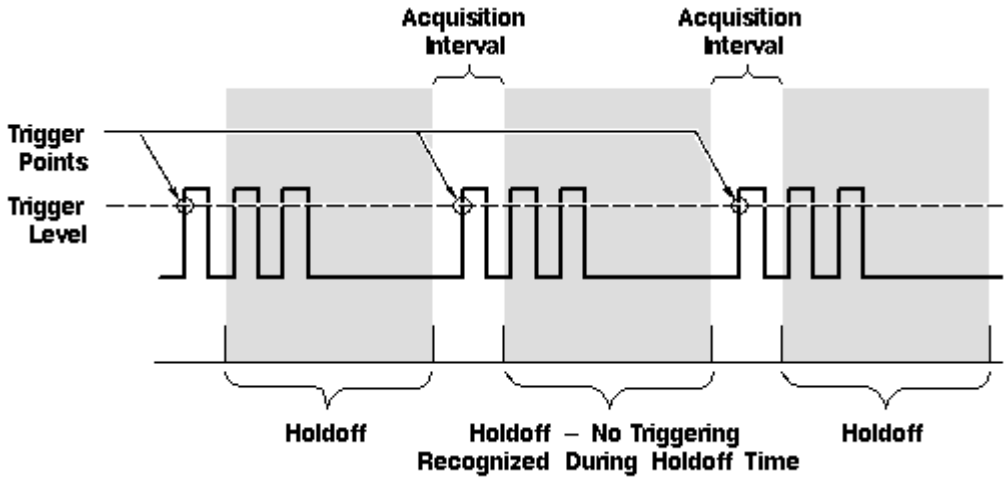
۸- *Trigger level* سطح ولتاژی را تنظیم می‌کند که اگر موج به آن مقدار برسد، ترسیم شکل موج شروع می‌شود.

۹- درجه تنظیم موقعیت شکل موج در صفحه نمایش در راستای محور Xها برای هر دو کانال

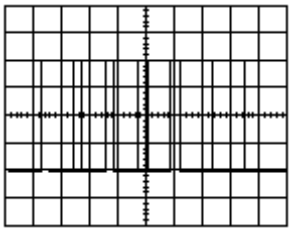
۱۰-درجه تنظیم فرکانس *sweep* و در حقیقت مقیاس محور Xها برای هر دو کانال

۱۱-*Trigger Hold-off*: بعضی اوقات تنظیم اسیلوسکوپ برای این که در قسمت درستی از یک موج تریگر کند نیاز به مهارت خاصی دارد. بسیاری از اسیلوسکوپ‌ها دارای کلیدی به نام *hold-off* هستند که این عمل را آسان می‌کند.

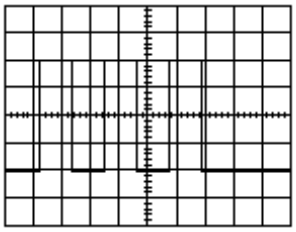
Trigger hold-off زمانی قابل تنظیم است که اسیلوسکوپ تریگر نمی‌کند. این ویژگی مخصوصاً در مورد شکل موج‌های پیچیده مفید است که اسیلوسکوپ تنها در اولین لبه مناسب تریگر می‌کند. شکل (۱- ۶) عملکرد بخش *Hold-Off* را بهتر نشان می‌دهد.



(الف)



(ب) بدون *Hold-Off*



(ج) با *Hold-Off*

شکل (۱- ۶): الف) نمایش سطح تریگر و زمان *Hold-Off* روی سیگنال منبع تریگر، شکل موج دیده شده توسط اسیلوسکوپ ب) بدون مدار *Hold-Off* و ج) با مدار *Hold-Off*.

۱۲-مدهای تریگر:

NORM : آنچه تاکنون گفتیم مد *NORM* است.

AUTO : همانند *NORM* است با این تفاوت که اگر سیگنال به سطح تریگر نرسد، آنگاه برای جلوگیری از خاموش شدن اسکوپ با فرکانس ۵۰*Hz* تریگر می‌کند.

TV (TV-V, TV-H): برای سیگنال‌های تلویزیون (با فرکانس خاص و به صورت *vertical* و *horizontal*) استفاده می‌شود.

۱۳-منبع تریگر:

CH۱/CH۲: ورودی یک/دو به عنوان منبع تریگر استفاده می‌شود. (توجه کنید که ورودی یک با منبع تریگر یک به صورت درست تریگر می‌شود زیرا هم فرکانس هستند و در صورتیکه موج ورودی کانال ۱ و ۲ هم‌فرکانس باشند، می‌توان از کانال ۱ به عنوان منبع تریگر جهت نمایش کانال ۲ استفاده کرد و بالعکس)

EXT: اگر موج ورودی نتواند مولد خوبی برای تریگر ایجاد کند از حالت *external* به عنوان منبع تریگر استفاده کرده و منبع تریگر را از خارج دریافت می‌کنیم.

Line: برای حالت‌هایی که فرکانس موج ورودی اسیلوسکوپ هم‌فرکانس یا ضریب فرکانسی از برق شهر باشد می‌توان از حالت *Line* به عنوان منبع تریگر استفاده کرد. در این حالت منبع تریگر یک موج ۵۰*Hz* می‌شود.

۱۴-کوپلاژ سورس تریگر:

در تمام حالت‌های زیر عمل ذکر شده بر روی سیگنال سورس تریگر انجام می‌شود:

DC : سیگنالی که به عنوان سورس تریگر انتخاب می‌شود با مقدار *DC*اش لحاظ می‌شود.

AC : مولفه *DC* از سیگنالی که به عنوان سورس تریگر انتخاب شده حذف می‌شود.

HF Rej (High Filter Rejection): همان حالت *DC* است که در خط بالا توضیح داده شد، فقط موج‌های فرکانس بالای آن که در واقع نویز هستند حذف شده‌است. در واقع در این حالت نویزهای فرکانس بالا که روی سیگنال منبع تریگر سوار هستند از آن حذف می‌شود تا عمل تریگر با دقت و کیفیت بهتری انجام شود. این حالت نمونه‌ای از فیلتر ساده پایین‌گذر است که برای کاهش نویز به کار می‌رود (بدیهی‌ست که نوع نویز باید مشخص شود).

LF Rej (Low Filter Rejection): همانند حالت قبل است فقط نویزهای فرکانس پایین را حذف می‌کند.

۱۵-نمایش دو کانال با هم:

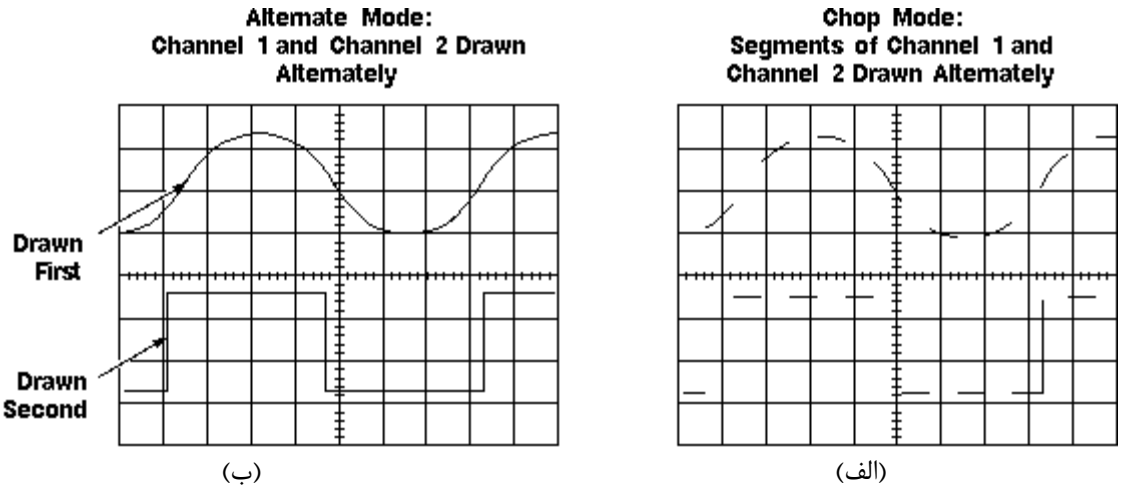
به منظور نمایش دو کانال به طور همزمان از دو روش متفاوت *Alt* و *Chop* در فرکانس‌های بالا و پایین استفاده می‌شود. کلید ۱۵ در اسیلوسکوپ گودویل مدل *GOS-۶۳۰* و کلید ۷ در اسکوپ *LEADER* این امکان را فراهم می‌کنند. در بعضی ازاسکوپ‌ها نظیر گودویل مدل *GOS-۶۳۵* از طریق تغییر سلکتور *Time/Div* (کلید ۱۰) به طور خودکار خود اسکوپ یکی از حالت‌های *Alt* یا *Chop* را انتخاب می‌کند.

۱۵-۱ روش *Alt*

برای نمایش هم‌زمان دو موج فرکانس بالا از روش *Alt* استفاده می‌شود. فرکانس موج ورودی باید حدود چند کیلوهرتز یا بیشتر باشد. در این روش برای یک دوره از سوئیپ، کانال(۱) به صفحات انحراف دهنده عمودی داده می‌شود و برای دوره بعدی سوئیپ، کانال (۲) به صفحات عمودی می‌رود.

۱۵-۲ روش *Chop*

برای نمایش هم‌زمان دو موج فرکانس پایین از روش *Chop* استفاده می‌شود. در فرکانس‌های پایین در طول یک سوئیپ، ولتاژ ورودی به صفحات انحراف عمودی چندین بار بین کانال ۱ و ۲ سوئیچ می‌کند. برای اسکوپ‌های موجود فرکانس نمونه برداری (فرکانس سوئیچ بین دو کانال) حدود ۲۵۰ کیلوهرتز می‌باشد. شکل (۱- ۷) نمایش همزمان دو کانال به دو روش گفته شده را نشان می‌دهد.



شکل (۱- ۷): نمایش همزمان دو سیگنال به روش الف) *Chop* و ب) *Alt*

خودآزمایی

۱- برای ولتاژ ورودی با دامنه زیاد سلکتور *Volt/Div* را روی کم بگذاریم یا زیاد؟

۲- اگر سطح تشخیص (*Trigger Level*) در مدار تریگر بالاتر از سیگنال ورودی باشد، در کدام مد تریگر شکل موجی در خروجی نمایش داده نمی‌شود؟ چرا؟

۳- *Hold-off* چگونه کار می‌کند؟ همراه با شکل سوئیپ بگوئید.

۴- چرا روش *Alt* برای فرکانس پائین به صورت چشمک‌زن نمایش داده می‌شود؟

۵- در روش *Alt* اگر سورس تریگر را از کانال ۲ یا ۱ بگیریم احتمال دارد یکی از موج‌ها روی صفحه راه برود. چرا؟

✓ پروبها

معمولاً برای انواع مدارهای الکتریکی و الکترونیکی مدل‌ها و انواع ویژه‌ای از پروب‌ها وجود دارد که برای نمونه‌برداری از ولتاژ گره مورد نظر طراحی شده‌اند. دو نوع پروب وجود دارد: فعال و غیرفعال *(Passive & Active)*. پروب‌های فعال ابتدا تقویت می‌کنند، بعد توسط کانال به اسکوپ انتقال می‌دهند.

مشخصات مهم پروب‌ها:

۱- اثر بارگذاری کم بر روی مدار

۲- دارای پهنای باند عبور مناسب

۳- سیگنال به نویز بزرگ

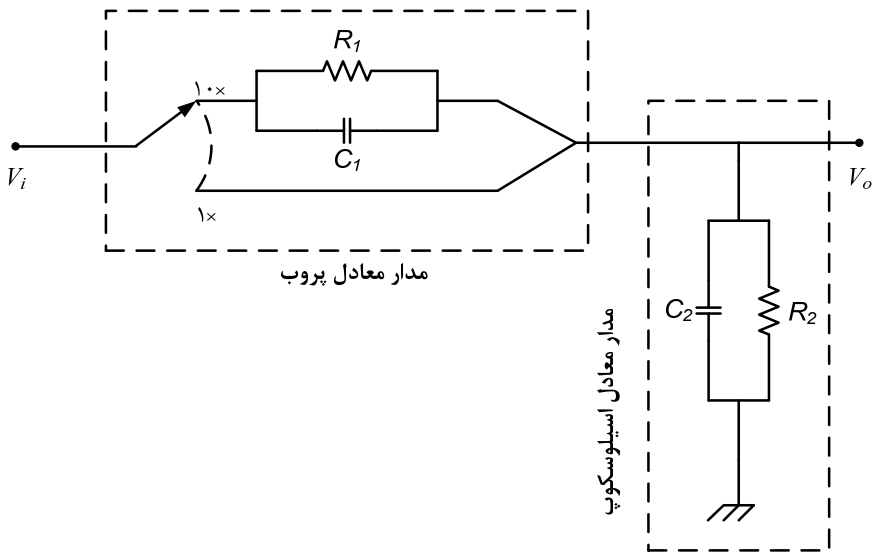
در حالت ۱۰× مقاومت ورودی پروب زیاد است پس اسکوپ تأثیر کمی بر مدار دارد. بنابراین بهتر است که در اندازه‌گیری های فرکانس بالا ویا نقاطی که دارای امپدانس خروجی بزرگی هستند پروب را در حالت ۱۰×

قرار داد. مدار معادل ورودی یک اسیلوسکوپ توسط یک مقاومت و یک خازن موازی معادل می‌شود. مقادیر معمول برای این مقاومت ۱ مگا اهم و ظرفیت خازن در محدوده چند ده پیکو فاراد است. بطور معمول این مقادیر در کنار ورودی اسیلوسکوپ‌ها نوشته می‌شوند.

هنگام اندازه‌گیری با اسیلوسکوپ ممکن است سیگنالی که باید اندازه‌گیری شود دارای دامنهٔ بیش از تحمل ورودی اسیلوسکوپ و یا خیلی کوچکتر از مقدار قابل اندازه‌گیری باشد. جهت اندازه‌گیری ولتاژهای زیاد لازم است دامنه آنها با کمک پروب کاهش پیدا کند. این کار به کمک پروب‌های پسیو که دارای مقاومت و خازن موازی هستند امکان‌پذیر است (حالت۱۰×). برای سیگنال‌های ضعیف نیز پروب‌های اکتیو وجود دارند که بخصوص در اندازه‌گیری‌های مخابراتی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند.

همچنین ممکن است بخواهیم جهت اندازه‌گیری، اسیلوسکوپ را با یک امپدانس بزرگ موازی کنیم؛ در این صورت اتصال اسیلوسکوپ باعث بارگذاری و تخریب سیگنال اندازه‌گیری شده می‌شود (حالت ۱×)، در این حالت نیز با قرار دادن یک پروب اکتیو یا پسیو در حالت ۱۰× می‌توان مجموع امپدانس ورودی اسیلوسکوپ و پروب را زیاد کرد تا اثر بارگذاری قابل صرف نظر کردن باشد.

هنگامی که پروب در حالت ۱۰× قرار دارد دامنه ولتاژ اندازه‌گیری شده در اسیلوسکوپ ۰/۱ مقدار واقعی آن است لذا باید مقدار خوانده شده را در ۱۰ ضرب نمود. در حالت ۱۰× مدار معادل پروب، یک مقاومت و خازن موازی است که باید مقادیر آنها نسبت به مقادیر مقاومت و خازن معادل ورودی اسیلوسکوپ به گونه‌ای باشد که سیگنال ورودی در هیچ فرکانسی دچار اعوجاج نگردد؛ از آنجا که مقدار خازن ورودی تمام اسیلوسکوپ‌ها همواره یکسان نیست خازن پروب‌ها را قابل تنظیم قرار می‌دهند که به آن خازن تریمر می‌گویند. مدار معادل یک پروب و مدار معادل داخلی یک اسیلوسکوپ که با هم سری می‌شوند در شکل (۱- ۸) نشان داده شده است.



شکل (۱- ۸): مدار معادل‌های پروب و اسیلوسکوپ که با هم سری می‌شوند.

✓ **مراحل لازم برای مشاهده شکل موج گره مورد نظر:**

- اتصال زمین اسیلوسکوپ به زمین سیستم
- تنظیم وضوح و شدت اشعه با درجات *Focus* و *Intensity*
- تنظیم خط زمین(*GND*) برای هر دو کانال
- اتصال دقیق پروب به گره مورد نظر
- تغییر وضعیت کلید سه حالته تنظیم هر کانال از موقعیت *GND* به *AC* یا *DC*
- تنظیم فرکانس *Sweep* و مقدار مقیاس ولتاژ

خودآزمایی

۱- به نظر شما فرق پروب اکتیو و پسیو چیست؟ مزایا و معایب آنها را تحقیق کنید.

۲- نشان دهید که با یک مقاومت تنها به عنوان مدار معادل پروب نمی‌توان در صورت اندازه‌گیری، یک ولتاژ پله را همانگونه که هست اندازه گرفت. برای این کار یک منبع پله را به مدار سری مقاومت (مدار معادل فرضی پروب) و یک خازن-مقاومت موازی (مدار معادل ورودی اسیلوسکوپ) اعمال کنید و ولتاژ ورودی اسیلوسکوپ را با ولتاژ پله اعمالی با تحلیل تئوری و به کمک نرم‌افزار مقایسه کنید.

۳- با اضافه کردن خازن موازی در پروب با تحلیل تئوری و به کمک نرم‌افزار نشان دهید امکان اندازه‌گیری دقیق وجود خواهد داشت. مقادیر خازن و مقاومت را طوری تعیین کنید تا دامنه سیگنال در اسیلوسکوپ در فرکانس‌های بسیار کم و بسیار زیاد به میزان ۰/۱ کاهش یابد.

۴- اگر خازن کمتر و یا بیشتر از مقداری باشد که در مرحله قبل بدست آورده‌اید شکل موج اندازه‌گیری شده چه تغییری خواهد کرد؟ با کمک نرم‌افزار این شکل موج‌ها را رسم کنید.

شرح آزمایش ۱ (جلسه اول):

✓ بررسی کالیبره بودن اسیلوسکوپ و صحت پروب‌ها

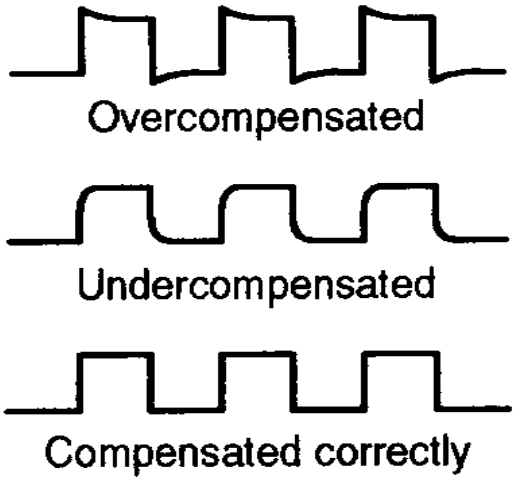
پروب کانال ۱ اسیلوسکوپ را در حالت ۱۰× قرار داده و به سیگنال کالیبراتور (حلقه موجود روی پنل) اسیلوسکوپ متصل کنید. جهت مشاهده سیگنال وضعیت مشاهده را بر روی کانال ۱ قرار دهید و منبع تریگر را نیز کانال ۱ انتخاب کنید. حالت تریگر را در وضعیت *Auto* و اتصال کانال ۱ را در وضعیت *DC* قرار دهید. سیگنال مشاهده شده بر روی اسیلوسکوپ را ترسیم کنید. آیا شکل موج مشاهده شده مربعی است؟ با کمک یک پیچ گوشتی پلاستیکی ویژهٔ تنظیم پروب، خازن تریمر پروب را مانند شکل (۱- ۹) در هر دو جهت تغییر دهید و شکل موج‌های مشاهده شده را ترسیم کنید. شکل‌های مشاهده شده را با شکل (۱- ۱۰) مقایسه کنید.

شکل (۱- ۹): نحوهٔ تنظیم خازن تریمر پروب

با تنظیم خازن تریمر پروب شکل مربعی را مشاهده کنید، در این حالت پروب بصورت صحیح جبران سازی شده است. جهت تنظیم بهتر می‌توانید تنظیم زمانی (*Time/div*) را کوچکتر کرده تا ابتدای موج را بهتر مشاهده کنید.

بعد از تنظیم پروب دامنه و فرکانس سیگنال مشاهده شده در اسیلوسکوپ را اندازه‌گیری کنید. آیا مقادیر اندازه‌گیری شده با مقادیر نوشته شده در کنار کالیبراتور انطباق دارند؟

پرسش ۱: به نظر شما اگر پروبی در اختیار داشته باشید که حالت‌های ۱× و ۱۰× را داشته باشد، تنظیم خازن پروب برای چه حالتی باید انجام شود و چرا؟



شکل (۱- ۱۰): حالت‌های مختلف مشاهده سیگنال مربعی با پروب تنظیم شده و تنظیم نشده

پرسش ۲: به کمک روابط تئوری و مقادیر خازن و مقاومت مدار معادل اسیلوسکوپ روی میز کارتان، مقدار خازن تریمر پروب را در حالت *compensated correctly* حساب کنید. در صورتی‌که مقادیر مورد نیاز روی اسیلوسکوپ یادداشت نشده بود، از مقادیر فرضی $C=۱۵pF$ و $R=۱M\Omega$ استفاده کنید. مدل اسیلوسکوپ موجود روی میز کارتان را یادداشت نمایید.

✓ **عدم تنظیم پروب و اثر مخرب آن روی شکل موج سینوسی**

پروب کانال ۲ را نیز به کالیبراتور متصل کنید. وضعیت مشاهده سیگنال‌ها را در حالت *Dual* قرار دهید. خازن پروب کانال ۲ را به گونه‌ای تنظیم کنید که در حالت *undercompensated* قرار داشته باشد. در این حالت تنظیم پروب‌ها (پروب کانال ۱ از تنظیمات بخش قبل در حالت *compensated* قرار گرفته است)، با کمک سیگنال ژنراتور یک موج سینوسی با دامنه ۳ ولت به هر دو کانال اسیلوسکوپ متصل کنید. دقت کنید در فرکانس‌های پایین باید وضعیت مشاهده سیگنال‌ها را در حالت *Chop* و در فرکانس‌های بالا در حالت *Alt* قرار دهید. *Alt* تریگر را حتماً غیر فعال کنید. مشاهدات خود را برای فرکانس‌های ۸۰ هرتز و ۱۵۰ کیلوهرتز ترسیم کنید. این آزمایش را مجدد برای پروب کانال ۲ که در حالت *overcompensated* قرار داده‌اید، تکرار و جدول زیر را کامل نمایید. علت پدیده‌های دیده شده را به طور کامل توضیح دهید. روی شکل موج‌های ترسیم شده حتماً مشخص کنید که هر کدام مربوط به کدام کانال می‌باشد.

فرکانس سیگنال	$۸۰Hz$	$۱۵۰kHz$
دامنه سیگنال مشاهده شده توسط کانال ۱ (پروب *compensated*)		
دامنه سیگنال مشاهده شده توسط کانال ۲ (پروب *undercompensated*)		
دامنه سیگنال مشاهده شده توسط کانال ۲ (پروب *overcompensated*)		

در پایان کار پروب کانال ۲ را بصورت صحیح تنظیم کنید تا شکل مربعی را مشاهده نمایید.

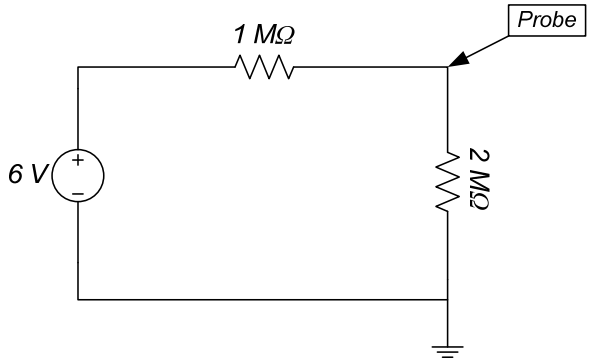
پرسش۳: می‌خواهیم ببینیم در صورتی‌که مدار معادل پروب در حالت ۱۰× تنها شامل یک مقاومت باشد و خازنی نداشته باشد، شکل موج مربعی در صفحه اسیلوسکوپ به چه صورتی رسم می‌شود. بدین منظور مداری طراحی کنید و شکل موج مورد نظر را در صفحه اسیلوسکوپ ببینید . مدار طراحی شده و نتیجه مشاهدات را رسم نمایید و دلیلش را توضیح دهید.

✓ اثر بارگذاری اسیلوسکوپ روی مدار و حذف آن توسط پروب

مدار شکل (۱- ۱۱) را ببندید و مقدار منبع DC را ۶ ولت قرار دهید. مقدار اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت $2M\Omega$ را با اسیلوسکوپ و پروب در حالت ۱× و ۱۰× اندازه بگیرید.

با رسم مدار معادل اسیلوسکوپ و پروب در حالت ۱× و ۱۰× و نوشتن روابط مدار، مقادیر اندازه‌گیری شده را با یکدیگر و با تئوری مقایسه کنید و علت اختلاف را توضیح و به کمک روابط تئوری اثبات نمایید.

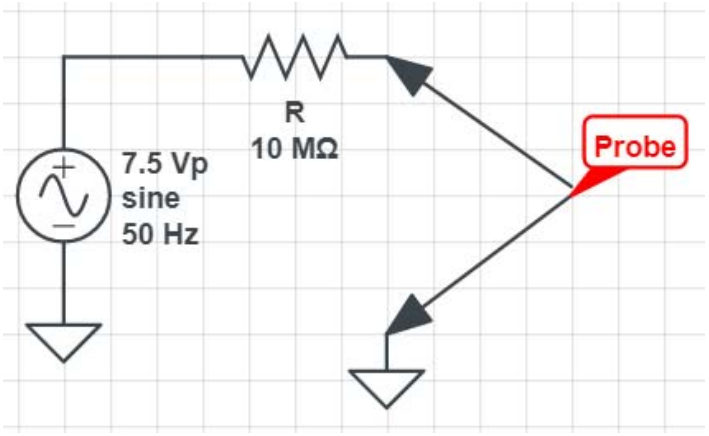
(ولتاژ ۶ ولت را بین پایه‌های + و – منبع تغذیه DC بگیرید و از پایه زمین آن استفاده نکنید. سر سوسماری (زمین) پروب را به سر منفی منبع تغذیه DC متصل کنید. دستگاه منبع تغذیه DC به صورت مجزا از منبع تغذیه AC، روی میز کارتان قرار گرفته است.)



شکل (۱- ۱۱)

پرسش۴ (اختیاری، نمره مثبت دارد) : اندازه‌گیری مقاومت داخلی اسیلوسکوپ

مطابق شکل (۱-۱۲) پروب را در حالت ۱× قرار داده و با استفاده از سیگنال ژنراتور، ولتاژی با پیک (دامنه) ۷٫۵ ولت و فرکانس ۵۰ هرتز به مدار اعمال کنید. تحت این شرایط و با مفروض بودن مقدار خازن داخلی اسیلوسکوپ و با استفاده از روابط مدار، مقدار مقاومت داخلی اسیلوسکوپ را اندازه‌گیری کنید.



شکل (۱- ۱۲)

✓ عملکرد وضعیت *DC* و *AC* کانال‌ها و اثر مخرب وضعیت *AC* روی شکل موج ها

یک سیگنال مربعی با دامنه ۱ ولت و مقدار آفست ۱ ولت ساخته و به هر دو کانال ۱ و ۲ متصل کنید. وضعیت پروب‌ها را در حالت ۱× قرار دهید. (توجه کنید که در اکثر سیگنال ژنراتورهای موجود در آزمایشگاه به منظور اعمال مقدار *DC* به سیگنال منبع، همانطور که در زیر پیچ تنظیم آفست نوشته شده (*Pull ADJ*) باید پیچ آفست را بیرون بکشید تا مقدار آفست مورد نظر به سیگنال اعمال شود، در غیر این صورت این کلید غیرفعال است.

۱- کانال ۲ را در حالت *DC* و کانال ۱ را در حالت *AC* قرار دهید. فرکانس موج ساخته شده را ۱ کیلو هرتز قرار داده و مشاهدات خود را یادداشت و علت آن را بیان کنید.

۲- بدون تغییر وضعیت کانال‌ها، مقدار *DC* منبع را صفر کنید. آیا شکل موج‌های مشاهده شده برای هر دو کانال یکی هستند؟

۳- با حفظ شرایط بخش قبل، فرکانس منبع را به ۶۰*Hz* کاهش دهید. آیا اکنون تفاوتی بین مشاهدات از دو کانال وجود دارد؟ (با رسم شکل موج). حال فرکانس منبع را از ۱۰ هرتز تا ۱کیلوهرتز تغییر دهید و تغییرات شکل موج کانال‌ها را دنبال و یادداشت کنید.

۴- (اختیاری، نمره مثبت): شکل موج فانکشن ژنراتور را از مربعی به مثلثی تغییر داده و مجدد با تغییر فرکانس منبع از ۱۰ هرتز تا ۱کیلوهرتز، تغییرات شکل موج کانال‌ها را دنبال و یادداشت کنید.

۵- روی علت پدیده‌های بند ۳ و ۴(نمره مثبت) بحث کنید و در هر حالت شکل موج‌ها را رسم نمایید.

۶- (اختیاری، نمره مثبت): اگر دقت کنید در بند ۳ در نقاط جهش موج مربعی، سیگنال مشاهده شده توسط کانال ۱ اسیلوسکوپ دارای مقداری بیش از مقدار سیگنال کانال ۲ در آن نقطه می‌باشد. فکر می کنید علت چیست؟

با تغییر فرکانس از ۱۰ هرتز تا ۱کیلوهرتز این پدیده چگونه تغییر می‌کند؟ چرا؟

شرح آزمایش ۱ (جلسه دوم):

✓ تریگر کردن سیگنال‌ها

با کمک سیگنال ژنراتور یک سیگنال سینوسی با دامنهٔ ۱ ولت و فرکانس تقریبی ۱ کیلو هرتز به کانال ۱ اسیلوسکوپ بدهید. منبع تریگر را کانال ۱ و مد نمایش کانال‌ها را نیز کانال ۱ انتخاب کنید. (با این انتخاب شما می توانید شکل موج منبع تریگر را روی صفحه اسیلوسکوپ مشاهده کنید، چون منبع تریگر شما همان کانال ۱ می‌باشد.)

نکته: به منظور مشاهدات صحیح حتماً باید به کمک پیچ پوزیشن محور افقی، سیگنال را به سمت راست صفحه اسیلوسکوپ حرکت دهید تا نقطه شروع آن را در صفحه ببینید.

۱- شیب تریگر را در حالت *slope+* و *slope-* قرار دهید و اثر این انتخاب را ثبت نمایید. علت مشاهدات را بیان کنید.

۲- تنظیم *Trigger level* (سطح تریگر) را تغییر دهید و مشاهدات خود را یادداشت و علت آن را بیان کنید.

۳- در یکی از حالت‌هایی که سیگنال ثابت شده است، سطح تریگر را بر حسب واحد اندازه بگیرید (با رسم شکل).

نکته: حواستان باشد که اکثراً بخشی از شکل موج که شامل نقطه‌ی اصلی شروع منحنی می‌باشد، در زیر پنل اسیلوسکوپ قرار می‌گیرد. به همین دلیل به منظور اندازه‌گیری دقیق سطح تریگر، باید به کمک پیچ تنظیم موقعیت افقی شکل موج را به سمت راست جابه‌جا کنید تا نقطه شروع واقعی دیده شود.

✓ تفاوت عملکرد مد تریگر *Auto* و *Normal* در رابطه با مقدار سطح تریگر

بدون آنکه تنظیمات اسیلوسکوپ و سیگنال ژنراتور بخش قبل را تغییر دهید، تنظیم *Trigger level* را برای وضعیت *Trigger* در مد *Auto* و *Normal* و در دو حالت سطح تریگر منبع تریگر را قطع کند و قطع نکند، انجام دهید و جدول زیر را کامل کنید. علت مشاهدات خود را توضیح دهید.

Normal	*Auto*	مد تریگر
		مشاهدات در حالتی که سطح تریگر منبع تریگر را قطع می‌کند
		مشاهدات در حالتی که سطح تریگر منبع تریگر را قطع نمی‌کند

✓ تفاوت عملکرد مد تریگر *Auto* و *Normal* در فرکانس‌های زیر ۵*Hz*

یک سیگنال سینوسی با فرکانس ۳*Hz* و دامنه ۲ ولت را به کانال ۱ اسیلوسکوپ متصل کنید. مد تریگر را در حالت *Normal* و منبع تریگر را کانال ۱ قرار دهید. پس از تنظیمات لازم، سطح تریگر را آنقدر تغییر دهید تا شکل موج تریگر شده‌ای در صفحه ببینید.
بدون آنکه سطح تریگر را تغییر دهید، وضعیت *Trigger* را در حالت *Auto* قرار دهید. آیا شکل موج همچنان تریگ شده باقی می‌ماند؟ مشاهدات خود را یادداشت و علت آن را بیان کنید. (در فرکانس‌های خیلی پایین تشخیص تریگر شدن سیگنال از روی نقطه شروعش می‌باشد. سیگنال تریگ شده نقطه شروعش در ابتدای صفحه همیشه ثابت است و جابه‌جا نمی‌شود. یعنی سیگنال همیشه از یک جای صفحه شروع به رسم می‌کند.)

✓ (اختیاری، نمره مثبت) تفاوت عملکرد مد نمایش *ALT* و *CHOP* در فرکانس‌های پایین

یک سیگنال سینوسی با فرکانس ۱۰ هرتز و دامنه ۲ ولت به کانال ۱ و ۲ اسیلوسکوپ متصل کنید. ابتدا مد نمایش را بروی کانال ۱ قرار داده و با قرار دادن منبع تریگر بر روی کانال ۱ و تنظیم *Trigger level* سعی کنید شکل موج سینوسی در در صفحه اسکوپ ثابت کنید، سپس مد نمایش را بر روی *ALT* قرار دهید. پس از آن و با تغییر وضعیت نمایش بر روی *CHOP*، تفاوت مشاهدات خود در این حالت و حالت قبل را شرح داده و علت آن را توضیح دهید.

✓ تریگر خارجی

سیگنال ژنراتور را روی موج سینوسی با فرکانس ۱*kHz* قرار داده و به کانال ۱ اسیلوسکوپ متصل کنید. حال با کمک سیگنال ژنراتور دیگری موج مثلثی ساخته و به ورودی تریگر خارجی اسیلوسکوپ متصل کنید و کلید منبع تریگر اسکوپ را در حالت *External* قرار دهید. فرکانس موج مثلثی را روی مقادیر ۲۰۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ هرتز قرار داده و با تغییر فرکانس حول این مقادیر سعی کنید تا شکل موج سینوسی را در صفحه اسیلوسکوپ تقریباً ثابت نگاه دارید. مقادیر فرکانس را بعد از ثابت شدن تقریبی شکل موج سینوسی یادداشت کرده و دلیل مشاهدات خود را توضیح دهید.

✓ تریگر همزمان دو کانال غیر هم‌فرکانس

به کمک دو سیگنال ژنراتور موجود روی میز آزمایشگاه دو سیگنال با فرکانس‌های متفاوت که ضریبی از هم نباشند، به کانال ۱ و ۲ اسیلوسکوپ اعمال کنید. مد نمایش کانال‌ها را روی نمایش همزمان دو کانال قرار دهید و سعی کنید در حالی‌که هر دو کانال مشاهده می‌شود هر دو را روی صفحه ثابت کنید. کدام کلیدها مورد استفاده قرار گرفته و نحوه عملکرد آنها را توضیح دهید.

آزمایش ۲

آشنایی با مولتی مترهای دیجیتال

هدف از این آزمایش :

استفاده صحیح از مولتی‌مترهای دیجیتال معمولی

چگونگی اندازه‌گیری ولتاژ، جریان و مقاومت الکتریکی با استفاده از مولتی‌مترهای دیجیتال

بررسی مقاومت داخلی مولتی‌متر در عملکردها و گستره‌های مختلف

بررسی بازه فرکانسی قابل قبول برای اندازه‌گیری و خطای مولتی‌متر در فرکانس‌های مختلف

✓ نمایش ولتاژ و جریان متناوب توسط مولتی‌متر

نمایش ولتاژ و جریان متناوب در مولتی‌مترهای دیجیتال معمولی همواره بر اساس مقدار مؤثر انجام می‌شود. با فرض سینوسی بودن شکل موج ولتاژ، این اندازه‌گیری و نمایش با در نظر گرفتن ضریب ۰/۷۰۷ معادل خواهد بود. این روش در بسیاری از مولتی‌مترهای دیجیتال امروزی وجود دارد، اگر چه می‌توانند دارای ساختاری باشند که این خطا را کمتر کنند. لذا هنگام اندازه‌گیری ولتاژها و جریان‌های غیرسینوسی باید مطمئن شد که ابزارها دچار خطای زیادی نمی‌شوند. در جایگاه‌هایی که اندازه‌گیری دقیق مورد نیاز است باید از مولتی‌مترهایی استفاده کرد که *True RMS* هستند. در اینگونه مولتی‌مترها مقدار دقیق مؤثر نشان داده می‌شود. در مولتی‌مترهایی که دارای این قابلیت می‌باشند، عبارت *True RMS* روی آنها درج شده است.

رابطه مقدار موثر یا *RMS* سیگنال متناوب:

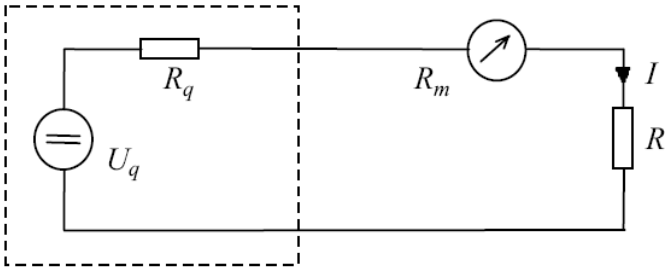
$$U_{eff} = U = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T (u(t))^2 dt}$$

✓ عملکرد اهم‌متر

عملکرد اهم‌مترهای دیجیتال نیز به این شکل است که در مدار داخلی شان با برقراری یک جریان ثابت روی مقاومت اندازه گیری، ولتاژ دو سر عنصر را می‌خواند و از تقسیم ولتاژی که می‌خواند به جریان ثابت عدد مقاومت را روی صفحه نمایش می‌دهد. از این رو برای اندازه‌گیری درست در این حالت نباید منبع جریان یا منبع ولتاژ دیگری در مدار اندازه گیری قرار داشته باشد.

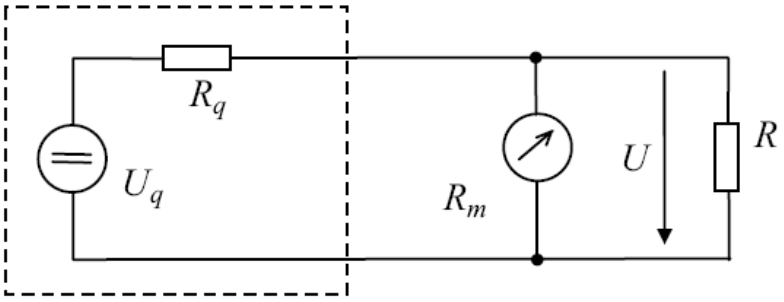
✓ نحوه قرارگیری مولتی‌مترها در مدار

آمپرمتر به طور سری در مدار قرار می‌گیرد. در این حالت علاوه بر مقاومت داخلی منبع تغذیه، مقاومت داخلی آمپرمتر نیز در مقدار اندازه‌گیری تأثیر می‌گذارد. به این تأثیر روی مقدار اندازه‌گیری شده، اثر بارگذاری آمپرمتر و منبع تغذیه گفته می‌شود. در شکل (۲- ۱) آمپرمتر جریان I را اندازه می‌گیرد، R_m و R_q به ترتیب مقاومت داخلی آمپرمتر و منبع تغذیه U_q می‌باشند.



شکل(۲- ۱): نحوه قرارگیری آمپرمتر در مدار

شکل (۲- ۲) مدار اندازه‌گیری ولتاژ با ولت‌متر را نشان می‌دهد. در این حالت ولت‌متر به همراه مقاومت داخلی بزرگش موازی با مجموعه قرار می‌گیرد که با توجه به مقدار مقاومت مدار در حال اندازه‌گیری، اثر بارگذاری خواهیم داشت.



شکل(۲- ۲): نحوه قرارگیری ولت‌متر در مدار

شرح آزمایش

✓ بررسی رابطهٔ مقدار مورد نمایش و مقدار اندازه‌گیری شده در ولتاژهای متناوب

گام اول: با کمک سیگنال ژنراتور یک ولتاژ سینوسی با فرکانس قدرت (معمولاً به فرکانس‌های بین ۵۰ تا ۴۰۰ هرتز گفته می‌شود که در شبکه‌های برق‌رسانی استفاده می‌شوند. در هواپیماها برای سبک شدن ترانسفورماتورها، موتورها و ژنراتورها از برق ۴۰۰ هرتز استفاده می‌شود) و دامنه ۳ ولت تولید کرده، به اسیلوسکوپ و مولتی‌متر دستی در اختیارتان متصل کنید. دقت کنید در اتصال مربوط به سیگنال ژنراتور سیم قرمز رنگ سیم سیگنال و سیم مشکی به معنی زمین است.

روی میز کار شما دو نوع مولتی‌متر قرار دارد، یکی از مولتی‌مترها دستی است که به راحتی قابل حمل و نقل می‌باشد. مولتی‌متر دیگر اصطلاحاً مولتی‌متر رومیزی گفته می‌شود که نیاز به برق شهر جهت تأمین تغذیه آن دارد. شکل‌های (۲- ۳) و (۲- ۴) نمونه‌هایی از این مولتی‌مترها را نشان می‌دهد.

(ب) (الف)

شکل(۲- ۳): (الف) یک نمونه مولتی‌متر دستی (ب) یک نمونه مولتی‌متر دستی *True RMS*

شکل(۲- ۴): مولتی‌متر رومیزی نمونه

گام دوم: مقدار قلهٔ ولتاژ را از اسیلوسکوپ با دقت قرائت کنید و با مقادیر نشان داده شده توسط مولتی‌متر دستی مقایسه نمائید. اعداد اندازه‌گیری را در جدول (۲- ۱) یادداشت کنید.

حال با کمک دکمه‌های انتخاب شکل موج بر روی سیگنال ژنراتور، شکل موج مثلثی را انتخاب کنید. اندازه‌گیری را مجدد انجام دهید. این کار را برای شکل موج مربعی نیز تکرار کنید.

جدول (۲- ۱)

نوع شکل موج دریافتی از سیگنال ژنراتور	دامنه قرائت شده توسط اسیلوسکوپ	مقدار قرائت شده توسط مولتی‌متر دستی	مقدار تئوری RMS سیگنال	درصد خطای مولتی‌متر دستی
سینوسی				
مثلثی				
مربعی				

۱- آیا مولتی‌متر در اختیارتان اندازه‌گیری درستی را ارائه می‌کند؟

۲- مدل مولتی‌متر رومیزی و دستی موجود روی میز کارتان را به همراه نام شرکت سازنده آنها در گزارش‌کار یادداشت کنید.

دقت کنید: در صورت تعویض مدل مولتی‌مترهای در اختیارتان در بخش‌های بعدی آزمایش، حتماً مدل مورد استفاده در آن بخش را یادداشت کنید.

✓ بررسی رفتار فرکانسی مولتی‌مترهای دیجیتال در حالت ولت‌متر

مشابه مرحلهٔ قبل سیگنال ژنراتور با دامنه ۳ ولت را به اسیلوسکوپ و مولتی‌متر دستی متصل کنید. شکل موج سینوسی را بر روی سیگنال ژنراتور انتخاب کنید.

۱- با تغییر فرکانس از ۳۰۰ کیلوهرتز تا ۵۰ هرتز، مقادیر قلهٔ ولتاژ را از روی اسیلوسکوپ و مقادیر نشان داده شده توسط مولتی‌متر در گستره (۰,۰۰۰) را با هم مقایسه و در جدول (۲- ۲) یادداشت کنید. گستره مولتی‌متر باید حتماً در حالت ۰,۰۰۰ تنظیم شود.

دقت کنید: به منظور صحت مقایسه مقادیر بدست آمده می‌توانید در صورت تغییر قلهٔ (دامنه) ولتاژ بر روی اسیلوسکوپ، با تنظیم سطح دامنه ولتاژ بر روی سیگنال ژنراتور مقدار آن را ثابت حفظ کنید.

جدول (۲- ۲)

$f\ (Hz)$	۵۰	۱۰۰	۵۰۰	۲۰۰۰	۱۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	۵۰۰۰۰	۱۶۰۰۰۰	۳۰۰۰۰۰
اسیلوسکوپ									
مولتی‌متر دستی									

۲- مقادیر بدست آمده را بر اساس فرکانس ۱۰۰ هرتز برای مولتی‌متر یکه کنید (مقادیر بدست آمده را بر مقدار بدست آمده در ۱۰۰ هرتز مولتی‌متر تقسیم کنید) و بر حسب فرکانس در یک نمودار رسم کنید.

دقت کنید: برای مقایسه بهتر معمولاً این نمودار را بصورت نیمه لگاریتمی (محور فرکانس لگاریتمی باشد) نمایش می‌دهند که تمام دهه‌های فرکانسی به یک میزان نشان داده شوند. در غیر این صورت فرکانس‌های کمتر فضای بسیار کمی از نمودار را اشغال خواهند کرد و اطلاعات زیادی از آنها حاصل نمی‌شود. به شکل بدست آمده پاسخ فرکانسی مولتی‌متر می‌گویند.

۳- با استفاده از داده‌های جدول بالا، رفتار فرکانسی مولتی‌متر دستی را با توجه به پهنای باند و میزان نزدیکی به مشخصه ایده‌آل مورد بررسی قرار دهید.

✓ بررسی ولتاژ بایاس مستقیم و تشخیص کاتد و آند دیود

گام اول: حالت $k\Omega$ را روی مولتی‌متر رومیزی انتخاب کنید.

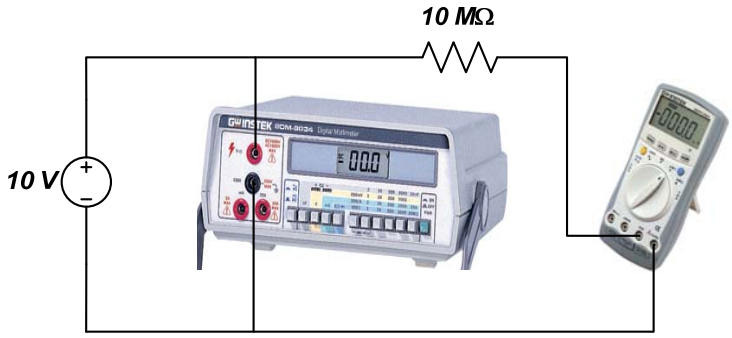
گام دوم: در مولتی‌متر شرکت گودویل مدل GDM-۸۰۳۴ همزمان دو کلید ۲۰۰Ω و ۲$k\Omega$ را فشار دهید تا مولتی‌متر در حالت تست دیودی قرار بگیرد (در مولتی‌متر شرکت ماتریکس مدل MDM-۸۱۴۵ تنها انتخاب کلید ۲$k\Omega$ کافی می‌باشد. به شکل دیود که در زیر کلیدها رسم شده دقت شود).

گام سوم: سیم مشکی رنگ را به COM و سیم قرمز رنگ را به V-Ω متصل کنید.

۱- با اتصال سرهای قرمز و مشکی به دو سر دیود مدل $1N$۴۰۰۷، ولتاژ بایاس مستقیم و هم چنین سرهای مثبت و منفی دیود را با توجه به خط روی دیودها تعیین کنید.
۲- چگونه می‌توان فهمید که دیود سالم است؟

✓ بررسی مقاومت ورودی مولتی‌متر در حالت ولت‌متر

گام اول: مقاومت ۱۰ مگا اهمی را با مولتی‌متر دستی در اختیارتان در حالت ولت‌متر سری کنید.
گام دوم: به کمک منابع تغذیه DC موجود روی میز آزمایشگاه، مطابق شکل (۲- ۵) ولتاژ مستقیم ۱۰ ولت به مجموعهٔ سری مقاومت و مولتی‌متر دستی اعمال کنید. در این شکل مولتی‌متر رومیزی به منظور اندازه‌گیری دقیق ولتاژ اعمالی به مجموعه سری ولت‌متر دستی و مقاومت ۱۰ مگا اهمی استفاده شده است. در صورتیکه نمایشگر منبع تغذیه دارای دقت کافی بوده و ولتمتر رومیزی در دسترس نبود، استفاده از آن ضرورتی ندارد.



شکل(۲- ۵): اندازه‌گیری مقاومت ورودی مولتی‌متر دستی در حالت ولت‌متر

۱- با کمک عدد قرائت شده توسط ولت‌متر دستی و قانون تقسیم ولتاژ بین مقاومت‌های سری، میزان مقاومت ورودی ولت‌متر دستی را بیابید. با تغییر ولتاژ منبع تغذیه و رنج ولت‌متر دستی جدول (۲- ۳) را کامل کنید.

جدول (۲- ۳)

گستره ولت‌متر دستی	۰۰۰.۰ V	۰.۰۰۰ V	۰۰۰.۰ mV
ولتاژ منبع تغذیه (ولت)	۱۰ V	۵ V	۲۵۰ mV
ولتاژ قرائت شده توسط ولت‌متر دستی			
مقاومت ورودی ولت‌متر دستی			

۲- آیا مقاومت ورودی به رنج انتخاب شده روی ولت‌متر بستگی دارد یا خیر؟

۳- مولتی‌متر رومیزی را در حالت اهم‌متر قرار دهید و به کمک آن مقدار مقاومت ورودی مولتی‌متر دستی را در حالت ولت‌متری اندازه‌گیری و در جدول (۲- ۴) یادداشت کنید.

۴- آیا مقادیر بدست آمده با اعداد جدول (۲-۳) برابر هستند؟

جدول (۲- ۴)

گستره ولت‌متر دستی	۰۰۰.۰ V	۰.۰۰۰ V	۰۰۰.۰ mV
مقدار مقاومت ولت‌متر دستی قرائت شده توسط اهم‌متر			

۵- اگر مولتی‌متر در حالت *out of range* یا *over load* قرار بگیرد، نمایشگر چه چیزی را نشان می‌دهد؟

✓ بررسی مقاومت ورودی مولتی‌متر در حالت آمپرمتر

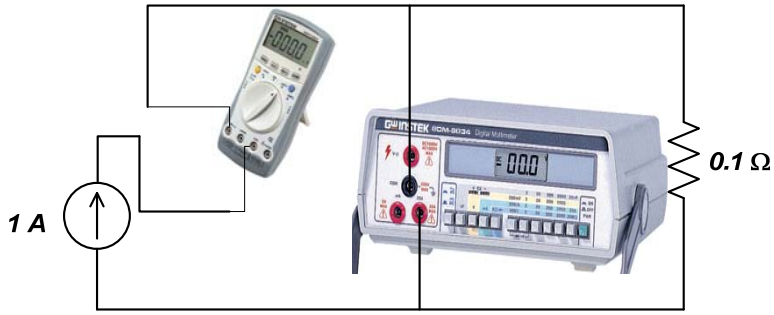
تمام مولتی‌مترهای دیجیتال به طور ذاتی اندازه‌گیر ولتاژ هستند و برای اندازه‌گیری جریان آن را با عبور از مقاومت شنت (موازی) تبدیل به ولتاژ می‌کنند و سپس با توجه به مشخص بودن مقدار مقاومت موازی می‌توانند مقدار جریان را نشان دهند.

گام اول: برای اندازه‌گیری این مقاومت، مولتی‌متر رومیزی را در حالت آمپرمتر (اندازه‌گیری جریان در گستره آمپر) قرار داده و با مقاومت ۰/۱ اهمی (پتانسیومتر ۰/۱×) موازی کنید.

دقت کنید: با توجه به اهمیت افت ولتاژ روی سیم‌های رابط باید از سیم‌های کوتاه و ضخیم جهت موازی کردن آنها بهره جست، در غیر این صورت مقاومت به دست آمده برای بعضی از گستره‌ها دارای خطای زیادی بوده و قابل قبول نمی‌باشد .

گام دوم: مولتی‌متر دستی را در حالت آمپرمتر (اندازه‌گیری جریان در گستره آمپر) با مجموعهٔ موازی مقاومت و آمپرمتر رومیزی سری کنید.

گام سوم: از منبع تغذیه ولتاژ *DC* موجود روی میز آزمایشگاه استفاده کنید. در ابتدا سلکتور تنظیم جریان منبع تغذیه مورد نظر را در حالت حداقل قرار دهید و سپس منبع را به مجموعهٔ کامل شده بالا مطابق شکل (۲- ۶) متصل کنید. با افزایش سطح جریان منبع تغذیه به آرامی و قرائت آن توسط مولتی‌متر دستی مقدار جریان را به مقدار ۱ آمپر برسانید.



شکل(۲- ۶): اندازه‌گیری مقاومت ورودی مولتی‌متر در حالت آمپرمتر

۱- با کمک عدد قرائت شده توسط آمپرمتر رومیزی و قانون تقسیم جریان بین دو مقاومت موازی، مقدار مقاومت ورودی آمپرمتر رومیزی را تعیین کنید. در هر گستره آمپرمتر، مقدار مقاومت موازی را به گونه‌ای انتخاب کنید که جریان تقریباً به طور مساوی بین دو شاخه موازی تقسیم گردد. در این مرحله لازم می‌شود که از مقاومت‌های دهدهی دیگری که در روی میز کارتان قرار دارد استفاده کنید. تغییر مقاومت نیز به این دلیل است که در همه گستره‌ها، مقاومت ۰٫۱ Ω منجر به تقسیم جریان مناسب جهت محاسبات نمی‌گردد. با کاهش جریان، تغییر گستره آمپرمتر و مقدار مقاومت موازی با آن جدول (۲- ۵) را کامل کنید.

دقت کنید: هنگام تغییر گستره آمپرمتر از آمپر به میلی‌آمپر، اتصال پورت‌های آمپرمترهای رومیزی و دستی را بر حسب نیاز از آمپر به میلی‌آمپر جابه‌جا کنید.

دقت کنید: هرگز نباید جریانی بیش از گستره انتخاب شده از آمپرمترها عبور کند. چرا؟

۲- چه عوامل خطایی در این آزمایش وجود دارد؟

جدول (۲- ۵)

گستره آمپرمتر رومیزی	۲۰ A	۲۰۰۰ mA	۲۰ mA
جریان منبع تغذیه (آمپر)	۱ A	۱ A	۱۵ mA
جریان قرائت شده توسط آمپرمتر رومیزی			
مقدار مقاومت موازی شده با آمپرمتر رومیزی			
مقاومت ورودی آمپرمتر رومیزی			

۳- آیا مقاومت ورودی به گستره انتخاب شده روی آمپرمتر بستگی دارد یا خیر؟

۴- مولتی‌متر دستی را در حالت اهم‌متر قرار دهید و به کمک آن مقدار مقاومت ورودی مولتی‌متر رومیزی را در حالت آمپرمتر اندازه‌گیری و در جدول (۲- ۶) یادداشت کنید.

۵- آیا مقادیر بدست آمده با اعداد جدول (۲- ۵) برابر هستند؟

جدول (۲- ۶)

گستره آمپرمتر رومیزی	۲۰ A	۲۰۰۰ mA	۲۰ mA	۲۰۰ μA
مقدار مقاومت آمپرمتر رومیزی قرائت شده توسط اهم‌متر				

آزمایش ۳

بررسی قانون جمع آثار،

مدار تونن و نورتن،

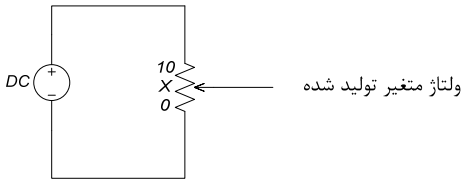
مدار پل وتسون و قضیه انتقال حداکثر توان

هدف از این آزمایش آشنایی با برخی قضایای ساده و در عین حال مهم مدار از قبیل جمع آثار، مدار تونن و نورتن، انتقال حداکثر توان به بار، پل وتسون و ... در مدارهای مقاومتی می‌باشد.

✓ کاربرد پتانسیومتر در تولید منابع با مقادیر مختلف از یک منبع تغذیه اصلی

اکثر اوقات در مدارها نیاز به چندین مقدار متفاوت منابع ولتاژ می‌باشد که از آن جمله می‌توان به مدارهای شامل آمپ‌امپ اشاره کرد که علاوه بر منابع ولتاژ ورودی به دو منبع ولتاژ جداگانه جهت بایاس آمپ‌امپ نیاز دارند. در صورتی که با محدود بودن تعداد منابع روبه‌رو باشیم، یک راه تولید منابع ولتاژ با مقادیر مختلف در آزمایشگاه، استفاده از پتانسیومتر است.

پتانسیومتر عنصری سه سر است که ولتاژی به دو سر ۰ و ۱۰ آن داده می‌شود و با توجه به قانون تقسیم ولتاژ بین دو مقاومت سری از سر سوم آن می‌توان ولتاژ دیگری را دریافت کرد. بنابراین با توجه به این که شاخص (سلکتور) پتانسیومتر بر روی چه عددی قرار گرفته باشد، می‌توان ولتاژهای مختلفی را از سر سوم (×) گرفت. نکته‌ی بسیار مهمی که باید مورد توجه قرار گیرد این است که رنج پتانسیومتر مورد استفاده باید به گونه‌ای انتخاب شود که اثر بارگذاری مقاومت ورودی مدار روی مقدار ولتاژ متغیر تولید شده بسیار ناچیز باشد. شکل (۳- ۱) مدار مورد نیاز جهت تولید ولتاژ متغیر از پتانسیومتر را نشان می‌دهد.



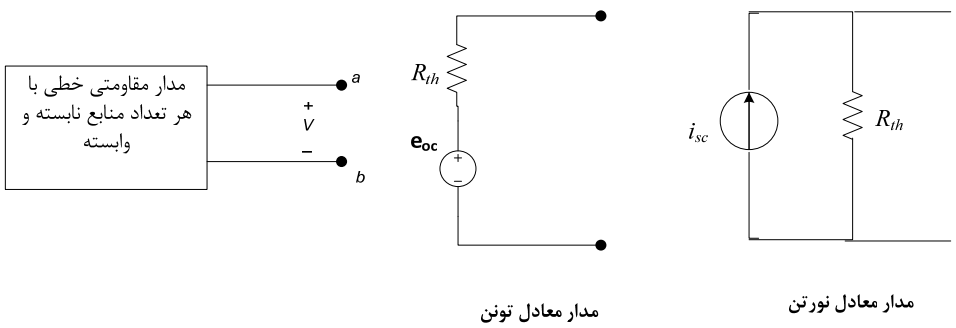
شکل(۳- ۱)

✓ مدار معادل تونن و نورتن

در بعضی موارد به رفتار دو سر یک مدار خطی نیاز داریم. این موضوع کاربردهای بسیار زیادی در تحلیل مدارها دارد. به عنوان مثال زمانی که یک مدار خطی در کنار یک مدار غیرخطی قرار می‌گیرد، ما به رفتار دو سر مدار خطی برای به دست آوردن نقطه‌ی کار نیاز داریم.

رفتار یک مدار خطی در دو سر آن را می‌توان به صورت اتصال سری منبع ولتاژ با یک مقاومت (مدار معادل تونن) و یا اتصال موازی منبع جریان با یک مقاومت (مدار معادل نورتن) در نظر گرفت. شکل (۳- ۲) مدار معادل تونن و نورتن را نشان می‌دهد. رابطه‌ی میان مدار معادل تونن و نورتن به صورت زیر می‌باشد:

$e_{oc}=R_{th}.i_{sc}$

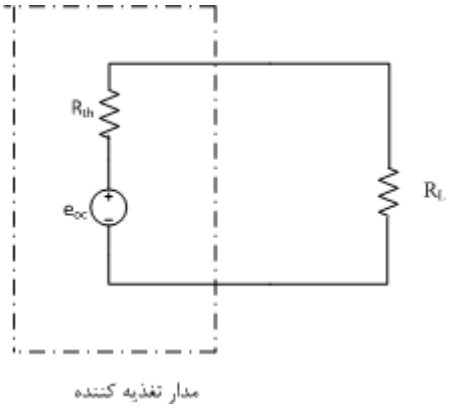


شکل(۳- ۲)

✓ قضیه‌ی انتقال توان ماکزیمم

مدار شکل (۳- ۳) را که بار R_L را تغذیه می‌کند، در نظر بگیرید. مدار معادل تونن مدار تغذیه کننده به صورت R_{th} و e_{oc} می‌باشد. در صورتی ماکزیمم توان به بار منتقل می شود که شرط زیر برقرار باشد:

$R_{th}=R_L$



شکل(۳- ۳)

شرح آزمایش

✓ بررسی اصل جمع آثار

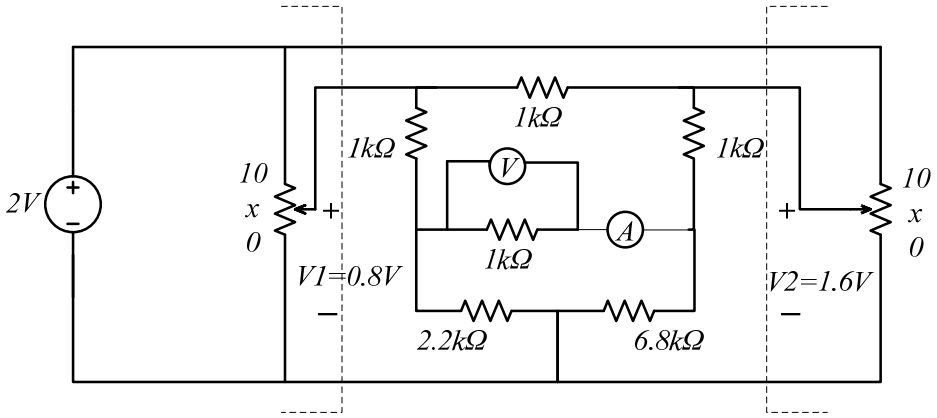
مدار شکل (۳- ۴) را ببندید. در این آزمایش تنها از یک منبع ولتاژ با مقدار ثابت ۲ ولت استفاده کنید و با استفاده از پتانسیومترهای ۱۰× و۱۰۰× منابع مورد نظر را به دست آورید. ولت‌متر موجود در مدار را به صورت سیار قرار دهید تا به راحتی بتوانید ولتاژ منابع و شاخه مورد نظر را اندازه بگیرید. مقدار V را با استفاده از مولتی‌متر دستی و مقدار I را به کمک مولتی‌متر رومیزی اندازه‌گیری کنید. (لطفاً یادداشت کنید که هر پتانسیومتر جهت تولید کدام منبع استفاده شده و شاخص آن روی چه مقداری تنظیم شده است).

۱- پس از اندازه‌گیری V و I در حضور هر دو منبع، یک بار منبع V_1 و بار دیگر منبع V_2 را غیر فعال کرده و مجدد مقادیر V و I را در هر مرحله به صورت جداگانه بخوانید و جدول (۳-۱) را کامل کنید. (برای غیرفعال کردن منبع ولتاژ باید دو سر آن اتصال کوتاه شود).

دقت کنید: مقدار منابع V_1 و V_2 خواسته شده در جدول زیر را به ازای هر حالت حتماً مجدد اندازه بگیرید و در صورت تغییر منبع سعی کنید با تغییر پتانسیومتر مربوط به آن تا حد ممکن مقدار منبع را به مقدار عددی آنها در ستون اول (یعنی حالت هر دو منبع V_1 و V_2 در مدار باشد) نزدیک کنید، تا قانون جمع آثار در این مدار قابل بررسی باشد. سپس مقدار عددی ولتاژ منبع بهبود یافته را در جدول یادداشت نمایید.

جدول (۳-۱)

	هر دو منبع V_1 و V_2 در مدار باشد	منبع V_1 حذف شود	منبع V_2 حذف شود
مقدار منبع V_1 پس از اتصال به مدار (ولت)			
مقدار منبع V_2 پس از اتصال به مدار (ولت)			
مقدار ولتاژ قرائت شده توسط ولت‌متر			
مقدار جریان قرائت شده توسط آمپرمتر			



شکل(۳- ۴)

۲- به کمک اعداد جدول (۳-۱) اصل جمع آثار را تحقیق کنید.

۳- آیا از پتانسیومتر $x۱۰۰۰۰$ هم می‌توان برای تولید منابع در این مدار استفاده کرد؟ پتانسیومتر مورد نظر را جایگزین یکی از پتانسیومترهای موجود در مدار نموده و ببینید آیا می‌توان منابع ۱٫۶ یا ۰٫۸ ولت را دوباره تولید کرد. علت این مسئله را به طور کامل توضیح دهید. بیشینه و کمینه ولتاژی که به کمک این پتانسیومتر و با تغییر شاخص آن بین ۱ تا ۹ به دست می‌آید، را یادداشت کنید.

۴- مقادیر V و I را به صورت تئوری به دست آورید و با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه کنید و در صورت وجود اختلاف، علت را توضیح دهید.

✓ بررسی مدار تونن و نورتن

مدار شکل (۳- ۵) را ببندید و مراحل زیر را به ترتیب انجام دهید.
دقت کنید: برای اندازه‌گیری جریان و ولتاژ حتماً از مولتی متر دستی استفاده کنید.

۱- با مدار باز کردن a و b ولتاژ مدار باز (e_{oc}) را بخوانید.

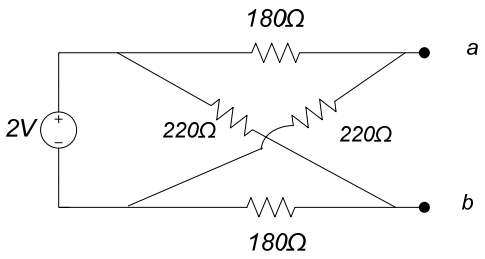
۲- با اتصال کوتاه کردن دو نقطه‌ی a و b جریان اتصال کوتاه (i_{sc}) را بخوانید. در این حالت مولتی‌متر دستی را در حالت mA قرار دهید.

۳- با استفاده از مقادیر به دست آمده R_{th} را حساب کنید.

۴- منبع ولتاژ را حذف کنید و با استفاده از اهم‌متر مقاومت تونن دیده شده از دو سر مدار را بخوانید.

۵- به صورت تئوری مقاومت تونن دیده شده را حساب کنید و با نتایج قسمت ۳ و ۴ مقایسه کنید، در صورت اختلاف علت را توضیح دهید.

۶- منبع ولتاژ را مجدد به مدار متصل کنید. مولتی‌متر دستی را در حالت μA قرار دهید و جریان اتصال کوتاه را مطابق بخش ۲ مجدد اندازه بگیرید. بار دیگر R_{th} را حساب کنید و در صورت وجود اختلاف، علت را به طور کامل توضیح دهید.



شکل(۳- ۵)

۷- در مدار شکل (۳-۵) جای یکی از مقاومت‌های ۱۸۰ اهمی و ۲۲۰ اهمی را با هم جابه‌جا کنید. در این حالت بخش‌های ۱ تا ۳ را مجدد انجام دهید و نتایج حاصل را گزارش کنید.

۸- آیا از طریق تئوری و به کمک رابطه $(R_{th}=e_{oc}/i_{sc})$ می‌توان R_{th} را در مدار جدید محاسبه کرد؟ چرا؟

۹- آیا مدار جدید یک پل وتسون متعادل است؟ در صورتی که جواب مثبت است، مدار بالا را به شکل متعارف پل وتسون رسم کنید. حال علت آنچه در بخش ۸ مشاهده کردید را بیشتر درک می‌کنید.

۱۰- مدار معادل تونن مدار جدید را از دو سر مورد نظر یکبار از طریق تئوری (بدون استفاده از رابطه $(R_{th}=e_{oc}/i_{sc}$ و بار دیگر به کمک داده‌های عملی رسم کنید. اگر تفاوتی دارد علت آن را بیان کنید.

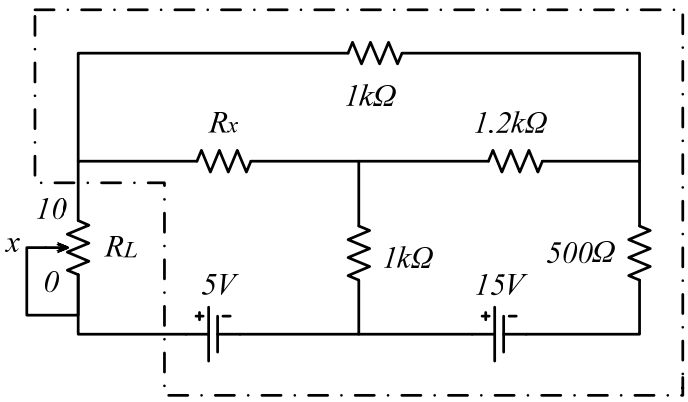
✓ بررسی مدار پل وتسون و قضیه انتقال حداکثر توان

۱- مقاومت مجهول R_x را به گونه‌ای حساب کنید که پل وتسون شکل (۳- ۶) در غیاب منبع $۱۵V$ متعادل شود.$(R_x=?)$

۲- به صورت تئوری مقاومت تونن را از دو سر R_L حساب کنید و سپس مدار شکل (۳-۶) را با منبع $15V$ و $5V$ ببندید. پتانسیومتر مورد استفاده برای R_L باید با توجه به اعداد جدول (۳-۲) انتخاب شود.

۳- R_L را با توجه به جدول (۳-۲) مقداردهی کنید و مشخص نمایید در کدام حالت بیشترین توان به بار منتقل می شود.

۴- نمودار توان بر حسب R_L را رسم نمایید.



شکل(۳- ۶)

جدول (۳-۲)

R_L	۰,۲*R_{th}	۰,۵*R_{th}	۰,۷*R_{th}	R_{th}	۱,۲*R_{th}	۱,۵*R_{th}	۱,۸*R_{th}
x (شاخص پتانسیومتر)							
ولتاژ دو سر مقاومت ۱,۲$k\Omega$							
$V_{RL}(Volt)$							
$I_{RL}(mA)$							
$P_{RL}(mW)$							

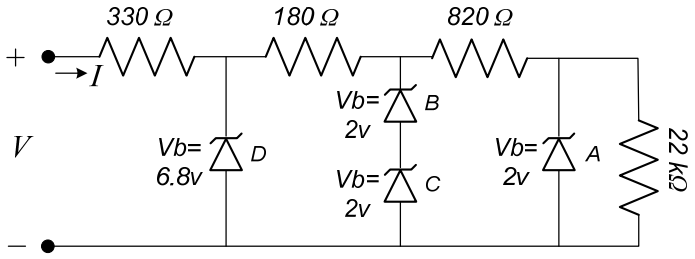
آزمایش ۴

مدارهای غیرخطی

هدف آشنایی با رفتار عناصر غیرخطی مقاومتی و نحوه تحلیل آنها در مدار می‌باشد. برای ایجاد مدار غیرخطی از دیود زنر استفاده می‌کنیم.

خودآزمایی

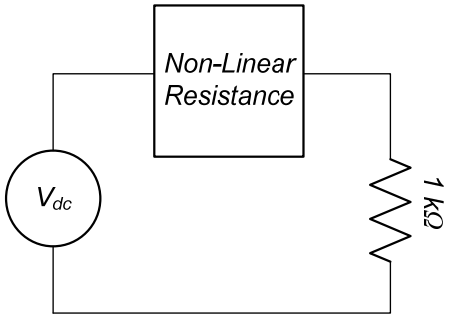
۱- مدار شکل زیر تحقق یک مقاومت غیرخطی است (یعنی منحنی جریان-ولتاژ این شبکه‌ی تک قطبی خطی نیست). با کمک نرم‌افزار *Multisim* منحنی جریان-ولتاژ این شبکه تک قطبی را بدست آورید. دقت نمایید که می‌خواهیم دیودهای زنر را در حالت بایاس معکوس بررسی کنیم. برای این کار ولتاژ ورودی را در محدوده $0 < V_i < 15^{v}$ قرار دهید.



شکل (۴-۱)

۲- مدار شکل (۴-۲) را به کمک نرم‌افزار شبیه‌سازی کرده و شماتیک آن را در حالی که مقادیر جریان و ولتاژ کلیه شاخه‌ها و گره‌ها روی آن مشخص شده تحویل دهید. به جای مقاومت غیرخطی شکل (۴-۲) مدار شکل (۴-۱) را جایگزین نمایید. دامنه منبع ولتاژ *DC* را ۱۲ ولت فرض کرده و پایه مثبت مقاومت غیرخطی را به سر مثبت منبع متصل کنید.

۳- در مدار شکل زیر منحنی جریان-ولتاژ عنصر غیرخطی را همان منحنی بدست آمده از نرم‌افزار در سوال ۱ فرض کنید. نقطه کار عنصر غیرخطی را تعیین کنید (منظور مقادیر ولتاژ و جریان عنصر غیرخطی در این مدار است). دامنه ولتاژ *DC* را ۱۰ ولت فرض کنید.



شکل (۴-۲)

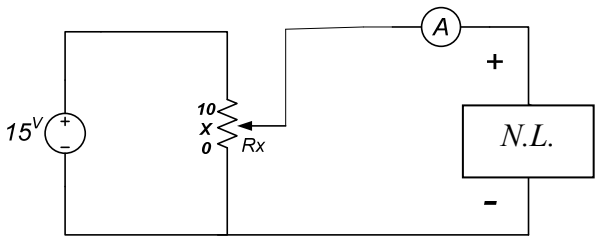
شرح آزمایش

✓ منحنی تغییرات $I=f(V)$ شبکه غیرخطی

۱- شکل (۴-۳) را ببندید. در این شکل عنصر مفروض همان عنصر غیرخطی شکل (۴-۱) است. با تغییر پتانسیومتر و در نتیجه تغییر R_x، مقادیر جریان و ولتاژ را بخوانید و جدول زیر را کامل نمایید. سپس منحنی تغییرات $I=f(V)$ را برای عنصر غیرخطی رسم نمایید. از پتانسیومتر ۱۰۰۰× برای مقاومت متغیر استفاده کنید.

♣ با توجه به اینکه در این آزمایش پاسخ شبکه غیرخطی در حالتی که دیودهای زنر در بایاس معکوس قرار می‌گیرند و می‌شکنند مورد توجه می‌باشد، در اتصال سر مثبت و منفی شبکه غیرخطی در کلیه مدارهای این آزمایش دقت لازم را داشته باشید.

♣ منظور از اندیس‌های A، B، C و D در جدول زیر دیودهای زنر شکل (۴-۱) می‌باشد.



شکل (۴-۳)

$R_x\,(k\Omega)$	۱	۲	۵	۷	۸	۹	۱۰
$I_{N.L.}(mA)$							
$V_{N.L.}(V)$							
$V_A(V)$							
$V_B(V)$							
در هر حالت در صورتی که داده‌ها گویا هست، مشخص کنید کدام یک از دیودهای زنر A و B در جهت معکوس شکسته‌اند.							

$I_A(mA)$	
$I_B(mA)$	
$I_D(mA)$	
$R_{in\text{-}N.L.}$ به دست آمده از داده‌های اندازه‌گیری	
$R_{in\text{-}N.L.}$ محاسبه شده از تئوری با فرض ایده‌آل بودن دیودهای زنر	

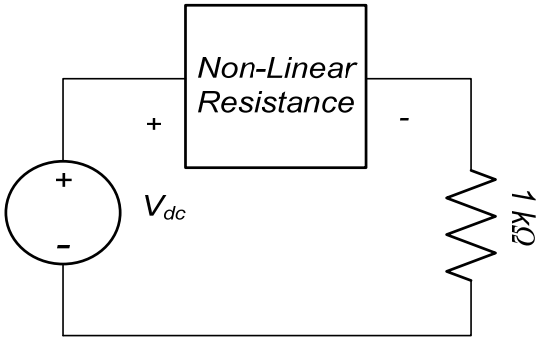
۲- آیا مقاومت $R_{in\text{-}N.L.}$ به دست آمده از داده‌های اندازه‌گیری و $R_{in\text{-}N.L.}$ محاسبه شده با هم برابر هستند؟ در صورت وجود اختلاف، علت آن را بیان کنید.

✓ اندازه‌گیری نقطه کار شبکه غیرخطی

۱- با استفاده از عنصر غیرخطی قسمت قبل مدار شکل زیر را ببندید. منبع ولتاژ را روی ۱۲ ولت تنظیم کنید. مقادیر ولتاژ و جریان شبکه غیرخطی را اندازه بگیرید.

۲- آیا نقطه کار به دست آمده برای شبکه غیرخطی در مشخصه $I\text{-}V$ آن (جدول بالا) صدق می‌کند؟ در صورت عدم تطابق مشکل را رفع نموده و توضیح دهید.

۳- منحنی $I\text{-}V$ و خط بار را به کمک *Multisim* روی هم رسم کنید. نقطه کار شبکه غیرخطی را از روی منحنی حاصل به دست آورده و با نتیجه بند ۱ مقایسه کنید.



شکل (۴-۴)

✓ نمایش مشخصه $I\text{-}V$ شبکه غیرخطی توسط اسیلوسکوپ

۱- منحنی جریان-ولتاژ عنصر غیرخطی فوق را می‌توان با استفاده از مود عملکردی لیساژو روی اسیلوسکوپ مشاهده کرد. برای این کار مدار شکل (۴-۵) را ببندید.

♣ دوشاخه برق دستگاه فانکشن ژنراتور (منبع *ac*) را از زمین برق شهر ایزوله کنید (از مسئولین آزمایشگاه کمک بگیرید).

۲- توسط منبع *ac* یک ولتاژ سینوسی با دامنه‌ی ۸ ولت و آفست ۶.۵+ ولت با فرکانس *Hz* ۵۰۰ اعمال کنید.

♣ به منظور مشاهده مشخصه *I-V* شبکه غیرخطی در حالت بایاس معکوس دیودهای زنر، در صورتی‌که از آفست ۶,۵+ ولت استفاده کرده‌اید باید سر قرمز منبع *ac* را به سر شبکه غیرخطی و سر مشکی آن را به سر مقاومت ۱۰ اهمی متصل کنید. در صورتی‌که سرهای منبع *ac* برعکس آنچه گفته شد متصل شده باشد، برای دستیابی به منظور سوال باید آفست ۶,۵- ولت اعمال گردد.

۳- نقاط شکست منحنی *I-V* شبکه غیرخطی مورد نظر را از طریق تئوری محاسبه کنید. (دیودهای زنر را ایده‌آل فرض کنید.)

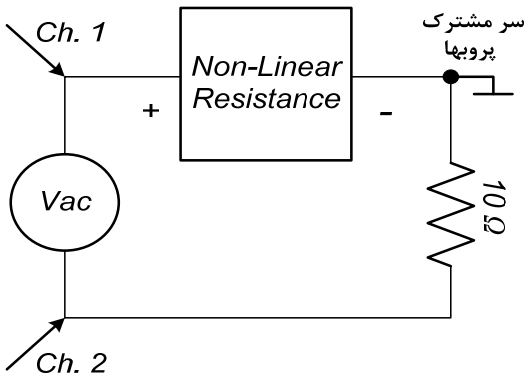
۴- مشخصه *I-V* مورد نظر را به کمک اسیلوسکوپ مشاهده و آن را رسم نمایید. ولتاژ نقاط شکست را روی منحنی مشخص کرده و با نتایج بخش ۳ مقایسه نمایید.

۵- منبع *ac* را از حالت ایزوله خارج کنید و بار دیگر منحنی مورد نظر را رسم کنید، چه تفاوتی حاصل می‌شود؟ چرا؟ (به منظور مشاهده بهتر منحنی، مقدار *volt/div* کانالی که تنظیم کننده مقیاس محور عمودی می‌باشد را در کمترین مقدارش قرار دهید تا منحنی تا حد امکان روی صفحه اسیلوسکوپ در راستای عمودی گسترش داده شود.)

۶- منبع *ac* را بار دیگر ایزوله و منحنی را مجدد ملاحظه کنید. همانطور که مشاهده می‌شود بعضی از نقاط شکست به وضوح دیده شده و بعضی دیگر به سختی قابل تشخیص هستند. در این مدار دیود زنر ۶,۸ ولتی را با ۳ دیود زنر ۲ ولتی که به صورت سری به هم متصل شده و مانند یک زنر ۶ ولتی عمل می‌کنند، جایگزین کنید. منحنی حاصل در حالت بایاس معکوس و بایاس مستقیم زنرها چه تغییراتی می‌کند؟ با رسم شکل. (از تفاوت ۰,۸*V* میان ولتاژ شکست دو حالت صرف‌نظر کنید)

۷- در مدار شکل (۴-۵) پس از بازگرداندن دیود ۶,۸ ولتی به مدار، دیود زنر *B* را از مدار خارج نموده و اثر آن را روی منحنی و نقاط شکست با رسم شکل، اندازه‌گیری ولتاژ نقاط شکست و علت آن گزارش دهید. ولتاژهای شکست مدار جدید را از طریق تئوری محاسبه کرده و با نتایج عملی مقایسه کنید. (خارج نمودن دیود در اینجا به معنی مدار باز کردن شاخه شامل دیود است)

۸- با تغییر مقدار آفست، مقاومت شبکه غیرخطی را در حالت بایاس مستقیم دیودها از روی شکل اندازه بگیرید و با مقدار تئوری مقایسه کنید.



شکل (۴-۵)

۹- منحنی I-V دیودهای زنر $۶,۸V$ و $۲V$ را به کمک اسیلوسکوپ مشاهده و رسم نمایید؟ حال علت عدم وضوح بعضی از نقاط شکست و آنچه در بخش ۶ مشاهده کردید را توضیح دهید.

۱۰-چرا در این آزمایش از یک ولتاژ سینوسی با دامنه‌ی ۸ ولت و آفست ۶,۵+ استفاده شده است؟ منحنی I-V شبکه غیرخطی مدار شکل (۴-۵) را به ازای یک ولتاژ سینوسی با دامنه‌ی ۵ ولت و آفست صفر از طریق تئوری رسم نمایید، چه مشکلی پیش می‌آید، چرا؟

♣ **در پایان آزمایش حتماً منبع *ac* را از حالت ایزوله و کانال ۲ اسیلوسکوپ را از حالت *inverse* خارج کنید.**

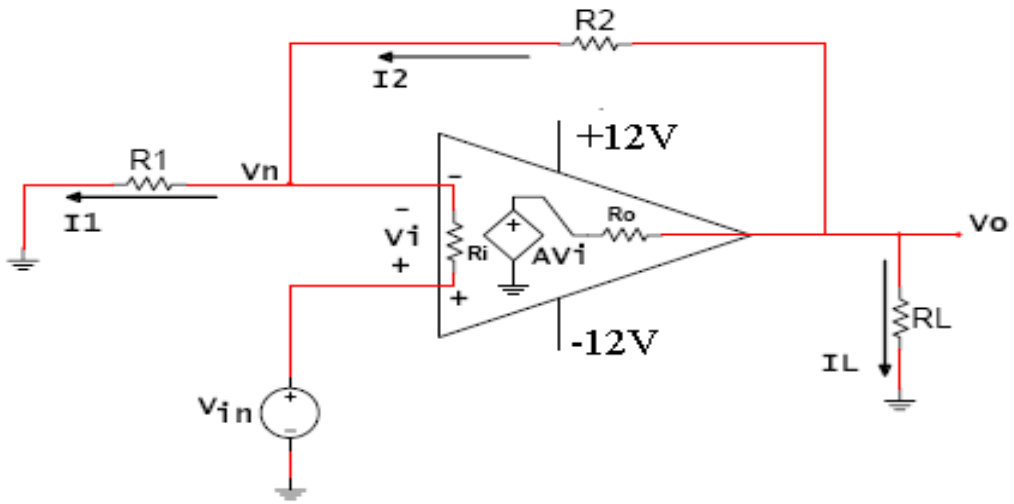
آزمایش ۵

تقویت‌کننده‌های عملیاتی

هدف از این آزمایش آشنایی با تقویت‌کننده عملیاتی ۷۴۱ می‌باشد. عملکرد این تقویت‌کننده در مودهای خطی و اشباع مورد توجه قرار می‌گیرد. برخی از کاربردهای این IC از قبیل بافر، جمع‌کننده و منبع جریان مورد بررسی قرار می‌گیرند.

خودآزمایی

۱- به کمک نرم‌افزار *Multisim* مدار شکل (۵-۱) را با آپ‌امپ ۷۴۱ شبیه‌سازی کرده و شماتیک مدار را که شامل ولتاژ هر گره و جریان هر شاخه می‌باشد، پرینت گرفته و تحویل دهید. R_1 و R_2 را به گونه‌ای انتخاب کنید که بهره ولتاژ مدار برابر ۵ گردد. $R_L = 1\ K\Omega$ و V_{in} را مساوی ۱ ولت قرار دهید.

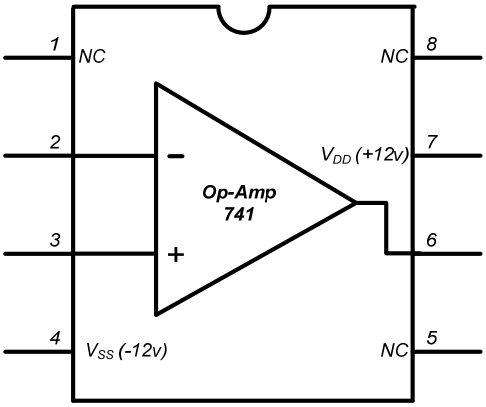


شکل (۵-۱)

۲- قسمت ۲ شرح آزمایش مربوط به بررسی عملکرد آپ‌امپ در حالت اشباع، را به کمک نرم‌افزار شبیه‌سازی کرده و هر ۳ شکل موج را روی یک نمودار رسم کنید.

شرح آزمایش

پایه‌های آی‌سی ۷۴۱ در شکل (۵-۲) زیر نشان داده شده‌اند. ($V_{DD} = +۱۲$, $V_{SS} = -۱۲$)



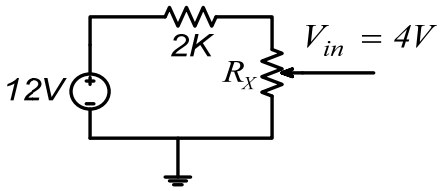
شکل(۵-۲)

✓ بررسی عملکرد آپ‌امپ ایده‌آل در حالت ناوارونگر

با استفاده از آپ‌امپ ۷۴۱ مدار شکل (۵-۴) را ببندید. $R_۱$ و $R_۲$ را به گونه‌ای انتخاب کنید که بهره ولتاژ مدار برابر ۲ گردد.

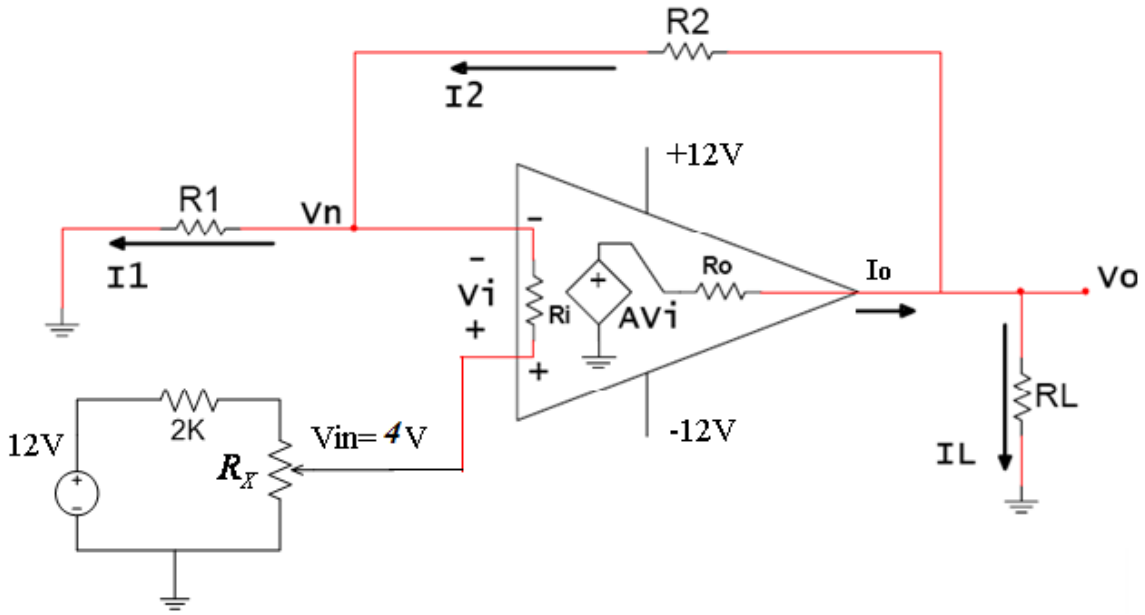
به طور کلی در تمام بخش‌های آزمایش ۵ به منظور جلوگیری از اشباع آپ‌امپ، مقاومت‌های طراحی شده را در رنج کیلو اهم انتخاب کنید.

$R_L = ۲\ K\Omega$ و V_{in} را مساوی ۴ ولت قرار دهید. مقدار V_{in} را به کمک مدار شکل (۵-۳) بسازید. به جای مقاومت R_x از پتانسیومتر ۱۰۰۰× و به جای مقاومت $K\Omega$ ۲ از ۲ مقاومت $K\Omega$ ۱ به صورت سری استفاده کنید. مقاومت R_x را آنقدر تغییر دهید تا داشته باشیم: V_{in} =۴ V. V_{in} را به مدار (۵-۴) متصل کنید.



شکل(۵-۳)

پس از بستن هر مدار حاوی آپ‌امپ، برای آن که از صحت اتصالات مدار و عملکرد آپ‌امپی که می‌دانید نباید در حالت اشباع باشد مطمئن شوید، اختلاف ولتاژ دو سر ورودی آپ‌امپ را پس از اعمال تغذیه های آن اندازه بگیرید. این اختلاف ولتاژ باید صفر یا عددی بسیار نزدیک به آن باشد.

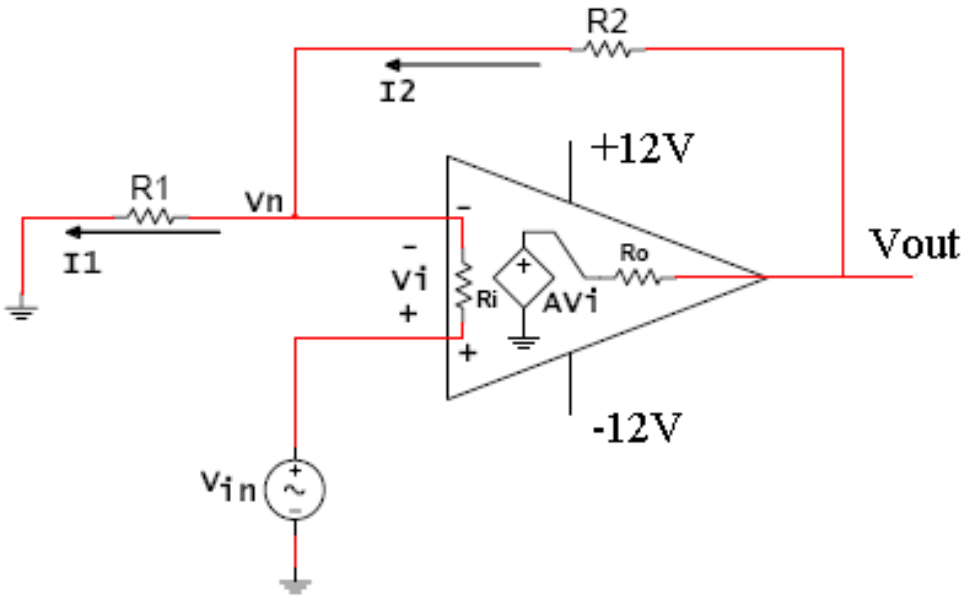


شکل(۵-۴)

۱- پس از تنظیم V_{in}، مقادیر $V_n, V_o, I_1, I_2, I_L, I_o$ را اندازه بگیرید و با نتایج تئوری مقایسه کنید.

✓ بررسی عملکرد آپ‌امپ در حالت اشباع

در مدار شکل (۵-۵) به جای ولتاژ ورودی DC از منبع ولتاژ سینوسی استفاده شده است. فرکانس موج ورودی را KHz ۱ قرار داده و شکل موج خروجی را به ازای دامنه ورودی $۱,۵V$، $۳,۵V$ و $۵,۵V$ و در حالت بهره ۳ مشاهده و رسم کنید. در هر حالت دامنه مثبت و منفی ولتاژ خروجی چه مقدار است؟ چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟

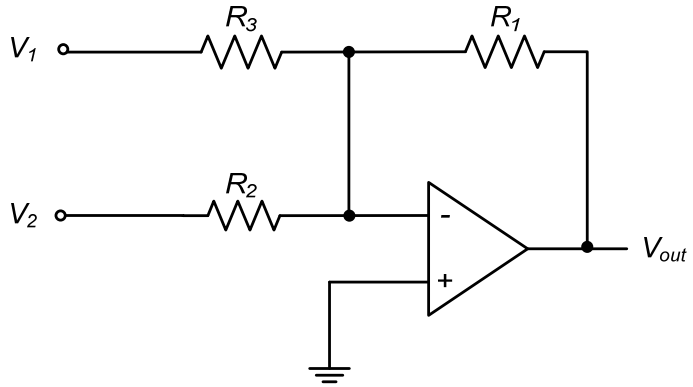


شکل(۵-۵)

شرایط $R_1 = \infty$ و $R_2 = 0$ را برقرار کنید. خروجی مدار را به بار ۳۰۰ اهم متصل نموده و دامنه ولتاژ خروجی را به ازای دامنه ورودی ۶ ولت اندازه بگیرید. سپس مدار آپ‌امپ را حذف کرده و منبع سینوسی ورودی V_{in} را مستقیماً به بار ۳۰۰ اهم متصل کنید و مجدداً دامنه ولتاژ دو سر مقاومت را اندازه بگیرید. در مورد عملکرد آپ‌امپ در این حالت چه فکری می‌کنید؟

✓ مدار جمع کننده

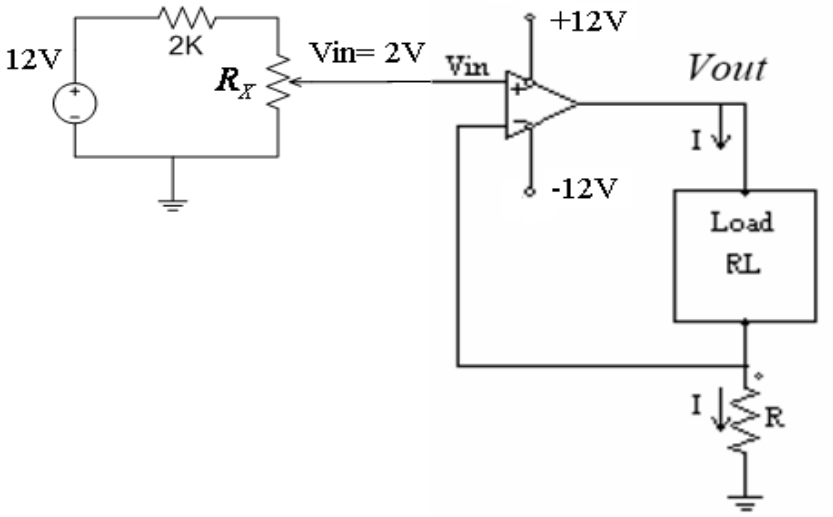
یکی دیگر از مداراتی که به کمک آپ‌امپ می‌توان ساخت، مدار جمع‌کننده می‌باشد. به کمک مدار شکل (۵-۶) رابطه‌ی $V_{out} = -\frac{۲/۲}{۲/۷}V_1 - \frac{۱}{۲}V_2$ را پیاده‌سازی کرده و مقدار خروجی را بخوانید. ($V_1 = -۱۲V$ و $V_2 = +۱۲V$).



شکل(۵-۶)

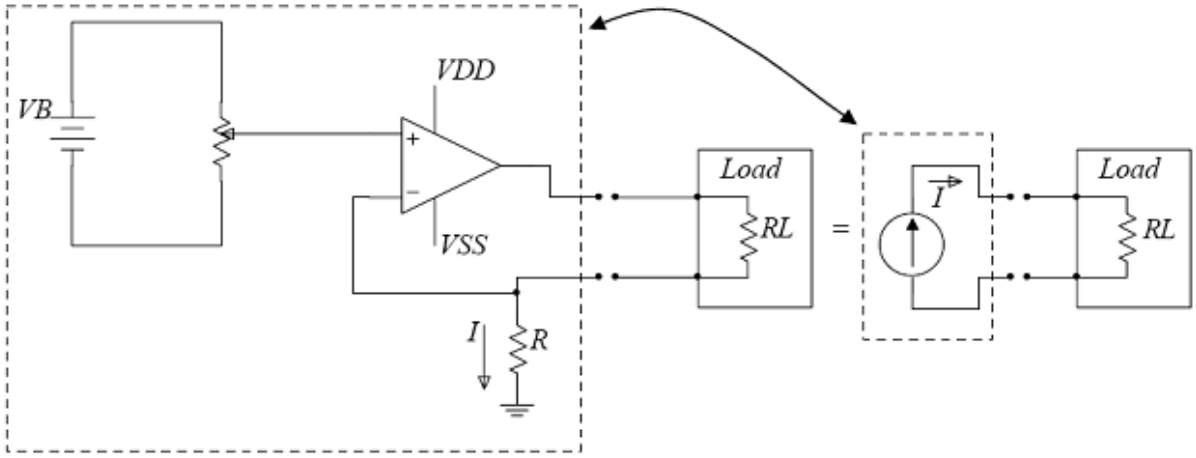
✓ منبع جریان کنترل شده با ولتاژ

با توجه به عملکرد آپ‌امپ ایده‌آل در مدار شکل(۵-۷) داریم: $V_{out} = (۱ + R_L / R)V_{in}$ و جریان جاری در مقاومت R_L برابر $I = \frac{V_{in}}{R}$ می‌باشد.



شکل(۵-۷)

ملاحظه می‌شود که جریان I به مقاومت بار R_L وابسته نیست. جریان جاری در بار R_L فقط با مقاومت R و منبع ولتاژ ورودی تعیین می‌شود. در نتیجه به کمک این مدار می‌توان منبع جریان کنترل‌شده با ولتاژ ساخت. در شکل(۵-۸)، مدار داخل خط‌چین این منبع را نشان می‌دهد.



شکل(۵-۸)

۱- برای بررسی بیشتر، مدار شکل (۵-۷) را ببندید و جدول زیر را کامل کنید. ولتاژ ورودی V_{in} را به کمک مدار شکل (۵-۴) که در قسمت ۱ توضیح داده شد، در مقادیر خواسته شده تنظیم کنید. V_{out} را نسبت به زمین مدار اندازه بگیرید.

$V_{in}(volts)$	$R_L(K\Omega)$	$R\ (K\Omega)$	V_{out} اندازه‌گیری شده	I اندازه‌گیری شده	I محاسبه شده
۲	۱	۱			
۲	۳	۱			
۴	۱	۱			
۴	۱	۳			
۴	۳	۱			

۲- آیا در هر ۵ حالت جدول بالا، انتظار شما از منبع جریان ایده‌آل برآورده می‌شود؟ علت را توضیح دهید.

۳- به نظر شما برای دستیابی به منبع جریان ایده‌آل چه محدودیت‌هایی باید به مدار شکل (۵-۷) اعمال کرد؟

آزمایش ۶

پاسخ زمانی مدارهای مرتبه اوّل

هدف از انجام این آزمایش بررسی رفتار حالت گذرای مدارهای مرتبه اول RC و RL ، نحوه اندازه‌گیری ثابت زمانی و عوامل مؤثر در آن و آشنایی با برخی کاربردهای ساده این مدارها می‌باشد.

خودآزمایی

۱- ثابت زمانی را تعریف کنید و فرمول‌های آن برای مدارهای RC و RL را بنویسید.

۲- فرض کنید به یک مدار مرتبه ۱ یک موج مربعی اعمال کرده‌ایم. ثابت زمانی این مدار چه رابطه‌ای با فرکانس موج مربعی منبع ورودی دارد؟

۳- ثابت زمانی مدار RL سری شکل (۶-۱) را به ازای $L=۲۲\ mH$ و مقاومت‌های $۱۰۰\ \Omega$ و $۱\ K\Omega$ و ورودی موج مربعی با فرکانس $۵۰۰\ Hz$ حساب کنید.

۴- از مدارهای مرتبه ۱ بسته به اینکه خروجی از کدام عنصر گرفته شود می‌توان به عنوان یک مشتق‌گیر و یا یک انتگرال‌گیر استفاده کرد. تحت چه شرایطی یک مدار RL سری یک انتگرال‌گیر مناسب و مدار RC سری یک مشتق‌گیر مناسب است؟ دلیل خود را ثابت کنید.

۵- به کمک نرم افزار مدارهای سؤال ۳ را شبیه سازی کرده و یک بار شکل موج دو سر مقاومت (هر دو در یک نمودار) و بار دیگر شکل موج دو سر سلف (هر دو در یک نمودار) را رسم کنید. (دامنه موج مربعی ۴ ولت).

۶- به کمک نرم افزار، شکل موج خروجی از دو سر خازن در یک مدار RC سری را به ازای مقاومتهای $۱۰\ K\Omega$، $۵۰\ K\Omega$، $R=۹۰\ K\Omega$ روی یک نمودار رسم کنید. ورودی را یک موج مربعی با دامنه ۱ ولت و فرکانس $۳۰۰\ Hz$ و مقدار خازن را $۱۰۰\ nF$ فرض کنید.

۷- به کمک نرم افزار، شکل موج خروجی از دو سر خازن در یک مدار RC سری را به ازای فرکانس‌های ورودی موج مربعی ۳۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ هرتز و دامنه ۱ ولت رسم کنید. (هر سه در یک نمودار به ازای مقادیر $R=۱۰\ K\Omega$ و $C=۱۰۰\ nF$).

۸- در کدام یک از حالت‌های بالا ، انتگرال بهتری از موج ورودی را مشاهده می‌کنید؟ نتیجه را با جواب سؤال ۴ مقایسه کنید.

شرح آزمایش

✓ پاسخ گذرای مدار *RL*

مداری مطابق شکل (۶-۱) ببندید. ورودی مدار را منبع موج مربعی با دامنه ۴ ولت و فرکانس ۱ کیلوهرتز انتخاب کنید. مقدار سلف ۲۲ میلی هانری می‌باشد. مقدار دامنه منبع را قبل از اتصال به مدار تنظیم کنید.

۱- آیا با اتصال منبع به مدار، شکل موج منبع به ازای مقادیر مختلف مقاومت (۱۰۰Ω، ۵۰۰Ω، $۱K\Omega$) تغییر می‌کند؟ شکل موج منبع را در این حالت رسم کنید و علت آن را توضیح دهید. به ازای کدام مقدار مقاومت خرابی شکل موج منبع بیشتر است؟ چرا؟ (برای سهولت تغییر مقدار مقاومت‌ها از پتانسیومتر ۱۰۰× استفاده کنید)

۲- شکل موج دو سر R را روی اسیلوسکوپ مشاهده نمایید و به کمک روش ۰,۶۳ مقدار نهایی، ثابت زمانی مدار (τ) را به کمک اسیلوسکوپ و به ازای مقادیر مقاومت (۱۰۰Ω، ۲۰۰Ω، ۵۰۰Ω، $۱K\Omega$) و ورودی موج مربعی با فرکانس $۱KHz$ اندازه گرفته و در هر حالت مقدار تئوری ثابت زمانی را محاسبه کنید.

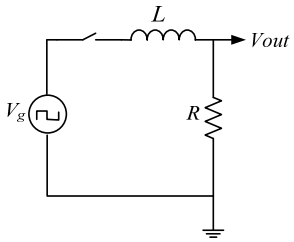
۳- چرا برای دیدن پاسخ گذرای یک مدار با اسیلوسکوپ، به جای منبع DC از یک منبع AC مربعی استفاده می‌شود؟

۴- مقاومت اهمی سلف مورد استفاده را به کمک مولتی‌مترهای موجود روی میز آزمایشگاه اندازه بگیرید.

۵- در حالت مقاومت ۱۰۰Ω فرکانس را آنقدر کاهش دهید تا ولتاژ خروجی در هر نیم سیکل زمانی به مقدار نهاییش میل کند (مقدار فرکانس یادداشت شود)، سپس ثابت زمانی را به کمک روش استفاده شده در بخش ۲ مجدد اندازه بگیرید. مقدار نهایی ولتاژ خروجی یا همان دامنه خروجی را نیز اندازه گرفته و به سوالات زیر پاسخ دهید؟

نکته مهم: حواستان باشد در هر قسمتی که نیاز بود داده‌ای را در راستای عمودی اندازه بگیرید، حتما محور عمودی را کالیبره کنید.

۵-۱ آیا مقدار نهایی ولتاژ خروجی در هر نیم سیکل زمانی به مقدار دامنه منبع ولتاژ میل می‌کند؟ چرا؟
۵-۲ آیا مقدار ثابت زمانی اندازه‌گیری شده با مقدار تئوری برابر است؟
۵-۳ علت تفاوت مقدار اندازه‌گیری و مقدار تئوری به ازای مقاومت ۱۰۰Ω چیست؟



شکل (۶-۱)

۶- بخش ۲ را مجدد برای مقاومت $۵۰۰\,\Omega$ به ازای ورودی موج مربعی با فرکانس $۵۰۰\,Hz$ تکرار کنید و مقدار ثابت زمانی بدست آمده را با مقدار بدست آمده در بخش ۲ برای مقاومت $۵۰۰\,\Omega$ مقایسه کنید. چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟

۷- به ازای مقاومت $۱۰۰\,\Omega$ ثابت زمانی مدار را در فرکانس‌های $۵۰۰\,Hz$ و $۲\,KHz$ اندازه گرفته، مقادیر تئوری و عملی را مقایسه کرده و علت اختلاف را بیان کنید.

۸- خطای اندازه‌گیری به ازای کدام یک از مقاومت‌های بخش ۲ بیشتر بوده و علت آن را توضیح دهید.

۹- شکل موج دو سر سلف (L) را به ازای مقاومت‌های $۱۰۰\,\Omega$ و $۱\,K\,\Omega$ و ورودی موج مربعی با فرکانس $۱\,KHz$ روی اسیلوسکوپ مشاهده نمایید و شکل یک پریود آن را به همراه شکل موج منبع ورودی روی پنجره اسیلوسکوپ مشاهده و رسم کنید (برای هر مقاومت، مقدار ولتاژ هر دو منحنی منبع و خروجی را در دو سوی یکی از نقاط شکستگی آنها یادداشت کنید).

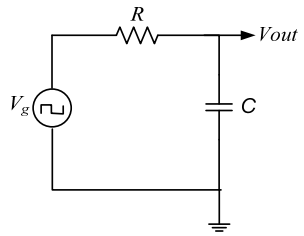
۱۰-در شکل موج‌های رسم شده در بخش ۹ ملاحظه می‌شود که در نقاط ناپیوستگی موج مربعی ورودی، شکل موج ولتاژ دو سر سلف دارای جهش ولتاژی معادل دو برابر دامنه منبع (یا همان مقدار جهش ولتاژ منبع) می‌باشد، به عنوان مثال اگر دامنه منبع ۴ ولت باشد جهش ولتاژ سلف ۸ ولت می‌باشد، علت این پدیده را توضیح دهید.

۱۱-آیا جهش ولتاژ اشاره شده در قسمت ۱۰ برای ولتاژ دو سر مقاومت نیز اتفاق می‌افتد؟ چرا؟ (شکل موج دو سر مقاومت و منبع را به ازای مقاومت $۱k\Omega$ رسم کرده و دامنه‌ها را مشخص کنید.)

۱۲-دقت کنید که اختلاف پتانسیل دو سر سلف شباهت زیادی با مشتق موج ورودی دارد. از این روش می‌توان برای ساختن مشتق‌گیر استفاده کرد. از روی منحنی‌های ولتاژ V_L ، شرط لازم برای داشتن یک مشتق‌گیر خوب را بیان کنید و از لحاظ تئوری ثابت کنید.

✓ پاسخ گذرای مدار *RC*

مداری مطابق شکل زیر ببندید. ورودی مدار را منبع موج مربعی با دامنه ۴ ولت و مقدار خازن را ۱۰۰ نانوفاراد انتخاب کنید.



شکل (۶-۲)

۱۳-نوسان‌ساز را به ورودی مدار متصل نموده و یک موج مربعی با دامنه ۴ ولت و فرکانس ۵۰۰ هرتز به مدار اعمال نمایید، پاسخ مدار را بوسیله‌ی اسیلوسکوپ مشاهده نمایید. با استفاده از مقاومت‌های $۹۰\,K\Omega$، $۵۰\,K\Omega$ و $۱۰\,K\Omega$ به جای R، شکل موج خروجی را در هر حالت مشاهده و به دقت رسم نمایید. (از پتانسیومتر $۱۰۰۰۰\times$ برای تغییر مقاومت‌ها استفاده کنید). در کدام حالت انتگرال بهتری از موج ورودی را در خروجی مشاهده می‌کنید؟ چرا ؟

۱۴-در مدار شکل (۶-۲) فرکانس موج مربعی ورودی را روی یک کیلوهرتز (دامنه ۴ ولت) تنظیم کنید و خروجی را از دو سر مقاومت بگیرید. با استفاده از پتانسیومتر $۱۰۰\times$ مقاومت‌های $۱\,K\Omega$، $۶۰۰\,\Omega$ و $۳۰۰\,\Omega$ را به جای R قرار داده و شکل موج خروجی را در هر حالت مشاهده و به دقت رسم نماید. در کدام حالت مشتق بهتری از موج ورودی را در خروجی مشاهده می‌کنید؟ چرا ؟

۱۵-در شکل موج‌های دیده شده از دو سر مقاومت، ملاحظه می‌شود که در نقاط ناپیوستگی موج مربعی ورودی، شکل موج ولتاژ دو سر مقاومت دارای جهش ولتاژی معادل دو برابر دامنه منبع می‌باشد. به عنوان مثال اگر دامنه منبع ۴ ولت باشد جهش ولتاژ مقاومت ۸ ولت می‌شود، علت این پدیده را توضیح دهید.

آزمایش ۷

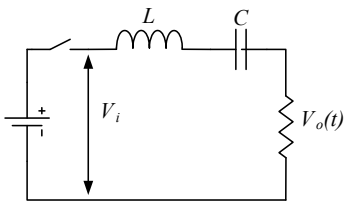
پاسخ زمانی مدارهای مرتبه دوم

هدف از انجام این آزمایش بررسی رفتار انواع حالتهای گذرای مدارهای مرتبه دوم RLC، اندازه‌گیری پارامترهای مختلف معادله مشخصه، بررسی مقاومت بحرانی و آشنایی با پدیده *Overshoot* است.

مقدمات

✓ مدار *RLC* سری

با توجه به اینکه در کارکرد یک مدار RLC سری ابتدا سلف تأثیرات عمیقی در پاسخ مدار ایجاد می‌کند و سپس خازن اثرات خود را در انتها ظاهر می‌سازد، انتظار می‌رود مداری شامل هر دوی این عناصر مضاف بر مقاومت که عامل میرایی است، رفتاری ارائه کند که در یک محدوده زمانی شبیه رفتار یک مدار RL و در محدوده زمانی دیگری رفتاری شبیه به مدار RC داشته باشد. این رفتار در نمودارهایی که خواهیم دید بنا به مقادیر R، L و C مشهود است. در تمامی این نمودارهای که ولتاژ دو سر مقاومت خروجی مدار در نظر گرفته شده است، مشاهده می‌شود که ابتدای مدار یک نمایی افزایشی یعنی مبتدا به صفر و انتهای آن یک نمایی منتهی به صفر است زیرا در ابتدا سلف شدیداً اثر خود را اعمال و خازن تقریباً اتصال کوتاه است و بنابراین یک مدار RL (پایین‌گذر) داریم که شکل ولتاژ خروجی نمایی صعودی خواهد بود. پس از مدتی اثر سلفی نامحسوس و سلف مثل اتصال کوتاه عمل می‌کند و خازن که تقریباً شارژ شده خواص خازنی خود را شدیداً ظاهر می‌سازد و یک مدار RC (بالاگذر) خواهیم داشت که قاعدتاً ولتاژ دو سر مقاومت باید در آن نزولی باشد.



شکل(۷-۱)

هنگامی که این مدار با یک ولتاژ پله‌ای تحریک می‌شود، پاسخ گذرای مدار دارای دو شکل کاملاً متمایز خواهد بود. برای تعیین معادله پاسخ، معادله ولتاژ مدار را پس از بسته شدن کلید می‌نویسیم:

$$V = L\frac{di}{dt} + \frac{1}{C}\int idt + Ri$$

که با مشتق گرفتن از طرفین معادله حاصل می‌شود:

$$L\frac{d^2 i}{dt^2} + R\frac{di}{dt} + \frac{i}{C} = 0$$

که دارای معادله مشخصه زیر با ریشه های s_1 و s_2 می‌باشد:

$$s^{۲}+\frac{R}{L}s+\frac{۱}{LC}=۰$$
$$s_{۱}=\frac{-R}{۲L}+\sqrt{\frac{R^{۲}}{۴L^{۲}}-\frac{۱}{LC}}$$
$$s_{۲}=\frac{-R}{۲L}-\sqrt{\frac{R^{۲}}{۴L^{۲}}-\frac{۱}{LC}}$$

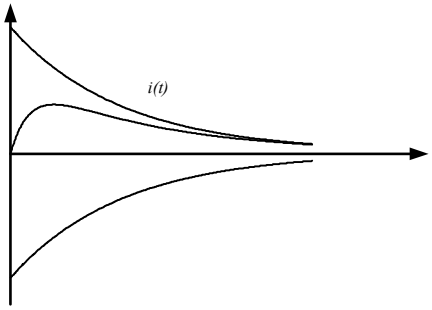
بنابراین خواهیم داشت:

$$i(t)=k_{۱}e^{s_{۱}t}+k_{۲}e^{s_{۲}t}$$
$$i(۰)=۰$$
$$\frac{di(۰)}{dt}=\frac{V}{L}$$

برحسب اینکه $\frac{R}{۲L}$ بزرگتر از، مساوی با و یا کوچکتر از $\frac{۱}{\sqrt{LC}}$ باشد، پاسخ مدار (یا جریان $i(t)$) دارای شکلهای زیر خواهد بود:

۱- اگر $\frac{R}{۲L}>\frac{۱}{\sqrt{LC}}$ باشد پاسخ مدار به یک مقدار ماکزیمم می‌رسد و با ثابت زمانی معینی به سوی صفر میل می‌کند. این پاسخ به حالت فوق میرایی موسوم است که در آن:

$$i(t)=\frac{V}{L\omega}e^{-t/\tau}\left[\frac{e^{\omega t}-e^{-\omega t}}{۲}\right]$$
$$\omega=\sqrt{\frac{R^{۲}}{۴L^{۲}}-\frac{۱}{LC}}$$
$$\tau=\frac{۲L}{R}$$



شکل(۷-۲)

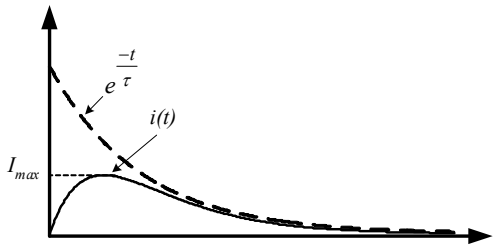
نکته جالب توجه مقدار ثابت زمانی است که دو برابر مقدار آن در مدار RL می‌باشد. البته ثابت زمانی واقعی این مدار چندان مشخص نیست زیرا عوامل ω و $-\omega$ نیز در ایجاد آن نقش دارند و تنها تحت شرایطی که ω خیلی کوچک باشد می‌توان گفت که تقریباً ثابت زمانی $\frac{۲L}{R}$ است که این وضعیت در حالت میرای بحرانی محسوس‌تر است.

۲- اگر $\frac{R}{۲L}=\frac{۱}{\sqrt{LC}}$ باشد جریان به مقدار ماکزیمم I_{max} می‌رسد و با ثابت زمانی $\tau=\frac{۲L}{R}$ به سمت صفر میل می‌کند. این حالت به میرای بحرانی یا *Critically Damped* موسوم است.

$$i(t)=\frac{V}{L}te^{-t/\tau}$$

$$\tau=\frac{۲L}{R}$$

$$I_{max}=\frac{V\tau}{L}e^{-۱}$$



شکل(۷-۳)

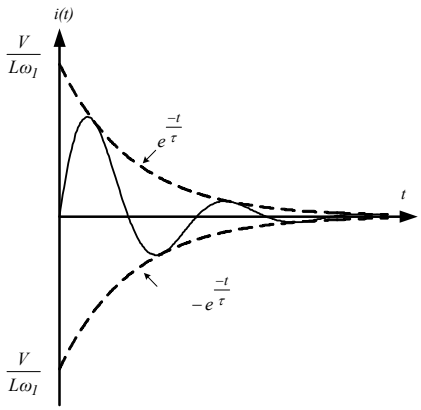
۳- اگر $\frac{R}{۲L}<\frac{۱}{\sqrt{LC}}$ باشد، پاسخ مدار بصورت یک موج سینوسی است که دامنه آن رفته رفته کم شده و به صفر می‌رسد. این حالت به نوسانی میرا یا *Oscillatory Damped* موسوم می‌باشد.

$$i(t)=\frac{V}{L\omega_۱}e^{-t/\tau}\sin\omega_۱t$$

$$\omega_۱=j\omega=\sqrt{\frac{۱}{LC}-\frac{R^۲}{۴L^۲}}$$

و فرکانس نوسانات برابر است با:

$$f_۱=\frac{۱}{۲\pi}\sqrt{\frac{۱}{LC}-\frac{R^۲}{۴L^۲}}$$

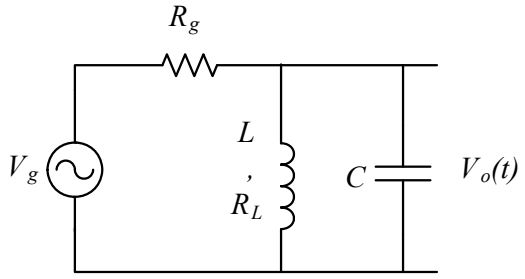


شکل(۷-۴)

جمله $\frac{R^2}{4L^2}$ اثر کمی روی f_1 دارد زیرا معمولاً در مقایسه با $\frac{1}{LC}$ خیلی کوچک است. در این حالت می‌توان مقدار f_1 را به صورت $f_1 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ نوشت.

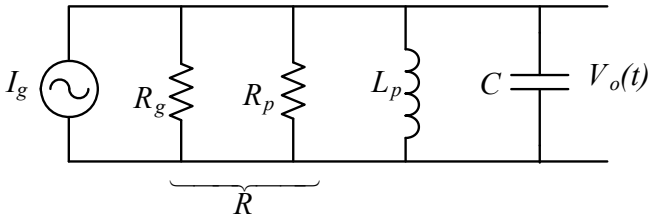
✓ مدار RLC موازی

شکل زیر مدار RLC موازی را نمایش می‌دهد:



شکل(۷-۵)

با توجه به اینکه مدار فوق را می‌توان به صورت زیر نمایش داد:



شکل(۷-۶)

پس از اعمال جریان پله‌ای به دامنه I_g، می‌توان نوشت:

$$I_g = \frac{V_o}{R} + \frac{1}{L_p}\int V_o dt + C\frac{dV_o}{dt} \Rightarrow \frac{d^2V_o}{dt^2} + \frac{1}{RC}\frac{dV_o}{dt} + \frac{1}{L_pC} = 0$$

معادله مشخصه رابطه فوق دارای دو ریشه با مقادیر زیر است:

$$s_1, s_2 = \frac{-1}{2RC} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{2RC}\right)^2 - \frac{1}{L_pC}}$$

نظیر مدار سری سه حالت زیر در پاسخ گذرا مشاهده می‌شود:

۱. $\frac{۱}{۲RC} > \frac{۱}{\sqrt{L_pC}}$ حالت فوق میرایی یا *Over Damped* خواهد بود.

۲. $\frac{۱}{۲RC} = \frac{۱}{\sqrt{L_pC}}$ حالت میرایی بحرانی یا *Critically Damped* خواهد بود.

۳. $\frac{۱}{۲RC} < \frac{۱}{\sqrt{L_pC}}$ حالت نوسانی میرا یا *Oscillatory Damped* خواهد بود.

با توجه به اینکه مقاومت موجود در سلف بسیار کوچک است می‌توان از آن صرف‌نظر نمود؛ در این صورت R_p بسیار بزرگ و $R = R_p \,||\, R_g \approx R_g$ و $L_p \approx L$ خواهد بود. همچنین توجه داریم که در حالات ۲ و ۳ در فوق ثابت زمانی برابر است با:

$$\tau = ۲RC$$

ضریب میرایی یا *Damping Factor* نسبت $\alpha = \frac{۱}{\tau} = \frac{۱}{۲RC}$ را می‌گویند.

مقاومت بحرانی یا *Critical Resistance* مقدار $R_C = \frac{۱}{۲}\sqrt{L/C}$ می‌باشد.

خودآزمایی

۱- انواع حالات پاسخ گذرای مدارهای مرتبه دوم را رسم کرده و توضیح دهید.

۲- مقاومت بحرانی، فرکانس نوسانات، ضریب میرایی و فراجهش (*Overshoot*) را در مدارهای مرتبه دوم تعریف کرده و روابط هر کدام را در مدار *RLC* سری و موازی بیان کنید.

۳- به ازای $C = ۳,۳\ nF$ و $L = ۱۸\ mH$، مقاومت بحرانی و به ازای مقاومت $۱\ K\Omega$ فرکانس نوسانات را برای *RLC* سری و موازی محاسبه کنید.

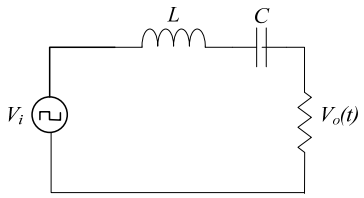
۴- ثابت زمانی (τ) در حالت میرای بحرانی و نوسانی میرا در مدار *RLC* سری و موازی از چه رابطه‌ای محاسبه می‌شود، مقدار آن را به ازای مقادیر سؤال ۳ محاسبه کنید.

۵- یک روش آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری τ، در هرکدام از حالت های میرای بحرانی و نوسانی میرا در مدار *RLC* ارائه کنید.

۶- مدار *RLC* سری را با مقادیر سلف ۱۸ میلی هانری و خازن ۳,۳ نانوفاراد و یک ولتاژ موج مربعی با دامنه ۲ ولت و فرکانس $۱\ KHz$ به کمک نرم افزار شبیه سازی کرده و با تغییر مقدار مقاومت، ۴حالت پاسخ گذرای مدار را در یک نمودار رسم کنید. خروجی از دوسر خازن گرفته شود.

شرح آزمایش

✓ مطابق شکل زیر مدار RLC سری را با مقادیر سلف ۱۸ میلی هانری و خازن ۳,۳ نانوفاراد و پتانسیومتر ۱ تا ۱۰ کیلواهم ساخته و یک ولتاژ مربعی با دامنه ۲ ولت و فرکانس $1,5\ KHz$ و آفست صفر به آن اعمال می‌کنیم و خروجی را از دو سر مقاومت می‌بینیم.



شکل(۷-۷)

۱- با تغییر مقاومت، سه حالت پاسخ گذرای مدار شامل فوق میرا، میرای بحرانی و نوسانی میرا را روی اسیلوسکوپ مشاهده و رسم کرده و مقدار مقاومت بحرانی را اندازه بگیرید. برای اندازه‌گیری مقاومت بحرانی با دقت بیشتر پروب را در حالت ضربدر ۱۰ قرار داده، دامنه سیگنال ورودی را روی ۹ ولت تنظیم کنید و یک پتانسیومتر ۱۰۰× با پتانسیومتر اولیه سری نمایید. پس از اندازه‌گیری مقاومت بحرانی، دامنه ورودی و پروب را به حالت قبل برگردانید. مقدار مقاومت بحرانی اندازه‌گیری شده را با مقدار تئوری مقایسه کرده و در صورت اختلاف علت را توضیح دهید.

۲- ثابت‌زمانی و ضریب میرایی مدار را در حالت میرای بحرانی به ازای مقاومت بحرانی و در حالت نوسانی میرا به ازای مقاومت $K\Omega$ ۱ به کمک روش پیشنهادی خودتان اندازه بگیرید. فرکانس نوسانات در حالت نوسانی میرا به ازای مقاومت $1K\Omega$ چقدر اندازه‌گیری شده است؟ مقادیر به‌دست آمده ثابت زمانی و فرکانس نوسانات را با مقادیر تئوری مقایسه کرده و در صورت اختلاف علت را توضیح دهید.

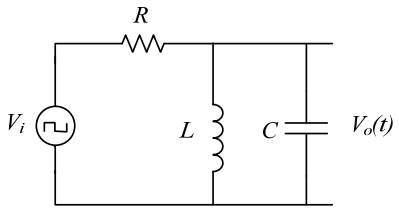
۳- مقاومت را از مدار خارج کنید و شکل موج ولتاژ دو سر خازن را مشاهده و رسم نمایید. آیا مدار در حالت نوسانی کامل قرار می‌گیرد؟ توضیح دهید. میزان ثابت زمانی و فرکانس نوسانات مدار نسبت به حالت قبل بیشتر شده یا کمتر (اندازه بگیرید)؟ از لحاظ تئوری به ازای مقاومت صفر ثابت زمانی و فرکانس نوسانات مدار باید چقدر می‌شد؟

۴- آیا در مداری با شرایط بالا می‌توان درصد فراجهش *(Overshoot)* را برای ولتاژ دو سر مقاومت محاسبه کرد؟ چرا؟ در صورتی که منبع ورودی دارای مقدار DC باشد، چطور؟ برای بررسی این مطلب به منبع ورودی موج مربعی مقدار DC به اندازه ۲ ولت اضافه کرده و ولتاژ دو سر مقاومت را مجدد رسم کنید. مقدار DC را به کمک پیچ تنظیم آفست منبع AC به موج مربعی اضافه نمایید. درصد فراجهش، نسبت ولتاژ فراجهش به ولتاژ پایدار ضربدر ۱۰۰ می‌باشد. (در پایان این بخش مقدار DC منبع را مجدد به مقدار صفر برگردانید.)

۵- درصد فراجهش را در حالت نوسانی میرا به ازای مقاومت $۱\,K\,\Omega$ از دو سر خازن اندازه بگیرید. مقادیر به‌دست آمده را با مقادیر تئوری مقایسه کرده و در صورت اختلاف علت را توضیح دهید.

۶- فکر می‌کنید ولتاژ دو سر کدام عنصر مدار ممکن است در لحظات جهش ولتاژ موج مربعی ورودی نسبت به ولتاژ منبع دارای جهش ولتاژ باشد (دقت کنید که جهش ولتاژ در لحظه جهش ولتاژ موج مربعی از مفهوم فراجهش که در بند ۵ اشاره شده و با صرف زمان اتفاق می‌افتد، متفاوت است)؟ از طریق تئوری شکل موج منبع و شکل موج ولتاژ دو سر هر سه عنصر مدار را در حالت نوسانی میرا رسم کرده و به کمک تحلیل‌های لازم این مسئله را توضیح دهید. به طور همزمان شکل موج ولتاژ مورد نظر (دارای جهش) و شکل موج منبع ورودی را در حالت نوسانی میرا به کمک اسیلوسکوپ مشاهده و رسم کنید. مقدار جهش ولتاژ روی شکل یادداشت شود.

✓ مدار RLC موازی را مطابق شکل زیر با مقادیر سلف ۱۸ میلی هانری و خازن ۳/۳ نانوفاراد و پتانسیومتر ۱ تا ۱۰ کیلواهم به جای مقاومت R ساخته و یک ولتاژ مربعی با دامنه ۲ ولت و فرکانس $۱,۵\ KHz$ به آن اعمال می‌کنیم و خروجی را از دو سر خازن می‌بینیم.



شکل(۷-۸)

۱- با تغییر مقاومت، سه حالت پاسخ گذرای مدار شامل فوق میرا، میرای بحرانی و نوسانی میرا را روی اسیلوسکوپ مشاهده و رسم کرده و مقدار مقاومت بحرانی را اندازه بگیرید. برای اندازه‌گیری مقاومت بحرانی با دقت بیشتر، مانند حالت قبل، پروب را در حالت ضربدر ۱۰ قرار داده و دامنه سیگنال ورودی را روی ۹ ولت تنظیم کنید، پس از اندازه‌گیری نیز دامنه ورودی و پروب را به حالت قبل برگردانید. مقدار مقاومت بحرانی اندازه‌گیری شده را با مقدار تئوری مقایسه کرده و در صورت اختلاف علت را توضیح دهید.

۲- به نظر شما کدام یک از سه پاسخ مدار دارای سرعت میرایی بیشتری است؟ (سرعت میرایی آنها را هم از لحاظ تئوری و هم از روی شکل ظاهری شکل موج‌ها با رسم شکل با هم مقایسه کنید.)

۳- ثابت زمانی و ضریب میرایی مدار را در حالت میرای بحرانی به ازای مقاومت بحرانی و در حالت نوسانی میرا به ازای مقاومت $۳\ K\Omega$ به کمک روش پیشنهادی خودتان اندازه بگیرید. مقادیر به‌دست آمده را با مقادیر تئوری مقایسه کرده و در صورت اختلاف علت را توضیح دهید.

۴- فرکانس نوسانات را در حالت نوسانی میرا به ازای مقاومت $K\Omega$ ۳ اندازه بگیرید و مقادیر به‌دست آمده را با مقادیر تئوری مقایسه کرده و در صورت اختلاف علت را توضیح دهید.

۵- با توجه به داده‌های اندازه‌گیری شده فرکانس‌های طبیعی مدار شکل (۷-۸) به ازای مقاومت $K\Omega$ ۳ چقدر است؟ فرکانس‌های طبیعی اندازه‌گیری شده را با مقادیر تئوری آن مقایسه کنید.

✓ **نمره مثبت**

آیا روشی برای اندازه‌گیری فرکانس‌های طبیعی مدار مرتبه دوم در حالت میرایی شدید وجود دارد؟

آزمایش ۸

پاسخ فرکانسی مدارهای مرتبه اوّل

هدف از این آزمایش آشنایی با رفتار فرکانسی مدارهای مرتبه اوّل، نحوه تأثیر مقادیر عناصر در این رفتار، مشاهده پاسخ دامنه و پاسخ فاز، بررسی رفتار فیلتری آنها، بدست آوردن فرکانس قطع و پهنای باند آنها است.

مقدمات

هنگامی که یک موج سینوسی با دامنه ثابت V_{in} و فرکانس متغیر f به دو سر یک مدار خطی اعمال می‌شود، ولتاژ خروجی (یا پاسخ مدار) نیز موجی سینوسی ولی با دامنه و فازی متفاوت با ولتاژ ورودی بوده و تابعی از فرکانس موج ورودی خواهد بود. بنابر این اگر ولتاژ ورودی به صورت $V_i(t) = V_{im} \sin \omega t = V_{ie} \angle 0^o$ باشد، می‌توان ولتاژ خروجی را بصورت زیر نوشت:

$$V_o(t) = V_{om} \sin(\omega t + \varphi) = V_{oe} \angle \varphi^o$$

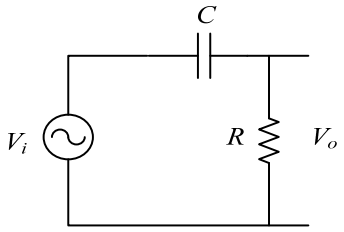
نسبت ولتاژ خروجی به ولتاژ ورودی تابعی از فرکانس بوده و به تابع پاسخ فرکانسی و یا تابع انتقال موسوم است و با رابطه زیر نشان داده می‌شود:

$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \left|\frac{V_o}{V_i}\right| \angle \varphi^o$$

بطوریکه خواهیم دید، $\left|\frac{V_o}{V_i}\right|$ و φ تابع فرکانس f خواهند بود. منحنی نمایش تغییرات $\left|\frac{V_o}{V_i}\right|$ نسبت به فرکانس به مشخصه پاسخ دامنه و منحنی تغییرات φ نسبت به فرکانس به مشخصه فاز موسوم است.

✓ فیلتر بالاگذر

شکل زیر را که اتصال سری خازن و مقاومت است در نظر بگیرید. خروجی از دو سر مقاومت گرفته می‌شود.



شکل (۸-۱)

تابع پاسخ فرکانسی برای این مدار عبارت است از:

$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC}$$

$$|A_V| = \left|\frac{V_o}{V_i}\right| = \frac{\omega RC}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$$

$$\varphi = Arctg\left(\frac{1}{\omega RC}\right)$$

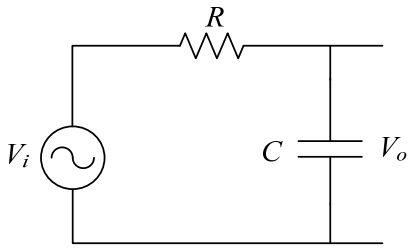
در فرکانس‌های بالا، وقتیکه $\omega RC >> ۱$ است، $\varphi \approx ۰^\circ$ و $|V_o/V_i| \approx ۱$ و وقتیکه $\omega RC << ۱$ می‌باشد، $\varphi \approx ۹۰^\circ$ و $|V_o/V_i| \approx ۰$ و به این ترتیب مدار RC فوق که ولتاژهای با فرکانس بالا را از خود عبور می‌دهد و ولتاژهای با فرکانس پایین را به شدت تضعیف می‌نماید به فیلتر بالاگذر موسوم است.

در این حالت نیز فرکانس قطع جایی است که ولتاژ خروجی به $۱/\sqrt{۲}$ ولتاژ ورودی در فرکانس عبور کاهش می‌یابد. بنابراین داریم:

$$\left|\frac{V_o}{V_i}\right| = \frac{\omega RC}{\sqrt{۱+(\omega RC)^۲}} = \frac{۱}{\sqrt{۲}} \Rightarrow f_c = \frac{۱}{۲\pi RC}$$

✓ فیلتر پایین‌گذر

شکل زیر مدار مرتبه اول سری RC را نشان می‌دهد و خروجی از دو سر خازن گرفته می‌شود.



شکل (۸-۲)

اکنون مدار RC شکل بالا را در نظر می‌گیریم. تابع پاسخ فرکانسی برای این مدار بصورت زیر تعیین می‌شود:

$$\begin{cases} V_i = (R + \frac{۱}{j\omega C})I \\ V_o = (\frac{۱}{j\omega c})I \end{cases} \Rightarrow A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{۱}{۱ + j\omega RC} = |A_V| \angle \varphi^o$$

که در آن:

$$|A_V| = \left|\frac{V_o}{V_i}\right| = \frac{۱}{\sqrt{۱+(\omega RC)^۲}}$$

$$\varphi = Arctg(-\omega RC)$$

رابطه نخست نشان می‌دهد که در فرکانس‌های پایین، وقتی که $\omega RC << ۱$ است $|V_o/V_i| \approx ۱$ خواهد بود. همچنین در فرکانس‌های بالا، وقتی که $\omega RC >> ۱$ می‌باشد، $|V_o/V_i| \approx ۰$ است. مدار RC فوق که ولتاژهای با فرکانس پایین را از خود عبور می‌دهد و ولتاژهای با فرکانس بالا را به شدت تضعیف می‌نماید به فیلتر پایین‌گذر موسوم است.

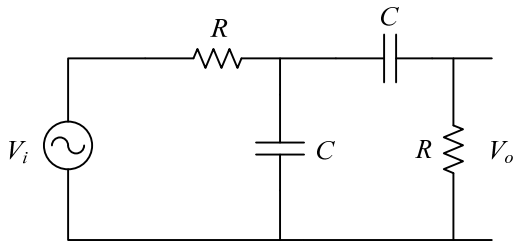
خاصیت دیگر این مدار اختلاف فازی است که بین ولتاژ خروجی و ولتاژ ورودی ایجاد می‌نماید. بطوریکه از رابطه دوم (فاز) بر می‌آید، در فرکانس‌های پایین $\varphi \approx ۰^\circ$ بوده و در فرکانس‌های بالا $\varphi \approx -۹۰^\circ$ خواهد بود.

فرکانس قطع یا فرکانس نصف قدرت که با f_c نشان داده می‌شود، فرکانسی است که صافی پایین‌گذر فرکانس‌های بالاتر از آن را به شدت تضعیف می‌کند. در این فرکانس اندازه توان خروجی به نصف ماکزیمم توان خروجی می‌رسد (در این مدار ولتاژ خروجی به $۱/\sqrt{۲}$ ولتاژ ورودی در فرکانس عبور کاهش می یابد). بنابراین فرکانس قطع برابر است با:

$$\left|\frac{V_o}{V_i}\right| = \frac{۱}{\sqrt{۱+(\omega RC)^۲}} = \frac{۱}{\sqrt{۲}} \Rightarrow f_c = \frac{۱}{۲\pi RC}$$

✓ فیلتر میان‌گذر

شکل زیر ترکیب دو فیلتر پایین‌گذر و بالاگذر را بطور سری نشان می‌دهد.



شکل (۸-۳)

تابع پاسخ فرکانسی برای این مدار عبارت است از:

$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{j\omega RC}{۱+۳\,j\omega RC-\omega^۲R^۲C^۲}$$

$$|A_V| = \left|\frac{V_o}{V_i}\right| = \frac{\omega RC}{\sqrt{(۱-\omega^۲R^۲C^۲)^۲+۹\omega^۲R^۲C^۲}}$$

$$\varphi = ۹۰^o - Arctg\left(\frac{۳\omega RC}{۱-\omega^۲R^۲C^۲}\right)$$

در فرکانس‌های بالا ($\omega RC >> ۱$) و همچنین در فرکانس‌های پایین ($\omega RC << ۱$) خواهیم داشت: $|V_o/V_i| \approx ۰$؛ لذا خروجی در بعضی فرکانس‌های میانی به ماکزیمم مقدار خود خواهد رسید و با تغییر فرکانس به صورت صعودی یا نزولی خروجی کاهش خواهد یافت، لذا این مدار به فیلتر میان‌گذر موسوم است. فرکانسی که در آن خروجی به ماکزیمم خود می‌رسد، فرکانس مرکزی یا میانی نامیده و با $f_۰$ نشان می‌دهند. اختلاف بین دو فرکانس که در آنها خروجی به $۱/\sqrt{۲}$ برابر ماکزیمم خودش می‌رسد، پهنای باند نامیده می‌شود. در این دو فرکانس توان خروجی به نصف ماکزیمم توان خروجی می‌رسد.

محاسبه فرکانس مرکزی به شکل زیر انجام می‌شود:

$$\frac{d|A_V|}{d\omega}=0 \Rightarrow \omega=\frac{1}{RC} \Rightarrow f_0=\frac{1}{2\pi RC}$$
$$A_V(f_0)=\frac{j}{1+3j-1} \Rightarrow A_V(f_0)=\frac{1}{3}$$

محاسبه پهنای باند به شکل زیر است:

$$|A_V|=\frac{1}{3\sqrt{2}} \Rightarrow R^4C^4\omega^4-11R^2C^2\omega^2+1=0$$
$$BW=f_1-f_2 \quad , \quad f_1=\frac{\omega_1}{2\pi} \quad , \quad f_2=\frac{\omega_2}{2\pi}$$
$$(\omega_1-\omega_2)^2=\omega_1^2+\omega_2^2-2\omega_1\omega_2=\frac{11}{R^2C^2}-2\frac{1}{R^2C^2} \Rightarrow \omega_1-\omega_2=\frac{3}{RC}$$
$$BW=\frac{3}{2\pi RC} \quad , \quad \omega_1=\frac{3/3}{RC} \quad , \quad \omega_2=\frac{0/3}{RC}$$

✓ منحنی‌های لیساژو و اندازه‌گیری دامنه و اختلاف فاز

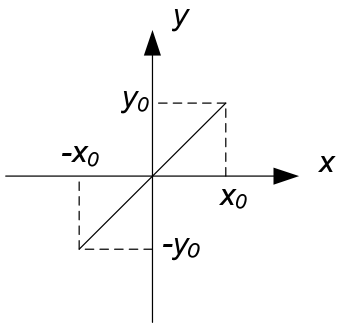
یکی از روشهای بدست آوردن پاسخ فرکانسی یک مدار استفاده از اشکال لیساژو است. تصاویر لیساژو تصاویری هستند که در آنها یک موج بر حسب موج دیگر ترسیم می‌شود به گونه‌ای که متغیر زمان از معادلات شکل موج حذف شود. به کمک این تصاویر می‌توان اختلاف فاز میان دو موج سینوسی هم فرکانس و نیز نسبت فرکانسی دو موج سینوسی را بدست آورد.

دو موج سینوسی $x=x_0 \sin\omega t$ و $y=y_0 \sin(\omega t+\varphi)$ را در نظر می‌گیریم و برای آنکه حرکت نقطه‌ای تحت تأثیر این دو موج را بررسی کنیم حالات مختلفی را در نظر می‌گیریم:

الف: دو موج همفاز باشند. یعنی $\varphi=0$

$$\begin{cases} x=x_0 \sin\omega t \\ y=y_0 \sin\omega t \end{cases} \Rightarrow y=\frac{y_0}{x_0}x$$

که نشان دهنده یک خط راست است با این تفاوت که x و y هر دو محدود هستند و در حقیقت یک پاره خط خواهیم داشت.



شکل (۸-۴)

ب: دو شکل موج دارای اختلاف فاز برابر $\pi/۲$ هستند یعنی $\varphi = \pi/۲$.

$$\begin{cases} x = x_{\circ} \sin \omega t \\ y = y_{\circ} \sin(\omega t + \pi/۲) = y_{\circ} \cos \omega t \end{cases}$$

با حذف زمان از معادلات فوق رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\left(\frac{x}{x_{\circ}}\right)^{۲} + \left(\frac{y}{y_{\circ}}\right)^{۲} = ۱$$

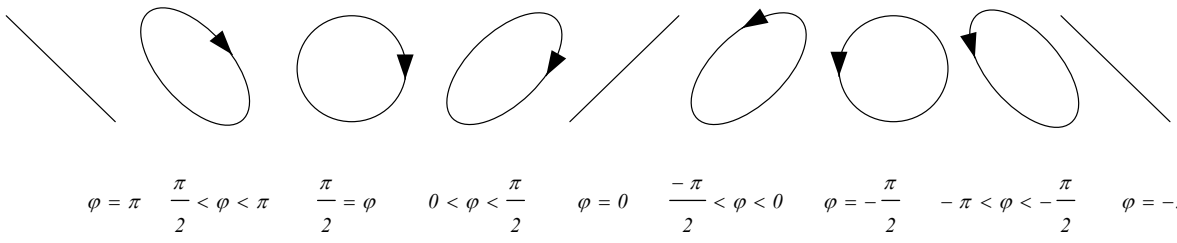
که نشان دهنده یک بیضی است که اقطار آن در امتداد محورهای x و y می‌باشد (بیضی استاندارد). در همین حالت اگر دامنه دو موج با هم برابر باشد $x_{\circ} = y_{\circ} = a$، در این صورت تصویر حاصل یک دایره به شعاع a خواهد بود.

ج: دو موج دارای اختلاف فاز $\varphi = \pi$ باشند:

$$\begin{cases} x = x_{\circ} \sin \omega t \\ y = y_{\circ} \sin(\omega t + \pi) = -y_{\circ} \sin \omega t \end{cases} \Rightarrow \; y = -\frac{y_{\circ}}{x_{\circ}} x$$

که نشان دهنده یک پاره خط در ربع دوم و چهارم می‌باشد.

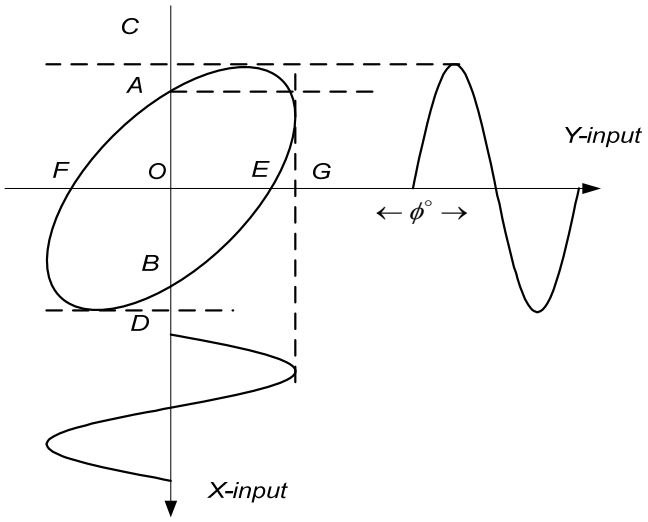
در شکل زیر تصاویر مختلف حاصل برای مقادیر مشخصی از φ نشان داده شده است. علامت فلش روی این نمودارها مربوط به جهت حرکت الکترونها روی صفحه اسیلوسکوپ می‌باشد.



شکل (۸-۵)

اختلاف فاز:

اکنون فرض می‌کنیم که دو موج دارای فرکانس برابر و اختلاف فاز آنها $0 < \varphi < \pi/2$ باشد، همانطور که مشاهده کردیم تصویر حاصل از ترکیب دو موج یک بیضی مطابق شکل زیر می‌باشد. این بیضی هنگامی محور y ها را قطع می‌کند که:



شکل (۸-۶)

$$\begin{cases} x = x_\circ \sin \omega t = \circ \Rightarrow \omega t = k\pi \\ y = y_\circ \sin(\omega t + \varphi) \Rightarrow y = y_\circ \sin(k\pi + \varphi) = \pm y_\circ \sin\varphi \end{cases}$$

به این ترتیب داریم:

$$y\big|_{x=\circ} = y_\circ \sin\varphi \Rightarrow \varphi = Arc\sin\left(\frac{y_{x=\circ}}{y_\circ}\right)$$

اگر در نظر بگیریم که $2y_{x=\circ} = \alpha$ و $2y_\circ = \beta$ باشد، اختلاف فاز خواهد شد:

$$\varphi = Arc\sin\left(\frac{\alpha}{\beta}\right)$$

دقت کنید که در اندازه‌گیری اختلاف فاز دو موج سینوسی با کمک تصاویر لیساژو نقطه نورانی اسیلوسکوپ باید در مبدأ و وسط صفحه تنظیم شود.

اندازه‌گیری فرکانس مجهول:

اگر f_x فرکانس یک موج سینوسی $x = x_\circ \sin \omega_x t$ و f_y فرکانس موج سینوسی $y = y_\circ \sin \omega_y t$ باشد، چنانچه موج x را به ورودی X و موج y را به ورودی Y نوسان‌نگار بدهیم، تصاویری حاصل می‌شود که در جهت محورهای مختصات دارای ماکزیمم‌هایی خواهد بود. همواره نسبت f_y به f_x برابر با نسبت تعداد نقاط ماکزیمم در امتداد محور عمودی به تعداد نقاط ماکزیمم در جهت محور افقی می‌باشد.

$$\frac{f_y}{f_x} = \frac{N_V}{N_H}$$

خودآزمایی

*با توجه به شکل (۸-۲) و مقادیر R=۱۰ $K\Omega$ و C=۱۰۰ nF به سؤالات زیر پاسخ دهید:

۱- فرکانس قطع یا فرکانس نصف قدرت f_c را برای فیلتر پایین‌گذر با مقادیر داده شده حساب کنید.
۲- مقدار فاز و دامنه موج خروجی را به ازای موج سینوسی با فرکانس ۱۵۹/۵ هرتز ودامنه ۴ ولت محاسبه کنید. فرکانس ۱۵۹/۵ هرتز برای این فیلتر چه فرکانسی است؟
۳- اختلاف فاز بین موج ورودی و خروجی را چگونه می‌توان اندازه گرفت؟
۴- به کمک نرم افزار، منحنی نمایش تغییرات $|V_o/V_i|$ نسبت به فرکانس را که به مشخصه پاسخ دامنه و منحنی تغییرات $(\angle V_o - \angle V_i) = \varphi$ نسبت به فرکانس را که به مشخصه فاز موسوم است، برای مدار شکل (۸-۲) رسم کنید. خروجی از دو سر خازن دیده شود. (فرکانس قطع روی نمودار مشخص گردد.)

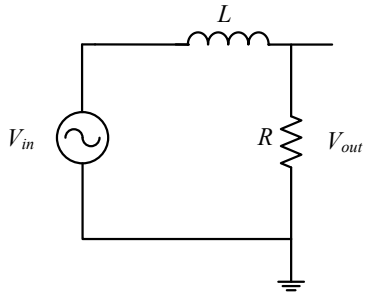
*با توجه به شکل (۸-۱) و مقادیر R=۱۰ $K\Omega$ و C=۱۰۰ nF به سؤالات زیر پاسخ دهید:

۵- فرکانس قطع یا فرکانس نصف قدرت f_c را برای فیلتر بالاگذر با مقادیر داده شده حساب کنید.
۶- به کمک نرم افزار، منحنی نمایش تغییرات $|V_o/V_i|$ و منحنی تغییرات $(\angle V_O - \angle V_i)=\varphi$ را نسبت به فرکانس برای فیلتر بالاگذر شکل (۸-۱) با مقادیر داده شده رسم کنید. خروجی از دو سر مقاومت دیده شود. (مقدار فرکانس قطع روی نمودار مشخص گردد.)

*با توجه به فیلتر میانگذر شکل (۸-۳) و مقادیر R=۱۰ $K\Omega$ و C=۱۰۰ nF به سؤالات زیر پاسخ دهید:

۷- ماکزیمم دامنه ولتاژ خروجی، فرکانس مرکزی ، فرکانس قطع بالا و پایین و پهنای باند را با ذکر روابط محاسبه کنید.
۸- به کمک نرم افزار، منحنی نمایش تغییرات $|V_o/V_i|$ و منحنی تغییرات $(\angle V_O - \angle V_i)=\varphi$ را نسبت به فرکانس برای فیلتر میانگذر شکل (۸-۳) با مقادیر داده شده رسم کنید. ماکزیمم دامنه ولتاژ خروجی، فرکانس مرکزی ، فرکانس قطع بالا، فرکانس قطع پایین و پهنای باند را روی نمودار مشخص کرده و با نتایج تئوری مقایسه کنید.

* با توجه به فیلتر پایین‌گذر شکل زیر و با فرض R=۵۰۰ Ω و L =۲۲ mH به سوالات زیر پاسخ دهید:



شکل(۸-۷)

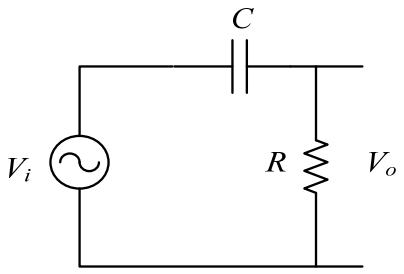
۹- فرکانس قطع یا فرکانس نصف قدرت f_c را برای فیلتر پایین‌گذر شکل (۸-۴) با مقاومت $R=۵۰۰\,\Omega$ و سلف ۲۲ میلی هانری حساب کنید (با ذکر روابط).

۱۰-به کمک نرم افزار، منحنی نمایش تغییرات $|V_o/V_i|$ و منحنی تغییرات $(\angle V_O-\angle V_i)=\varphi$ را نسبت به فرکانس برای مدار شکل (۸-۷) با مقادیر $R=۵۰۰\,\Omega$ و سلف ۲۲ میلی هانری رسم کنید. (فرکانس قطع روی نمودار مشخص گردد.)

شرح آزمایش

✓ فیلتر بالاگذر: بررسی پاسخ فرکانسی *RC*

با استفاده از $R=۱۰\ K\Omega$ و $C=۱۰۰\ nF$ فیلتر بالاگذری مطابق شکل(۸-۸) بسازید.



شکل (۸-۸)

الف- یک موج سینوسی با ولتاژ دامنه ۴ ولت به مدار اعمال نموده و برای فرکانس‌های داده شده در جدول زیر، مقدار ولتاژ خروجی و اختلاف فاز موج ورودی و خروجی را اندازه‌گیری نمایید. دقت داشته باشید در هنگامی که فرکانس نوسان‌ساز را تغییر می‌دهید، ولتاژ ورودی تغییر نکند و همواره روی دامنه ۴ ولت ثابت بماند. اختلاف فاز موج ورودی و خروجی را به کمک اندازه‌گیری فاصله زمانی دو قله یا دو صفر به دست آورید. ($\Delta\varphi=۲\pi f\Delta t$)

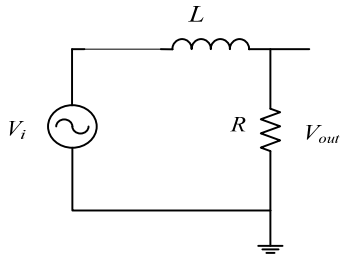
ب- در جدول زیر سطر مربوط به V_0 محاسبه شده و φ محاسبه شده از طریق روابط تئوری را در گزارش کار تحویلی کامل کنید.

ج– فرکانس قطع این فیلتر را به کمک اسیلوسکوپ اندازه گرفته و با نتیجه تئوری مقایسه کنید.

فرکانس f (*Hz*)	۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۵۰۰	۱۰۰۰	۱۰,۰۰۰
V_0 اندازه‌گیری شده						
φ اندازه‌گیری شده						
V_0 محاسبه شده						
φ محاسبه شده						

✓ **فیلتر پایین‌گذر: بررسی پاسخ فرکانسی *RL***

با استفاده از مقاومت $R=۵۰۰\,\Omega$ و $L=۲۲\,mH$ مدار شکل (۸-۹) را که یک فیلتر پایین‌گذر است ببندید.



شکل(۸-۹)

الف- یک موج سینوسی با مقدار دامنه ۲ ولت به ورودی مدار اعمال کرده و با فرکانس‌هایی که در جدول زیر قید شده مقدار دامنه ولتاژ خروجی و اختلاف فاز φ بین موج ورودی وخروجی را بوسیله اسیلوسکوپ یافته و یادداشت کنید. اختلاف فاز φ بین موج ورودی و خروجی را به کمک منحنی‌های لیساژو (اندازه‌گیری α,β) که در مقدمات توضیح داده شده اندازه‌گیری کنید. دقت داشته باشید هنگامی که فرکانس نوسان‌ساز را تغییر می‌دهید، دامنه ولتاژ ورودی همواره روی ۲ ولت ثابت بماند.

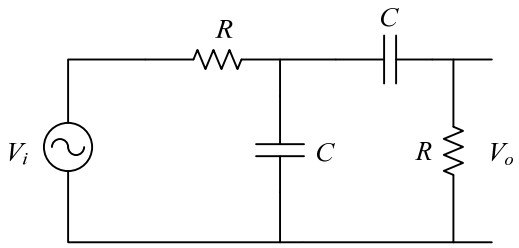
ب- در جدول زیر سطر مربوط به V_0 محاسبه شده و φ محاسبه شده از طریق روابط تئوری را در گزارش کار نهایی کامل کنید و با نتایج آزمایش مقایسه کنید.

ج- فرکانس قطع این فیلتر را به کمک اسیلوسکوپ اندازه گرفته و با نتیجه تئوری مقایسه کنید.

فرکانس f (Hz)	۱۰۰	۵۰۰	۱۰۰۰	۳۰۰۰	۱۰,۰۰۰	۲۰,۰۰۰
α اندازه‌گیری شده						
β اندازه‌گیری شده						
V_0 اندازه‌گیری شده						
$\varphi = Arc\sin(\frac{\alpha}{\beta})$						
V_0 محاسبه شده						
φ محاسبه شده						

✓ فیلتر میان‌گذر

با استفاده از $R=۱۰\ K\Omega$ و $C=۱۰۰\ nF$ فیلتر میان‌گذری مطابق شکل (۸-۱۰) بسازید.



شکل (۸-۱۰)

الف - یک موج سینوسی با ولتاژ دامنه ۴ ولت به مدار اعمال نموده و برای فرکانس‌های داده شده در جدول زیر، مقدار ولتاژ خروجی و اختلاف فاز را اندازه‌گیری کنید. دقت داشته باشید هنگامی که نوسان‌ساز را تغییر می‌دهید ولتاژ ورودی تغییر نکند و همواره بر روی دامنه ۴ ولت بماند. در جدول زیر سطر مربوط به V_0 محاسبه شده و φ محاسبه شده از طریق روابط تئوری را در گزارش کار تحویلی کامل کنید. اختلاف فاز را به روش انتخابی خودتان اندازه بگیرید.

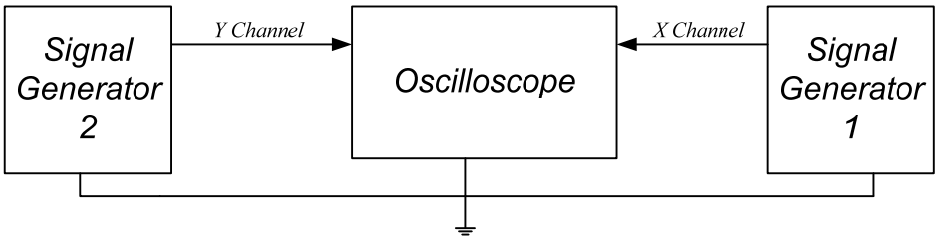
ب – مقدار ماکزیمم دامنه خروجی، فرکانس مرکزی، فرکانس قطع بالا، فرکانس قطع پایین و پهنای باند را به کمک اسیلوسکوپ اندازه گرفته و با نتایج تئوری مقایسه کنید.

فرکانس f (Hz)	۲۵	۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۲۰۰	۵۰۰	۱۰۰۰
V_0 اندازه‌گیری شده							
φ اندازه‌گیری شده							
V_0 محاسبه شده							
φ محاسبه شده							

✓ اندازه‌گیری فرکانس مجهول و منحنی‌های لیساژو

الف- یک نوسان‌ساز موج سینوسی را به عنوان منبع با فرکانس مجهول و نوسان‌ساز موج سینوسی دیگری را به عنوان منبع با فرکانس معلوم در نظر بگیرید. ورودی‌های دو کانال X و Y اسیلوسکوپ را مطابق شکل

(۸-۱۱) به دو نوسان‌ساز موج سینوسی مجزا متصل کنید. اسیلوسکوپ را در مد x-y قرار دهید. سعی کنید با تغییر فرکانس منبع معلوم و مشاهده منحنی‌های لیساژو، فرکانس منبع مجهول را بدست آورید.



شکل (۸-۱۱)

ب- فرکانس نوسان‌ساز متصل به کانال X را ثابت و فرکانس نوسان‌ساز متصل به کانال Y را به صورت ضریبی از فرکانس ثابت مفروض قرار دهید که این ضرایب شامل ۱، ۲ و۳ می‌باشد. شکل‌های حاصل را ترسیم نمایید.

معادله منحنی‌های لیساژو را در حالت ضرایب فرکانسی ۲ و ۳ هنگامی که به یک تابع تبدیل می‌شوند بدست آورید.

آزمایش ۹

پاسخ فرکانسی مدارهای مرتبه دوم و تطبیق امپدانسی

هدف از این آزمایش آشنایی با رفتار فرکانسی مدارهای مرتبه دوم، نحوه تأثیر مقادیر عناصر در این رفتار، مشاهده پاسخ دامنه و پاسخ فاز، بررسی رفتار فیلتری آنها، بدست آوردن فرکانس تشدید، فرکانس قطع، پهنای باند و ضریب کیفیت و نحوه ارتباط آنها با مقادیر عناصر است. در قسمت بعد نیز با نحوه تطبیق مدارهایی با مقاومت ورودی معین به منبعی با مقاومت ورودی معین جهت دریافت ماکسیمم توان آشنا می‌شوید. بدین منظور می‌توان از یک مدار LC بین این دو بخش استفاده نمود.

مقدمات

✓ پاسخ فرکانسی مدار RLC سری

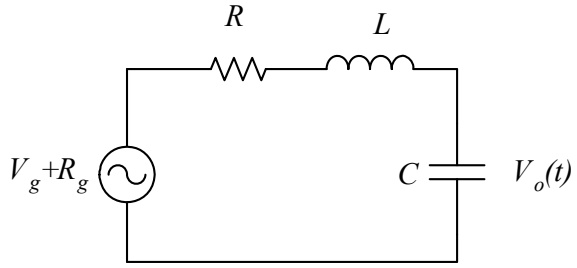
مدار RLC سری را می‌توان برای نمایش بسیاری از شبکه‌ها به کار برد. ترکیب سری و یا موازی اجزای R، L و C دارای یک پاسخ طبیعی با فرکانس طبیعی معینی می‌باشد. هنگامی که این مدارها با یک منبع سینوسی که فرکانس آن برابر و یا نزدیک به فرکانس طبیعی مدار است تحریک می‌شوند اثر جالبی از آنها بروز می‌کند، که به پدیده تشدید موسوم است. در این آزمایش مدار تشدید سری RLC را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

الف:خروجی ولتاژ خازن

شکل زیر مدار RLC سری را نشان می‌دهد که خروجی از دو سر خازن گرفته شده است. هنگامی که نوسان‌ساز تغییر می‌کند و ولتاژ آن ثابت می‌ماند، پاسخ مدار و یا جریان I تغییر می‌کند. امپدانس مدار که از دو سر منبع دیده می‌شود برابر است با:

$$Z = R_t + j\left(\omega L - \frac{۱}{\omega C}\right)$$

که در آن $R_t = R_g + R$ مقاومت کل مدار است.



شکل(۹-۱)

بررسی رابطه فوق نشان می‌دهد که در فرکانس:

$$\omega_s = \frac{۱}{\sqrt{LC}} \Rightarrow f_s = \frac{۱}{۲\pi\sqrt{LC}}$$

امپدانس مدار به حداقل مقدار خود یعنی $Z = Z_s = R_t$ کاهش می‌یابد. بدیهی است که در این فرکانس جریان مدار ماکزیمم خواهد بود و مقدار آن برابر است با:

$$I = I_s = \frac{V_g}{R_t}$$

فرکانس f_s که در آن مدار بصورت یک مقاومت خالص در می‌آید، به فرکانس تشدید موسوم است. نکته جالب در فرکانس تشدید روابط بین ولتاژ دو سر خازن و دو سر سلف با ولتاژ منبع است که عبارتند از:

$$|V_{Cs}| = \frac{1}{\omega_s C} I_s = \frac{1}{\omega_s C}.\frac{V_g}{R_t} = Q_s V_g$$

$$|V_{Ls}| = \omega_s L I_s = \omega_s L.\frac{V_g}{R_t} = Q_s V_g$$

که در آن $Q_s = \frac{1}{\omega_s C R_t} = \frac{L\omega_s}{R_t}$ ضریب کیفیت مدار سری در فرکانس تشدید است. روابط فوق نشان می‌دهند که دامنه ولتاژ دو سر خازن و سلف در فرکانس تشدید برابر هستند و در صورتیکه $Q_s > 1$ باشد (که غالباً چنین است) ولتاژ دو سر خازن و سلف Q_s برابر ولتاژ منبع است و به این ترتیب مدار فوق به شکل یک تقویت کننده ولتاژ عمل می‌کند.

با توجه به شکل مدار نشان داده شده برای RLC سری، خواهیم داشت:

$$A_V = \frac{V_o}{V_g} = \frac{1}{1 - LC\omega^2 + jR_t C\omega}$$

$$|A_V| = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - LC\omega^2\right)^2 + R_t^2 C^2 \omega^2}}$$

$$\varphi = Arctg\left(\frac{R_t C\omega}{LC\omega^2 - 1}\right)$$

در فرکانس‌های بسیار پایین $|A_V| \approx 1$ می‌باشد. همانطور که قبلاً گفته شد در صورتیکه $|A_V| > 1$ باشد مدار بصورت یک تقویت کننده عمل می‌نماید، لذا در فرکانس مشخصی باید ولتاژ خازن به ماکزیمم مقدار برسد. برای محاسبه مقدار ماکزیمم ولتاژ خازن از $|A_V|$ نسبت به ω مشتق می‌گیریم:

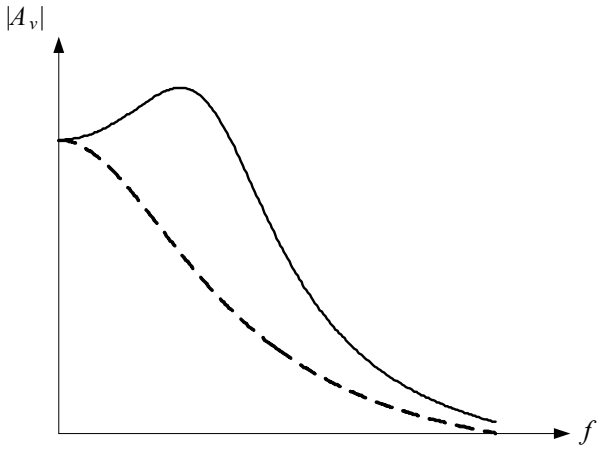
$$|A_V|' = \frac{d|A_V|}{d\omega} = 0 \Rightarrow \omega_1 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R_t^2}{2L^2}} \Rightarrow f_1 = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R_t^2}{2L^2}}$$

$$f_1 < f_s$$

$$|A_V| = \frac{Q_s}{\sqrt{1 - \frac{R_t^2 C}{4L}}}$$

شرط $Q_s > 1$ همان $R_t^2 < \frac{L}{C}$ است ولی شرط وجود نقطه ماکزیمم برای ولتاژ خازن $R_t^2 < \frac{2L}{C}$ می‌باشد.

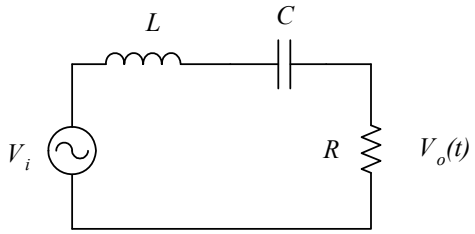
مشخصه پاسخ دامنه برای ولتاژ خازن بصورت یک فیلتر پایین‌گذر می‌باشد و در بعضی از حالتها با برقراری شرط $R_t^2 < \frac{2L}{C}$ دارای یک ماکزیمم نیز خواهد بود.



شکل(۹-۲)

ب: خروجی ولتاژ مقاومت

معمولاً منظور از پاسخ مدار RLC سری ولتاژ دو سر مقاومت است. شکل زیر را در نظر بگیرید.



شکل(۹-۳)

پاسخ فرکانسی مدار عبارت است از (مقدار R_g در نظر گرفته نشده است):

$$A_V = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}$$

که می‌توان آن را بصورت زیر نوشت:

$$A_V = \frac{1}{1 + jQ_s\left(\frac{\omega}{\omega_s} - \frac{\omega_s}{\omega}\right)} = |A_V| \angle \varphi$$

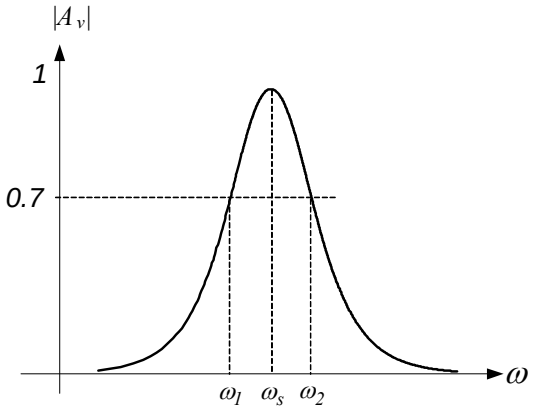
بطوریکه:

$$|A_V| = \frac{1}{\sqrt{1+Q_s^2\left(\frac{\omega}{\omega_s}-\frac{\omega_s}{\omega}\right)^2}}$$

$$\varphi = Arctg\left(Q_s\left(\frac{\omega_s}{\omega}-\frac{\omega}{\omega_s}\right)\right)$$

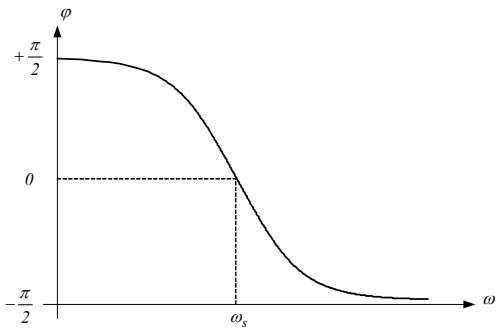
روابط فوق نشان می‌دهند که وقتی فرکانس منبع برابر $\omega=\omega_s$ باشد، $\left|\frac{V_o}{V_i}\right|=1$ است و برای فرکانس $\omega<<\omega_s$ و $\omega>>\omega_s$ با فرض $Q_s>1$ ولتاژ خروجی تقریبا صفر است.($\left|\frac{V_o}{V_i}\right|\approx 0$) شکل زیر منحنی نمایش پاسخ دامنه را نشان می‌دهد. نقاط ω_s، ω_1 و ω_2 در این شکل حائز اهمیت زیادی هستند. نقاط ω_1 و ω_2 به فرکانس‌های نصف قدرت یا فرکانس قطع معروفند. (فرکانس‌هایی که در آنها ولتاژ خروجی V_o به $\frac{1}{\sqrt{2}}$ ولتاژ ماکزیمم خود V_i می‌رسد و در مقیاس لگاریتمی ،فرکانسی که به ازای آن ولتاژ خروجی به اندازه $3\ dB$ نسبت به مقدار ماکزیمم خود کاهش یابد). تفاضل $\omega_2-\omega_1$ به عرض باند موسوم است که با BW نشان داده می‌شود. برای فرکانس‌های قطع نزدیک به فرکانس تشدید می‌توان نشان داد که:

$$BW = \omega_2-\omega_1 \approx \frac{\omega_s}{Q_s}=\frac{R}{L}$$



شکل(۹-۴)

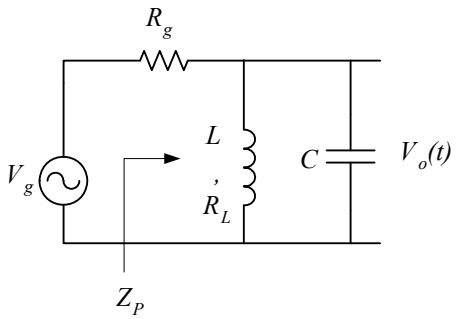
به این ترتیب مدار RLC سری که فرکانس‌های میانی ω_1 تا ω_2 را به راحتی از خود عبور داده و فرکانس‌های دیگر را به شدت تضعیف می‌کند به فیلتر میان‌گذر موسوم است. برای $\omega=\omega_s$ اختلاف فاز بین ولتاژ ورودی و ولتاژ خروجی صفر ($\varphi=0$) و برای $\omega<<\omega_s$، $\varphi\approx\frac{\pi}{2}$ و برای $\omega>>\omega_s$، $\varphi\approx-\frac{\pi}{2}$ است. شکل زیر پاسخ فاز این مدار را نشان می‌دهد.



شکل(۹-۵)

✓ پاسخ فرکانسی مدار *RLC* موازی

مدار *RLC* موازی را به شکل زیر در نظر می‌گیریم.



شکل(۹-۶)

از ویژگیهای حالت تشدید در مدار آن است که V_o ماکزیمم، Z_p کاملا مقاومتی و V_o و V_g هم فاز هستند. به علت تبادل انرژی بین اجزا واکنشی حلقه خازن- سلف، مدار موازی را مدار تانک (*Tank Circuit*) و به جریان حلقه جریان تانک گفته می‌شود.

ادمیتانس مدار موازی عبارت است از:

$$Y = Y_L + Y_C$$

$$Y = \frac{۱}{R_L + j\omega L} + j\omega C$$

$$\Rightarrow Y = \frac{R_L}{R_L^۲ + \omega^۲ L^۲} - j\left(\frac{\omega L}{R_L^۲ + \omega^۲ L^۲} - \omega C\right)$$

بررسی رابطه فوق نشان می‌دهد که حالت تشدید وقتی رخ می‌دهد که قسمت موهومی برابر صفر باشد (ماکزیمم امپدانس در خروجی). بنابراین خواهیم داشت:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{۱}{LC} - \left(\frac{R_L}{L}\right)^۲}$$

رابطه فوق به صورت زیر نیز نوشته می‌شود:

$$\omega_p = \omega_s \sqrt{1 - \frac{1}{Q_s^2}}$$

که در آن ω_s فرکانس تشدید مدار سری RLC است و $Q_s = \frac{L\omega_s}{R_L}$ ضریب کیفیت مدار سری در فرکانس تشدید ω_s است. بدیهی است که برای مقادیر بزرگ Q_s فرکانس مدار تشدید موازی ω_p برابر ω_s است. در فرکانس تشدید فاز جریان و فاز ولتاژ منبع یکی است. به عبارت دیگر ضریب قدرت برابر واحد است و امپدانس ورودی Z_p مقاومت خالص و برابر است با:

$$Z_p = \frac{R_L^2 + L^2\omega_p^2}{R_L} = R_L + Q_p L\omega_p = R_L(1 + Q_p^2)$$

برای مقادیر بزرگ Q_p می‌توان نوشت:

$$Z_p = R_L Q_p^2$$

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \qquad Q_s >> 1$$

$$Z_p = \frac{L}{CR_L} \qquad Q_s, Q_p >> 1$$

با این ترتیب با انتخاب مناسب L و C می‌توان مقاومتهای ورودی متفاوتی بدست آورد. بدیهی است که اگر $Z_p = R_g$ باشد ماکزیمم مقدار قدرت از منبع به بار منتقل می‌شود.

روابط بین جریان خازن و جریان سلف با جریان منبع در فرکانس تشدید عبارت است از:

$$|I_C| \approx \frac{|V_o|}{|X_C|} = \omega_p C |V_o|$$

$$|I_g| \approx \frac{|V_o|}{|Z_p|} = \frac{CR_L}{L}|V_o|$$

$$\Rightarrow |I_C| = Q_p |I_g|$$

بنابراین می‌توان گفت که مدار بصورت یک تقویت کننده جریان عمل می‌کند. از این روست که در ورودی گیرنده‌های رادیویی یا تلویزیونی عموماً از مدار تشدید موازی استفاده می‌کنند. (آنتن ها به منزله منبع جریان هستند)

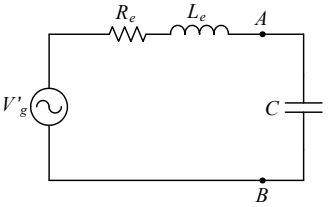
نظیر آنچه که در مدار سری دیدیم پاسخ فرکانسی مدار موازی نشان داده شده عبارت است از:

$$A_V = \frac{V_C}{V_g} = \frac{Z_p}{Z_p + R_g}$$

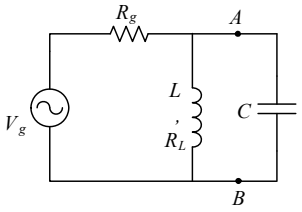
نظر به اینکه در فرکانس تشدید z_p ماکزیمم مقدار خود را داراست لذا ولتاژ خروجی به حداکثر مقدار خود می‌رسد. در فرکانس‌های کمتر و یا بیشتر از فرکانس تشدید ولتاژ خروجی کاهش می یابد. رابطه فرکانس های قطع و نیز عرض باند نظیر مدار سری عبارت است از:

$$BW = \frac{\omega_p}{Q_p}$$

با توجه به مدار معادل سری زیر پهنای باند به شکل زیر نوشته می‌شود:



مدار سری معادل با مدار موازی از دو سر A و B



مدارموازی

شکل(۹-۷)

$$\begin{cases} V_g' = \dfrac{R_L + j\omega L}{R_g + R_L + j\omega L}.V_g \\ R_e = \dfrac{R_g\left(R_g R_L + R_L^2 + \omega^2 L^2\right)}{\left(R_g + R_L\right)^2 + \omega^2 L^2} \\ L_e = \dfrac{R_g^2 L}{\left(R_g + R_L\right)^2 + \omega^2 L^2} \end{cases}$$

$$Q_s = \frac{\omega_s L_e}{R_e}$$

$$Q_s = \frac{R_g L \omega_s}{R_g R_L + R_L^2 + \omega^2 L^2}$$

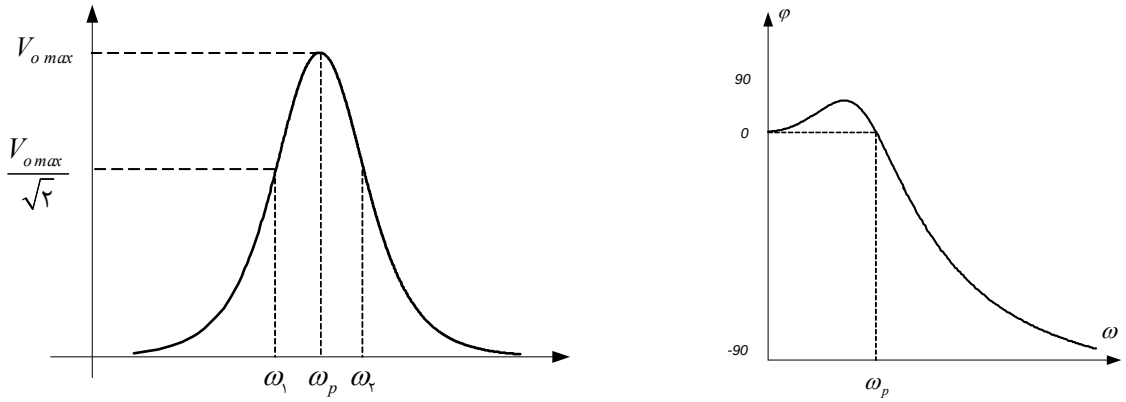
$$BW = \frac{\omega_s}{Q_s} = \frac{R_g R_L + R_L^2 + \omega^2 L^2}{R_g L}$$

$$BW = \frac{R_L}{L}\left(1 + \frac{R_L}{R_g} + \frac{\omega_s^2 L^2}{R_g R_L}\right)$$

$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{L_e C}}$$

در حالت کلی منبع V_g' برای یک مدار RLC سری دارای دامنه‌ای که تابعی از فرکانس باشد نیست. از این رو مساله پهنای باند وقتی که خروجی از دو سر خازن C گرفته می‌شود معنای درستی ندارد. در حالتیکه در شکل فوق چون V_g' تابعی از فرکانس است لذا مشخصه پاسخ دامنه در دو سر A و B به صورت یک فیلتر میان‌گذر خواهد بود.

فرمول پنهای باند بدست آمده نشان می‌دهد که هر چقدر R_g بیشتر شود عرض باند کمتر و مدار سلکتیومتر است (خاصیت انتخاب کنندگی مدار مربوط به فرکانس می‌شود). بنابراین در مدار موازی استفاده از منبع با مقاومت بیشتر به سلکتیومتر بودن مدار کمک می‌کند. شکلهای زیر منحنی پاسخ دامنه و پاسخ فاز مدار موازی را نشان می‌دهند.

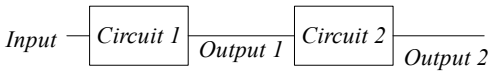


(الف) (ب)

شکل(۹-۸)

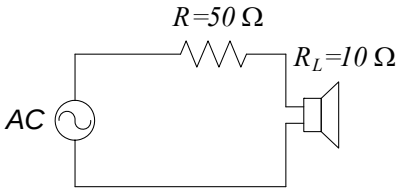
✓ تطبیق امپدانس

در مدارهای الکتریکی و الکترونیکی معمولا لازم است قسمت‌های مختلفی به هم متصل شوند. اتصال مستقیم یک مدار به خروجی مدار دیگر اثر بارگذاری خواهد داشت.



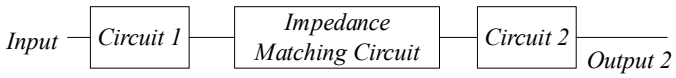
شکل (۹-۹)

اگر امپدانس ورودی مدار دوم با امپدانس خروجی مدار اول مطابق نباشد، توان لازم به مدار دوم و خروجی ۲ منتقل نمی‌شود. مثلا اگر یک بلندگو به امپدانس ۱۰ اهم را به خروجی مداری به امپدانس ۵۰ اهم وصل کنیم تنها $\frac{۱}{۶}$ توان به بار می‌رسد و $\frac{۵}{۶}$ آن در امپدانس خروجی تلف می‌شود.



شکل (۹-۱۰)

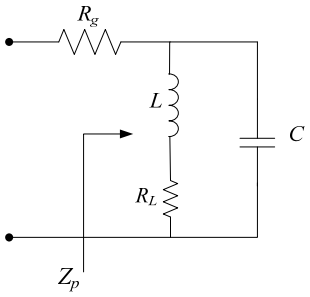
بنابراین در اتصال دو مدار به هم باید در تطابق امپدانس آنها دقت کرد. در صورت عدم تطابق با قرار دادن مدارهای واسطه‌ای می‌توان تطبیق امپدانس ایجاد نمود.



شکل (۹-۱۱)

در بعضی کاربردها تطبیق امپدانس با عناصر فعال مانند ترانزیستور انجام می‌گیرد و در بعضی موارد از مدارهای غیرفعال استفاده می‌شود. همانطور که می‌دانید در مدار RLC موازی امپدانس از دو سر شاخه سلف و خازن در فرکانس ω_p برابر است با:

$$Z_p = R_L(1+Q_p^2) = AR_L$$



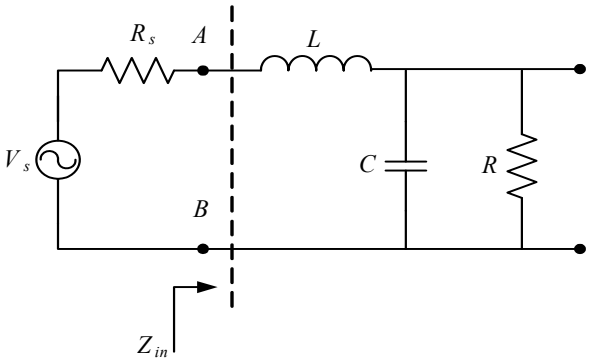
شکل (۹-۱۲)

می‌توان با تعیین مناسب L و C، مقدار A را طوری تعیین نمود که تطبیق امپدانس با خروجی منبع ایجاد گردد و چون L و C توان مصرف نمی‌کنند، لذا توان منتقل شده در R_L مصرف خواهد شد.

شرط تطبیق امپدانس $Z_g = Z_{in}$ می‌باشد به طوریکه توان ماکزیمم به خروجی منتقل می‌شودو Z_{in} امپدانس ورودی مدار تطبیق است.

✓ مدار تطبیق امپدانس درجه ۲

مدار شکل زیر را در نظر بگیرید که به آن منبعی با امپدانس ورودی R_S اعمال می گردد. برای تطبیق امپدانس میان منبع و مقاومت R ، از یک سلف L و یک خازن C استفاده می‌کنیم. با محاسبه Z_{in} داریم:



شکل (۹-۱۳)

$$Z_{in} = \frac{R}{1+R^2C^2\omega^2} + j\left(L\omega - \frac{R^2C\omega}{1+R^2C^2\omega^2}\right)$$

برای انتقال ماکزیمم توان شرط زیر باید برقرار باشد:

$$Z_{in} = \overline{R}_S$$

و از آنجا خواهیم داشت:

$$Im(Z_{in}) = 0 \qquad Re(Z_{in}) = R_S$$

$$\Rightarrow \frac{1}{R^2} + C^2\omega^2 = \frac{C}{L}\ ,\ \frac{R}{1+R^2C^2\omega^2} = R_S \Rightarrow\ R_S = \frac{L}{CR}$$

و اگر فرض کنیم $R_S = \alpha R$ خواهیم داشت:

$$\frac{L}{C} = \alpha R^2 \qquad C^2\omega^2 = \frac{1-\alpha}{\alpha}\cdot\frac{1}{R^2}$$

چون $C^2\omega^2 > 0$ بنابراین : $\alpha < 1$.

لذا مدار فوق برای حالت‌هایی بکار می‌رود که مقاومت بار بزرگتر از مقاومت منبع باشد.

در مسائل روزمره R و R_S مشخص هستند و فرکانسی که در آن توان ماکزیمم باید انتقال یابد نیز معلوم می‌باشد لذا از روابط فوق L و C محاسبه می‌شوند. با این وجود در آزمایشگاه به دلیل محدودیت در مقادیر سلف‌های موجود، سلف برابر ۱۸ میلی هانری انتخاب می‌شود به این ترتیب خازن لازم و فرکانسی که در آن توان ماکزیمم انتقال می یابد تعیین می‌شود.

خودآزمایی

۱- توضیح دهید در مدار RLC سری در فرکانس تشدید دقیقاً چه اتفاقی می‌افتد؟

۲- تحت چه شرایطی و به ازای ولتاژ دو سر کدام عنصر، مدار RLC سری در حالت تشدید مانند تقویت‌کننده ولتاژ عمل می‌کند؟

۳- سه روش آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری Q در مدار RLC سری پیشنهاد کنید.(در هر روش مشخص کنید که خروجی از دو سر کدام عنصر مدار گرفته شده است.)

۴- فرکانس قطع dB ۳، فرکانس مرکزی و پهنای باند را تعریف کرده و به طور جداگانه روی فیلتر پایین‌گذر و میان‌گذر نشان دهید.

۵- فرکانس تشدید و ضریب کیفیت Q را برای مدار RLC سری به ازای $C=۳/۳nF$ و $L=۱۸\ mH$ و مقاومت $K\Omega$ ۱ و $K\Omega$ ۳ محاسبه کنید.

۶- به کمک نرم افزار، منحنی نمایش تغییرات $\left|\frac{V_o}{V_i}\right|$ نسبت به فرکانس را که به مشخصه پاسخ دامنه و منحنی تغییرات φ نسبت به فرکانس را که به مشخصه فاز موسوم است، برای فیلتر میان‌گذر مدار RLC سری با مقادیر داده شده در شکل (۹-۱۴)، رسم کنید. مقادیر ماکزیمم دامنه ولتاژ خروجی، فرکانس مرکزی (تشدید) ، فرکانس قطع بالا، فرکانس قطع پایین و پهنای باند را روی نمودار مشخص کنید. (خروجی دو سر مقاومت).

۷- به کمک نرم افزار، منحنی نمایش تغییرات $\left|\frac{V_o}{V_i}\right|$ نسبت به فرکانس را که به مشخصه پاسخ دامنه و منحنی تغییرات φ نسبت به فرکانس را که به مشخصه فاز موسوم است، برای فیلتر پایین‌گذر شکل (۹-۱) با مقادیر داده شده سلف و خازن به ازای مقادیر مقاومت $R: ۷\ K\Omega$ ، $۳\ K\Omega$ ، $۱K\Omega$ ، $۰\ K\Omega$، رسم کرده و منحنی‌ها را توجیه کنید. منحنی‌های مربوط به مقاومتهای $۷\ K\Omega$ ، $۳\ K\Omega$ ، $۱K\Omega$ را روی یک نمودار و منحنی مربوط به مقاومت $۰\ K\Omega$ را به طور مجزا در نمودار دیگری رسم نمایید. در کدام حالت ماکزیمم تقویت‌کنندگی ولتاژ دیده می‌شود ؟

۸- در مدار RLC سری شکل (۹-۱۴) به جای ورودی موج سینوسی، یک موج مربعی با مقدار ولتاژ دامنه ۲ ولت و فرکانسی برابر فرکانس تشدید مدار به مدار اعمال کرده و شکل موج خروجی از دو سر مقاومت را به کمک نرم افزار ترسیم کنید.

۹- توضیح دهید در مدار RLC موازی در فرکانس تشدید دقیقاً چه اتفاقی می‌افتد؟

۱۰-تحت چه شرایطی مدار RLC موازی در حالت تشدید مانند تقویت‌کننده جریان عمل می‌کند؟ محاسبات ذکر شود.

۱۱-سه روش آزمایشگاهی برای اندازه‌گیری Q در مدار RLC موازی پیشنهاد کنید (در هر روش مشخص کنید که خروجی از دو سر کدام عنصر مدار گرفته شده است).

۱۲-فرکانس تشدید و ضریب کیفیت Q را برای مدار RLC موازی به ازای $C=۳/۳\ nF$ و $L=۱۸\ mH$ و مقاومت $۷\ K\Omega$ محاسبه کنید.

۱۳-با توجه به مدار شکل (۹-۱۳) و مقادیر $R=۱۰\ K\Omega$ و $R_S=۳/۳\ K\Omega$، برای مقادیر سلف $۱۸\ mH, ۲۲\ mH$ مقدار خازن C و فرکانس لازم برای تطبیق را حساب کنید.

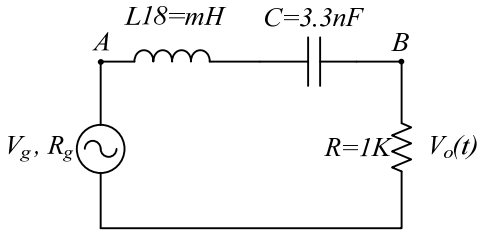
۱۴-با توجه به سؤال قبل و شکل (۹-۱۳)، نمودار ولتاژ دو سر مقاومت بار $R=۱۰\ K\Omega$ و ولتاژ V_{AB} (دو سر نقاط A،B) را در حوزه فرکانس برای سلف $۱۸\ mH, ۲۲\ mH$ به کمک نرم افزار رسم کرده و شکل موج‌ها را توجیه کنید (۴ شکل موج). فرکانس تطبیق امپدانس را روی هر ۴ شکل موج مشخص کنید.

شرح آزمایش

الف) پاسخ فرکانسی مدار *RLC* سری : ولتاژ دو سر مقاومت به عنوان خروجی

الف-۱) بررسی مدار تشدید

مداری مطابق شکل زیر با مشخصات ذکر شده ساخته و یک موج سینوسی با مقدار دامنه ۲ ولت به آن اعمال کنید (از پتانسیومتر ۱۰۰۰× به جای مقاومت R استفاده کنید).



شکل(۹-۱۴)

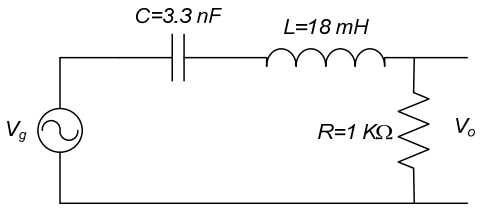
۱- حال فرکانس منبع را تغییر دهید تا جریان مدار ماکزیمم شود. در این حالت (تشدید)، مدار مقاومتی بوده و اگر سلف L ایده‌آل باشد ولتاژ دو سر AB صفر خواهد شد. اما چون در عمل سلف ایده آل نیست ماکزیمم جریان با می‌نیمم شدن ولتاژ دو سر AB حاصل می‌شود. در این حالت فرکانس تشدید، f_s، با ماکزیمم شدن V_R نیز بدست می‌آید. فرکانس تشدید را با اسکوپ اندازه‌گیری کرده و یادداشت کنید سپس با تغییر فرکانس عملکرد فیلتری مدار را بررسی کرده و نتیجه را یادداشت کنید.

۲- در این قسمت یک موج سینوسی با مقدار ولتاژ دامنه ۲ ولت و فرکانسی برابر فرکانس تشدید به مدار اعمال نموده و مدار را به حالت تشدید قرار می‌دهیم. اکنون کلید وضعیت نوسان‌ساز را از وضعیت سینوسی به مربعی تغییر داده و موج ورودی و خروجی را رسم کنید و علت آنکه موج خروجی به شکل سینوسی در می‌آید را تشریح کنید.

۳- در همان وضعیت بخش ۲ مقاومت را تغییر می دهیم. با افزایش مقاومت شکل موج سینوسی خروجی چه تغییری می‌کند. دلیلش را توضیح دهید.

الف-۲) اثر تغییر مقاومت مدار بر روی Q_s

از مدار بخش ۱ استفاده کنید و یک موج سینوسی با مقدار دامنه ۲ ولت به آن اعمال نمایید.

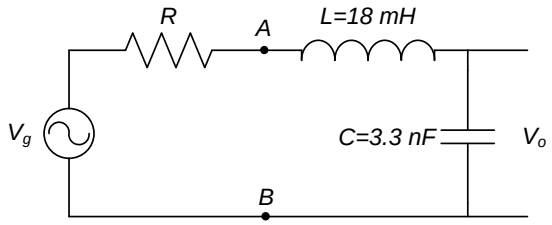


شکل(۹-۱۵)

۱- با توجه به رابطه تقریبی $Q_S \approx \frac{\omega_\circ}{BW} = \frac{f_\circ}{f_۲ - f_۱}$ و به ازای $R = ۱\ K\Omega$ و $R = ۳\ K\Omega$ مقادیر $(f_۲ - f_۱)$ و $f_\circ$ را اندازه گرفته و برای هر کدام مقدار Q_S را محاسبه کنید، سپس آن را با مقدار تئوری مقایسه کنید.
$f_\circ$ فرکانس تشدید و $(f_۲ - f_۱)$ پهنای باند مدار می‌باشد.

ب) پاسخ فرکانسی مدار *RLC* سری : ولتاژ دو سر خازن به عنوان خروجی

مدار شکل زیر را ببندید. دامنه ولتاژ موج سینوسی ورودی را روی ۱ ولت تنظیم کنید.



شکل(۹-۱۶)

۲- ابتدا به ازای $R = ۷\ K\Omega$ با تغییر فرکانس نوع فیلتر را مشخص کنید.

نکته :

a – اگر $R^۲ > \frac{۲L}{C}$ باشد : ۱) اندازه دامنه ولتاژ Vc در فرکانسی غیر از فرکانس صفر مقدار ماکزیمم ندارد، ۲) $Q_S <۱$ ، در نتیجه مدار به صورت تقویت‌کننده ولتاژ عمل نمی‌کند.

b – اگر $\frac{۲L}{C} > R^۲ > \frac{L}{C}$ باشد : ۱) اندازه دامنه ولتاژ Vc در فرکانسی غیر از فرکانس صفر مقدار ماکزیمم دارد، ۲) $Q_S <۱$ ، در نتیجه مدار در محدوده خاصی از فرکانس که شامل فرکانس تشدید نمی‌شود تقویت‌کنندگی ضعیف ولتاژ خواهد داشت.

c – اگر $R^2 < \frac{L}{C}$ باشد: ۱) اندازه دامنه ولتاژ Vc در فرکانسی غیر از فرکانس صفر مقدار ماکـــزیمم دارد. ۲) $Q_S > 1$ ، در نتیجه در فرکانس تشدید هم، مدار به صورت تقویت‌کننده ولتاژ عمل می‌کند. به ازای R های خیلی کوچک فرکانس ماکزیمم شدن دامنه Vc و فرکانس تشدید مدار بر هم منطبق می‌شود و بیشترین تقویت‌کنندگی ولتاژ نیز در همین حالت و در دو سر خازن یا سلف اتفاق می‌افتد.

نتیجه اینکه در صورت صفر شدن مقاومت مدار، ولتاژ خازن (یا سلف) بیشترین میزان تقویت را نسبت به ولتاژ ورودی خواهد داشت . در حقیقت ماکزیمم اندازه دامنه ولتاژ Vc در فرکانس تشدید اتفاق می‌افتد.

۳- جدول زیر را کامل کنید و سپس مقادیر اندازه‌گیری شده را با هم مقایسه کرده و درستی نکته‌های بیان شده در بخش ۲ را تحقیق نمایید.

نکته: همانطور که می‌دانید اندازه‌گیری فرکانس تشدید به کمک ولتاژ دو سر خازن ممکن نیست، مگر به ازای مقاومت صفر که ولتاژ خازن در آن حالت ماکسیمم می‌شود. این به آن علت است که در غیر این حالت، در فرکانس تشدید برای ولتاژ دو سر خازن اتفاق خاصی نمی‌افتد تا نشانه‌ای از قرارگیری مدار در فرکانس تشدید باشد. به همین دلیل برای تکمیل ستون فرکانس تشدید در جدول زیر، راحت‌ترین راه این است که ولتاژ V_{AB} را بررسی کنید و به کمک آن فرکانس تشدید مدار را به ازای هر مقدار مقاومت اندازه بگیرید.

مقادیر مقاومت	فرکانس تشدید	دامنه ولتاژ خازن در فرکانس تشدید	فرکانس ماکزیمم شدن دامنه ولتاژ خازن	دامنه ولتاژ خازن در فرکانس ماکزیمم
۷ $K\Omega$				
۳ $K\Omega$				
۱ $K\Omega$				
۰ Ω				

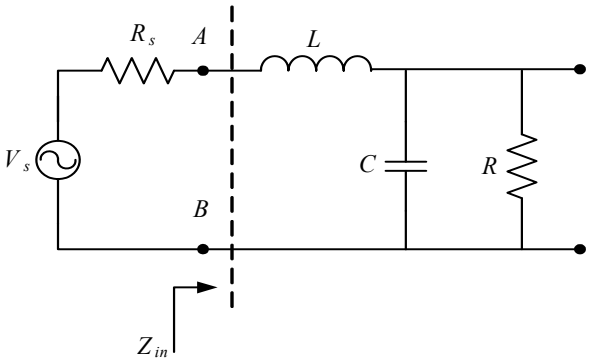
۴- آیا فرکانس تشدید مدار به مقدار مقاومت وابسته است؟ چرا؟

۵- ماکزیمم تقویت‌کنندگی ولتاژ به ازای چه مقاومتی اتفاق می‌افتد؟ ضریب کیفیت فیلتر را برای هر یک از مقاومت‌های مورد آزمایش، با استفاده از داده‌های جدول بالا و نیز به کمک تئوری محاسبه کرده و با هم مقایسه کنید. (چگونگی محاسبه ضریب کیفیت از هر دو روش تئوری و عملی ذکر گردد.)

ج) تطبیق امپدانسی

۱- مدار شکل زیر را ببندید. می‌خواهیم توان ماکزیمم به مقاومت $R=۱۰\ K\Omega$ انتقال یابد. $R_S=۳/۳\ K\Omega$ و سلف موجود $L=۱۸mH$ و دامنه ولتاژ $V_S=۲V$ است. مقدار خازن را محاسبه کرده و سپس نزدیکترین مقدار خازن موجود به مقدار محاسبه شده را در مدار قرار داده و فرکانس تطبیق را اندازه‌گیری کنید.

در فرکانس تطبیق، ماکزیمم ولتاژ به R منتقل می‌شود و ولتاژ AB نصف ولتاژ V_S خواهد بود. فرکانس تطبیق را هم از طریق ولتاژ دو سر R و هم از طریق ولتاژ AB اندازه بگیرید. آیا هر دو فرکانس بدست آمده یکی هستند؟ در صورت اختلاف علت آن را بیان کنید.



شکل (۹-۱۷)

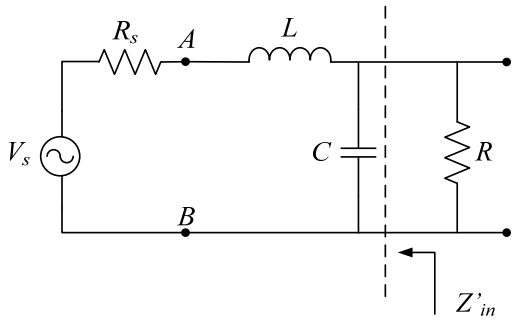
۲- در گزارش کار درصد خطای فرکانس تطبیق اندازه‌گیری شده نسبت به مقدار تئوری را حساب کرده و علت آن را توضیح دهید (درصد خطا برای هر دو فرکانس به دست آمده محاسبه شده و با هم مقایسه گردد).

۳- به ازای فرکانس‌های مختلف به تعداد نقاط دلخواه دو سمت فرکانس f_m (فرکانس ماکسیمم شدن ولتاژ دو سر R) در جدول زیر، ولتاژ خروجی (دو سر R) را ثبت کنید. به کمک داده‌های جدول، نمودار مربوط به آن را رسم کرده و آن را توجیه کنید.

$f\ (kHz)$	۰,۱				f_m				۲۰۰
$V_{o_{p-p}}\ (V)$									

۴- برای قسمت ۳ ماکسیمم توانی که به بار می‌رسد را یک بار بدون مدار تطبیق و بار دیگر با مدار تطبیق (با دامنه ولتاژ $V_S=۲V$) اندازه‌گیری و مقایسه نمایید.

۵- با توجه به شکل زیر، رابطه‌ای برای L, C بر حسب R_S و R بدست آورید به طوریکه داشته باشیم: $Z'_{in} = \overline{R}$. نتیجه را با روابط $\frac{L}{C} = \alpha R^2$, $C^2\omega^2 = \frac{1-\alpha}{\alpha} \cdot \frac{1}{R^2}$ مربوط به شکل (۹-۱۷) مقایسه کنید. آیا شرط $Z'_{in} = \overline{R}$ باعث انتقال توان ماکزیمم به بار R می‌شود؟



شکل (۹-۱۸)

۶- در حالتی که مقاومت بار کمتر از مقاومت منبع باشد چگونه باید تطبیق را انجام داد؟

آزمایش ۱۰

تایمر ۵۵۵

هدف از این آزمایش آشنایی با نحوه عملکرد مداری تایمر ۵۵۵ می‌باشد.

مقدمات

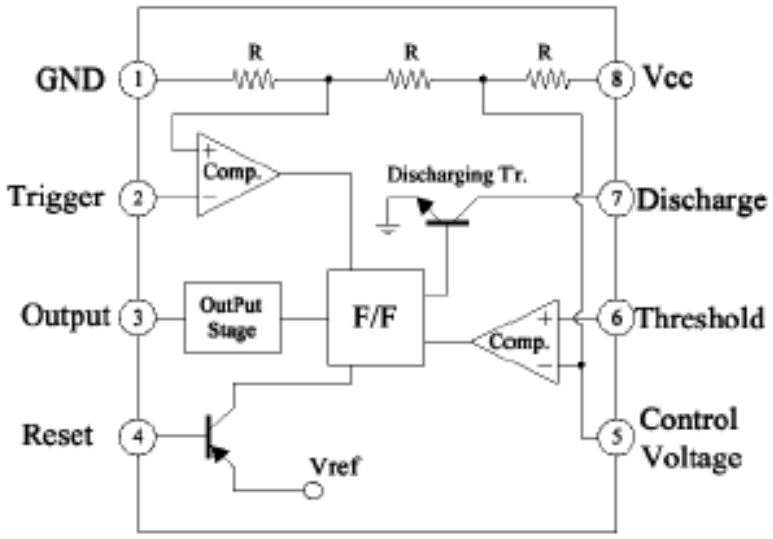
✓ عملکرد تایمر ۵۵۵

آی‌سی ۵۵۵ به آی‌سی تایمر نیز معروف است (شکل (۱۰-۱)) و انواع تایمرها و نوسان‌سازها را می‌توان به وسیله آن تحقق بخشید. مدار موجود به صورت نوسان‌ساز کار می‌کند وبا توجه به مقادیر Cو R فرکانس نوسان را می‌توان تعیین کرد، بدین ترتیب که مدت زمان یک یا صفربودن پالسهای خروجی این آی سی با یک خازن تعیین می‌شود که همان مدت زمان شارژ و دشارژ شدن خازن توسط یک مقاومت است. با در اختیار داشتن مقادیر ظرفیت خازن و اندازه مقاومت، این زمانها را می‌توان با دقت زیاد محاسبه کرد.

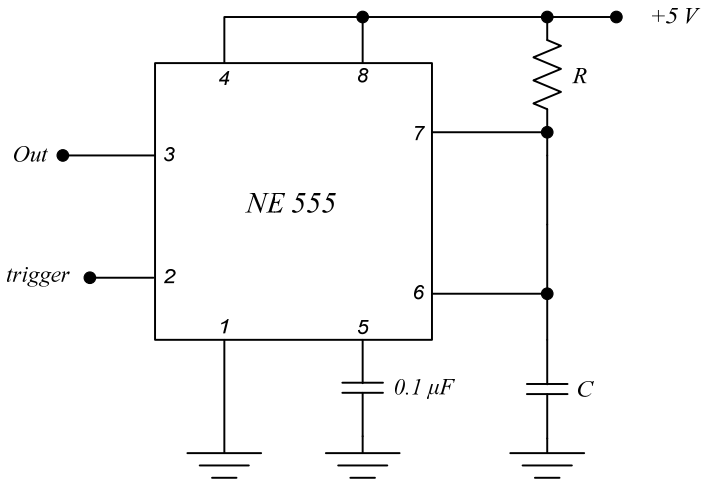
عملکرد *Astable*:

عملکرد *AstableTim er* بااضافه کردن مقاومت R_bبه شکل (۱۰-۲) وایجاد ترکیب شکل (۱۰-۳) بدست می‌آید.در یک عملکرد *Astable*، ترمینال *trigger* و ترمینال *threshold* برای تشکیل یک $self-trigger$ متصل شده‌اند که به عنوان یک نوسانگر چندگانه عمل می‌کند. زمانیکه خروجی تایمر *high* است، دشارژ ورودی T_r خاموش شده و V_{C_1} با یک تابع نمایی با ثابت زمانی $(R_A+R_B)C$ افزایش پیدا می‌کند.

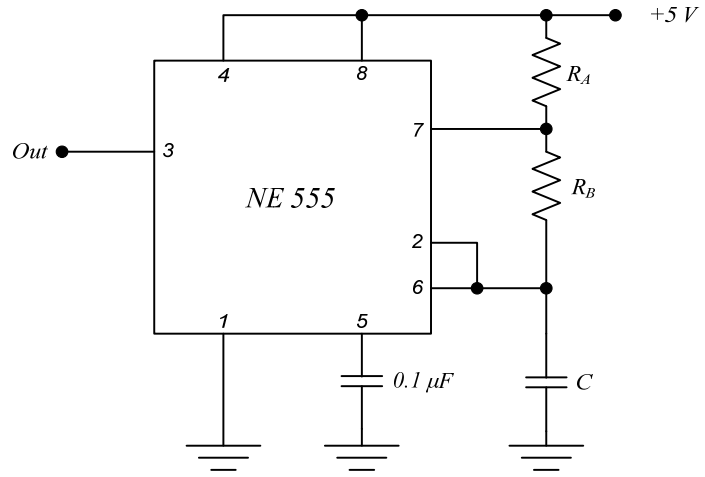
زمانیکه V_{C_1} یا ولتاژ *threshold* به $\frac{2V_{CC}}{3}$ می‌رسد، خروجی *comparator* در ترمینال *threshold*، *high* می‌شود، F/F ، *reset* شده و باعث می‌شود که خروجی *timer*، *low* شود. به نوبت، دشارژ T_r روشن شده و C_1 از طریق کانال دشارژ ایجاد شده بوسیله R_Bودشارژ T_r تخلیه می‌شود. زمانیکه V_{C_1} کمتر از $\frac{V_{CC}}{3}$ می‌شود، خروجی *comparator* در ترمینال *trigger*، *high* شده و خروجی *timer* دوباره *high* می‌شود؛ دشارژ T_r خاموش شده و V_{C_1}دوباره افزایش می‌یابد.



شکل (۱۰-۱)

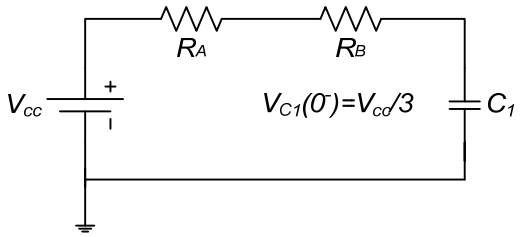


شکل (۱۰-۲)



شکل (۱۰-۳)

درپروسه بالا، بخشی که خروجی *timer*،*high* است، زمانی است که V_{C_1}از $\frac{V_{CC}}{3}$ به $\frac{2V_{CC}}{3}$ می‌رسد و بخشی که خروجی *timer*، *low* است، زمانی است که V_{C1}از $\frac{2V_{CC}}{3}$ به $\frac{V_{CC}}{3}$ افت می‌کند.زمانیکه خروجی *timer*،*high* است، مدار معادل شارژ خازن C_1 به صورت زیر است:



شکل (۱۰-۴)

$$C_1 \frac{dVc_1}{dt} = \frac{Vcc - V(0^-)}{R_A + R_B} \qquad (1)$$

$$Vc_1(0^+) = \frac{Vcc}{3} \qquad (2)$$

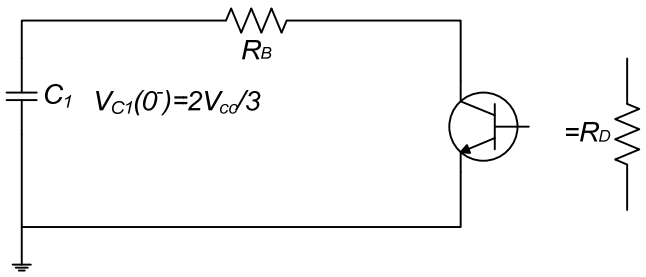
$$Vc_1(t) = Vcc[1 - \frac{2}{3} e^{-(\frac{t}{(R_A+R_B)C_1})}] \quad (3)$$

پس مدت زمانی که خروجی *timer* در حالت *high* است، (t_H)،برابر مقدار زمانی می‌باشد که V_{C_1} به $\frac{2V_{CC}}{3}$ می رسد.

$$Vc_1(t) = \frac{2}{3}Vcc = Vcc[1 - \frac{2}{3} e^{-(\frac{t_H}{(R_A+R_B)C_1})}] \quad (4)$$

$$t_H = C_1(R_A + R_B)Ln2 = 0/693(R_A + R_B)C_1 \qquad (5)$$

مدار معادل دشارژ خازن C_1 ، وقتی که خروجی *timer*، *low* است به صورت زیر می‌باشد:



شکل (۱۰-۵)

$$C_1 \frac{dVc_1}{dt} + \frac{1}{R_D + R_B} Vc_1 = 0 \qquad (6)$$

$$Vc_1(t) = \frac{2}{3} Vcc\, e^{-\frac{t}{(R_D+R_B)C_1}} \qquad (7)$$

پس مدت زمانی که خروجی *timer*،در حالت *low* قرار دارد (t_L) برابر مقدار زمانی می‌باشد که V_{C_1}به $\frac{V_{CC}}{3}$ می رسد.

$$\frac{1}{3}Vcc = \frac{2}{3}Vcc(e^{-\frac{t_L}{(R_D+R_B)C_1}}) \qquad (8)$$

$$t_L = C_1(R_D + R_B)Ln2 = 0/693(R_D + R_B)C_1 \qquad (9)$$

بطور نرمال $R_B >> R_D$ ، اگرچه به مقدار دشارژ T_r بستگی دارد $(R_D \approx 0)$

$$t_L = 0/693 R_B C_1 \qquad (10)$$

در نتیجه اگر *timer* درحالت *Astable* کارکند، دورهٔ تناوب به صورت مشابه است.

$$T = t_H + t_L = 0/693(R_A + R_B)C_1 + 0/693 R_B C_1 = 0/693(R_A + 2R_B)C_1$$

دوره تناوب مجموع زمان شارژ و دشارژ است و فرکانس عکس دوره تناوب می‌باشد.

$$\text{فرکانس} \Rightarrow f = \frac{1}{T} = \frac{1/44}{(R_A + 2R_B)C_1}$$

خودآزمایی

۷- برای مدار شکل (۱۰-۳) درحالت *Astable* با شرایط پالس ۱/۳۸۶ *ms* و*duty cycle* برابر ٪۷۵ مقادیر R_A و R_B و C را محاسبه نمایید. (*duty cycle* نسبت t_H به T می‌باشد)

۸- برای تغییر مقادیر R_A و R_B و C چه کاری می‌توان انجام داد؟

الف) برای *duty cycle* = ٪۵۰ و فرکانس *KHz* ۱ مدار را طراحی کنید.

ب) برای *duty cycle* = ٪۲۵ و فرکانس *KHz* ۱ مدار را طراحی کنید.

ج) در صورتیکه موارد الف و ب جواب قابل استفاده‌ای نداشته باشد ، مقدار*duty cycle* را طوری تغییر دهید تا جواب قابل قبول بدست آورید.

۹- درصورت افزایش مقدار V_{CC} در شکل موج خروجی چه تغییری حاصل می‌شود؟

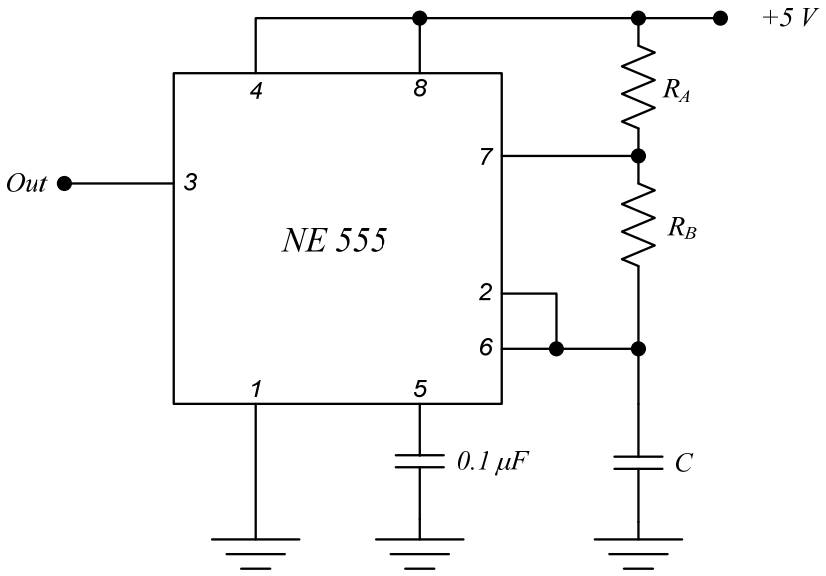
۱۰-مقادیر R_A و R_B و C را برای موجی با پریود ۱ ثانیه طراحی کنید.

۱۱-به کمک نرم افزار شکل موج پایه های ۶، ۷ و ۳ را در شکل (۱۰-۳) رسم نمایید.

شرح آزمایش

✓ عملکرد تایمر ۵۵۵

۱۲-مدار شکل زیر را درحالت *Astable* با شرایط پالس ۱/۳۸۶ *ms* ؛ *duty cycle* برابر ٪۷۵ و قراردادن $R_A = ۱\ K\Omega$ و $R_B = ۵۰۰\ \Omega$ و C برابر ۱ میکروفاراد ببندید.



شکل (۱۰-۶)

سپس به وسیله اسیلوسکوپ شکل موج ولتاژ ورودی و خروجی و ولتاژ دوسر خازن را اندازه‌گیری و رسم نمایید. پریود شکل موج خروجی و مقدار *duty cycle* را محاسبه کرده و با اندازه تئوریک آن مقایسه نمایید.

۱۳-آزمایش بالا را با $R_A = ۴/۷\ K\Omega$ و $R_B = ۲۲\ K\Omega$ و C برابر ۱ میکروفاراد دوباره انجام داده و شکل موج ولتاژ ورودی و خروجی و ولتاژ دو سر خازن را اندازه‌گیری و رسم نمایید. پریود شکل موج خروجی و مقدار *duty cycle* را محاسبه کرده و با اندازه تئوریک آن مقایسه نمایید.

آزمایش ۱۱

مدارهای سه‌فاز

هدف از این آزمایش آشنایی با مدارهای سه‌فاز می‌باشد که در صنعت از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار می‌باشند. در این آزمایش با دو ساختار متفاوت مدارهای سه‌فاز یعنی ستاره و مثلث آشنا می‌شوید. ولتاژ، جریان و توان خط و فاز را اندازه گرفته و روابط آنها را بدست می‌آورید. در نهایت اهمیت سیم نول و مدارهای متعادل و نامتعادل را بررسی خواهید کرد.

مقدمات

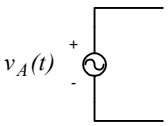
✓ مروری بر مدارهای سه‌فاز

تقریباً تمام تولید انرژی وانتقال قدرت در دنیا به صورت سه‌فاز صورت می گیرد. یک سیستم قدرت سه‌فاز از مولدهای سه‌فاز، خطوط انتقال سه‌فاز و بار سه‌فاز تشکیل شده است. سیستم قدرت سه‌فاز بر سیستم قدرت تکفاز مزیت بزرگی دارد و آن این است که قدرت مخصوص (قدرت بر واحد وزن فلز) ماشین سه‌فاز بیشتر بوده، و همچنین قدرت تحویلی به بار سه‌فاز بر حسب زمان ثابت است در حالی که در سیستم تکفاز این قدرت ضربانی است. استفاده از موتورهای القایی سه‌فاز نیز به خاطر سادگی راه اندازی بر موتورهای تکفاز ترجیح دارد.

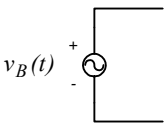
۱- تولید ولتاژها و جریانهای سه‌فاز

یک مولد سه‌فاز تشکیل شده است از سه مولد تکفاز که ولتاژ هر کدام از نظر مقداری مساوی بوده ونسبت به هم ۱۲۰° اختلاف فاز دارند. این سه مولد می‌توانند به سه بار مشابه توسط یک جفت سیم وصل شوند که مدار حاصل طبق شکل (۱۱-۱) خواهد بود. چنین سیستمی مدار سه‌فاز خواهد بود که نسبت به یکدیگر ۱۲۰° اختلاف فاز دارند. جریان عبوری از هر بار از معادله زیر بدست می آید:

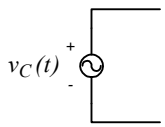
$$I = \frac{V}{Z}$$



$$v_A(t) = \sqrt{۲}\,V.\sin \omega t \;\; V$$
$$V_A = V \angle ۰^\circ \; V$$

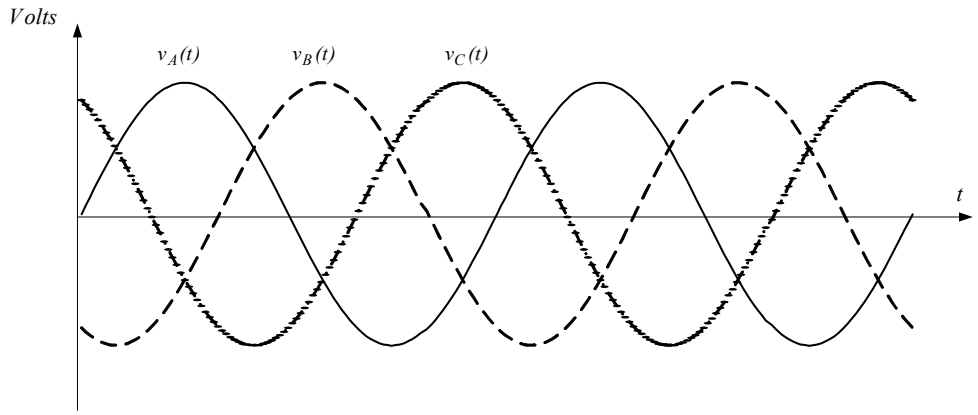


$$v_B(t) = \sqrt{۲}\,V.\sin(\omega t - ۱۲۰^\circ) \; V$$
$$V_B = V \angle -۱۲۰^\circ \; V$$



$$v_C(t) = \sqrt{۲}\,V.\sin(\omega t - ۲۴۰^\circ) \; V$$
$$V_C = V \angle -۲۴۰^\circ \; V$$

شکل(۱۱-۱) الف



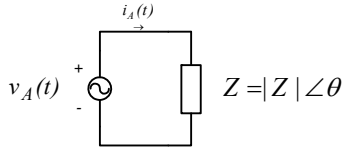
شکل(۱۱-۱) ب

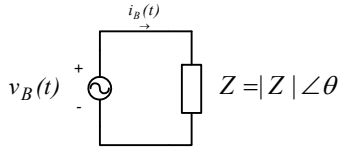
بنابراین جریانهای عبوری از سه‌فاز عبارتند از:

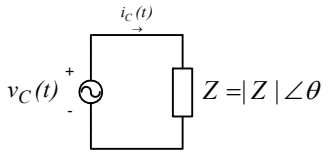
$$I_A = \frac{V\angle 0^\circ}{Z\angle\theta} = I\angle -\theta$$

$$I_B = \frac{V\angle -۱۲۰^\circ}{Z\angle\theta} = I\angle -۱۲۰^\circ -\theta$$

$$I_c = \frac{V\angle -۲۴۰^\circ}{Z\angle\theta} = I\angle -۲۴۰^\circ -\theta$$





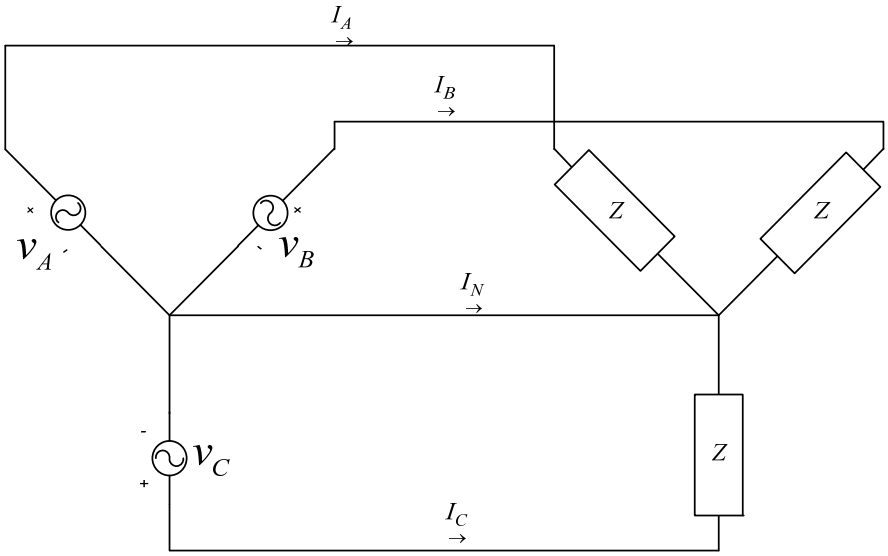


شکل(۱۱-۱) ج

نتیجه می‌شود که سه تا از شش سیم نشان داده شده این سیستم لازم نیست. فرض کنید سر منفی هر مولد به بار وصل شده باشد؛ در این حالت سه سیم برگشت را می‌توان با یک سیم (که سیم خنثی نام دارد)

جایگزین کرده و جریانها همچنان می‌توانند از بارها به مولدها برگردند. جریان برگشت طبق شکل (۱۱-۲) مجموع جریانهای هر فاز سیستم خواهد بود که این جریان برابر است با:

$$
\begin{aligned}
I_N &= I_A + I_B + I_C \\
&= I\angle -\theta + I\angle -\theta - ۱۲۰^\circ + I\angle -\theta - ۲۴۰^\circ \\
&= I\cos(-\theta) + jI\sin(-\theta) \\
&\quad + I\cos(-\theta - ۱۲۰^\circ) + jI\sin(-\theta - ۱۲۰^\circ) \\
&\quad + I\cos(-\theta - ۲۴۰^\circ) + jI\sin(-\theta - ۲۴۰^\circ) \\
&= I[\cos(-\theta) + \cos(-\theta - ۱۲۰^\circ) + \cos(-\theta - ۲۴۰^\circ)] \\
&\quad + jI[\sin(-\theta) + \sin(-\theta - ۱۲۰^\circ) + \sin(-\theta - ۲۴۰^\circ)]
\end{aligned}
$$



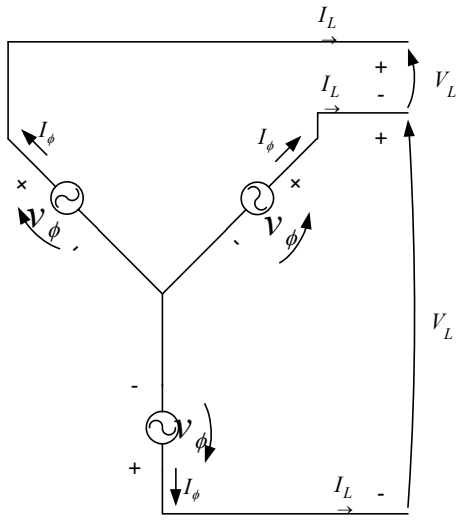
شکل (۱۱-۲)

از بسط رابطه فوق داریم:

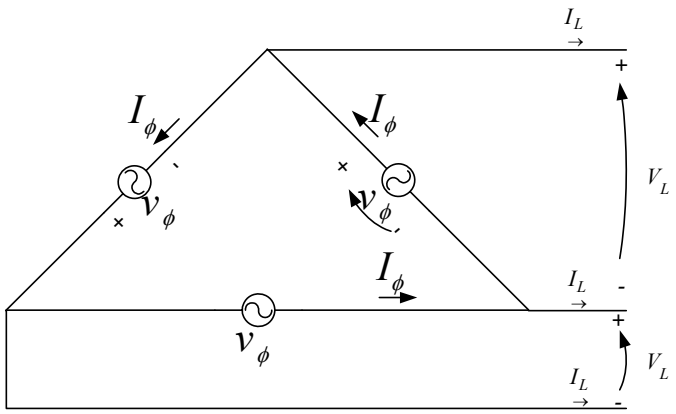
$$
\begin{aligned}
I_N &= I[\cos(-\theta) + \cos(-\theta)\cos(۱۲۰^\circ) + \sin(-\theta)\sin(۱۲۰^\circ) + \cos(-\theta)\cos(۲۴۰^\circ) + \sin(-\theta)\sin(۲۴۰^\circ)] \\
&\quad + jI[\sin(-\theta) + \sin(-\theta)\cos(۱۲۰^\circ) - \cos(-\theta)\sin(۱۲۰^\circ) + \sin(-\theta)\cos(۲۴۰^\circ) - \cos(-\theta)\sin(۲۴۰^\circ)] \\
&= I[\cos(-\theta) - \frac{۱}{۲}\cos(-\theta) + \frac{\sqrt{۳}}{۲}\sin(-\theta) - \frac{۱}{۲}\cos(-\theta) - \frac{\sqrt{۳}}{۲}\sin(-\theta)] \\
&\quad + jI[\sin(-\theta) - \frac{۱}{۲}\sin(-\theta) - \frac{\sqrt{۳}}{۲}\cos(-\theta) - \frac{۱}{۲}\sin(-\theta) + \frac{\sqrt{۳}}{۲}\sin(-\theta)] \\
&= ۰\ A
\end{aligned}
$$

تا مادامی که سه جریان بار مساوی باشند، جریان برگشت در خط خنثی صفر است. سیستم قدرتی که در آن سه مولد ولتاژهای مساوی با اختلاف فاز ۱۲۰° داشته باشد و بارها مقدار مساوی و زاویه مساوی داشته باشند سیستم قدرت سه‌فاز متعادل خوانده می‌شود. در چنین سیستمی خط خنثی دیگر لازم نیست.

اتصال شکل (۱۱-۳) الف اتصال ستاره Y است و اتصال شکل (۱۱-۳) ب اتصال مثلث Δ است.



شکل (۱۱-۳) الف



شکل (۱۱-۳) ب

۲- ولتاژ ها و جریان ها در یک مدار سه‌فاز

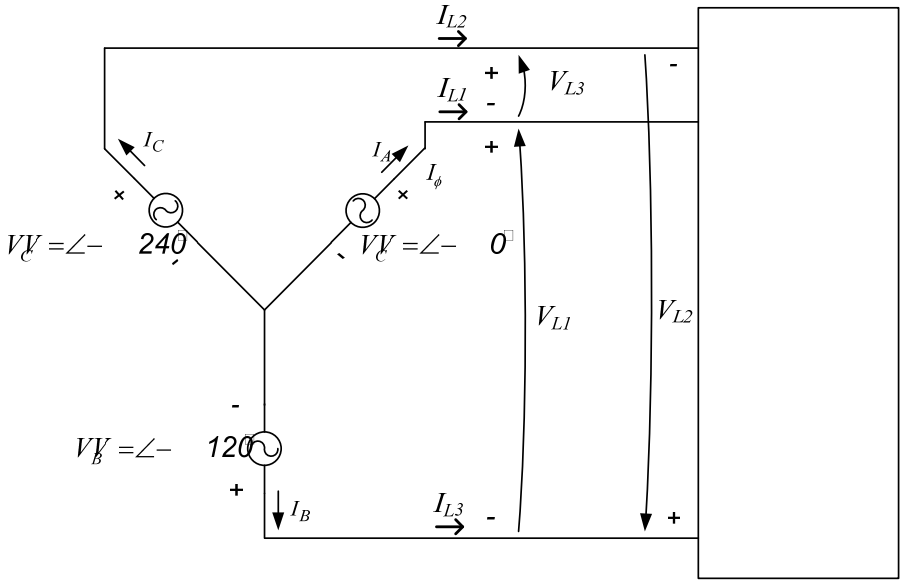
هر مولد و هر بار در سیستم قدرت سه‌فاز می‌تواند به صورت ستاره یا مثلث وصل شود. در یک سیستم قدرت سه‌فاز تعدادی مولد و بار با اتصال ستاره یا مثلث می‌تواند وجود داشته باشد.

شکل (۱۱-۴) مولد سه‌فاز را با اتصال ستاره نشان می‌دهد. ولتاژها وجریانها در یک فاز معین را کمیات فازی (با اندیس ϕ) می نامند و ولتاژها وجریانهای خطوط وصل به مولدها کمیات خط (با اندیس L) نامیده می‌شوند. رابطه بین کمیات خطی و فازی برای یک مولد یا بار بستگی به نوع اتصال دارد.

اتصال ستاره Y :

یک مولد با اتصال ستاره که به بار مقاومتی وصل شده در شکل (۱۱-۴) نشان داده شده است. ولتاژهای فازی در این مولد عبارتند از:

$$V_A = V\angle ۰^\circ$$
$$V_B = V\angle -۱۲۰^\circ$$
$$V_C = V\angle -۲۴۰^\circ$$



شکل (۱۱-۴)

چون بار متصل به این مولد اهمی است جریان در فاز با ولتاژ همفاز است. بنابراین جریان در فاز برابر است با:

$$I_A = I\angle ۰^\circ$$
$$I_B = I\angle -۱۲۰^\circ$$
$$I_C = I\angle -۲۴۰^\circ$$

از شکل (۱۱-۵) واضح است که جریان در هر خط معادل جریان در فاز متناظر است.

در اتصال ستاره:

$$I_L = I_\phi \quad Y \text{ اتصال}$$

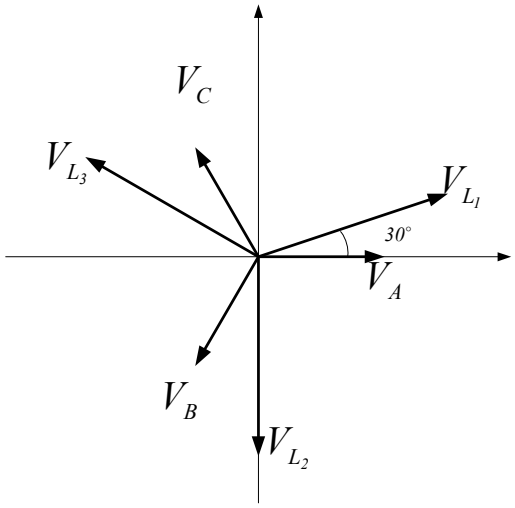
رابطه بین ولتاژ خطی وفازی با اعمال قانون حلقه بدست می آید.

$$V_{L_۱} = V_A - V_B$$
$$= V\angle ۰^\circ - V\angle -۱۲۰^\circ$$
$$= V - (-\frac{۱}{۲}V - j\frac{\sqrt{۳}}{۲}V)$$
$$= \frac{۳}{۲}V + j\frac{\sqrt{۳}}{۲}V$$
$$= \sqrt{۳}V(\frac{\sqrt{۳}}{۲} + j\frac{۱}{۲})$$
$$= \sqrt{۳}V_\phi\angle ۳۰^\circ$$

لذا رابطه بین مقدار ولتاژ خطی و فازی در مولد یا بار با اتصال ستاره چنین است:

$$V_L = \sqrt{۳}\, V_\phi \qquad Y \text{ اتصال}$$

بعلاوه ولتاژهای خطی نسبت به ولتاژهای ۳۰° اختلاف فاز دارند. ولتاژهای خطی و فازی در اتصال ستاره در شکل (۱۱-۵) نشان داده شده‌اند.



شکل (۱۱-۵)

اتصال مثلث Δ :

مولد سه‌فاز با اتصال مثلث که به بار اهمی وصل شده در شکل (۱۱-۶) نشان داده شده است. ولتاژهای فاز در این مولد برابرند با:

$$V_A = V\angle ۰^\circ$$
$$V_B = V\angle -۱۲۰^\circ$$
$$V_C = V\angle -۲۴۰^\circ$$

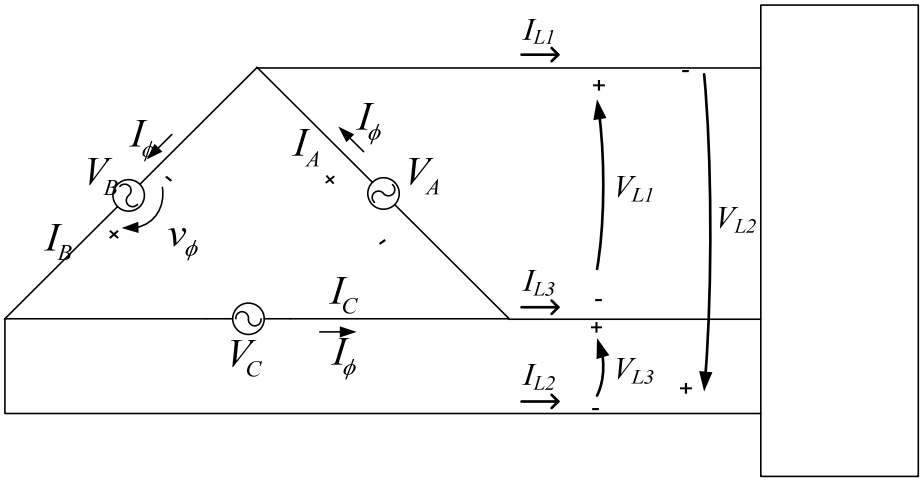
بعلت اینکه بار اهمی است جریانهای فاز عبارتند از:

$$I_A = I\angle ۰^\circ$$
$$I_B = I\angle -۱۲۰^\circ$$

در اتصال مثلث واضح است که ولتاژهای هر خط با ولتاژ فاز متناظر مساوی است.

در اتصال مثلث:

$$V_L = V_\phi \qquad \Delta \text{ اتصال}$$



شکل (۱۱-۶)

رابطه بین جریان خط و جریان فاز با استفاده از قانون گره در گره‌های مثلث بدست می‌آید:

$$I_{L1} = I_A - I_B$$
$$= I\angle 0^\circ - I\angle -120^\circ$$
$$= I - (-\frac{1}{2}I - j\frac{\sqrt{3}}{2}I)$$
$$= \frac{3}{2}I + j\frac{\sqrt{3}}{2}I$$
$$= \sqrt{3}I(\frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2})$$
$$= \sqrt{3}I_\phi\angle 30^\circ$$

بنابراین رابطه بین مقدار جریان خط و فاز در مولد یا بار اتصال ستاره ای چنین است:

$$I_L = \sqrt{3}I_\phi \quad \Delta \text{ اتصال}$$

و جریان خط نسبت به جریان فاز متناظر ۳۰° اختلاف فاز دارد.

اگر چه رابطه بین ولتاژها وجریانهای فاز و خط برای اتصالات ستاره و مثلث برای ضریب توان واحد استخراج گردید ولی برای هر ضریب توان دیگری نیز برقرارند. فرض ضریب توان واحد محاسبات را قدری ساده‌تر کرده است.

خودآزمایی

۱- اتصال ستاره و مثلث را با هم مقایسه نمایید.

۲- یک مدار سه‌فاز با بار ستاره متعادل را به کمک شبیه سازی کنید.

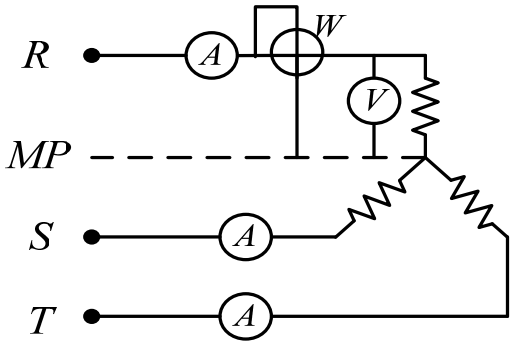
۳- یکی از فازها را در سؤال ۲ قطع کرده و ولتاژ و جریان فازها را در حالت بدون سیم نول و با سیم نول به کمک تحلیل نمایید.

شرح آزمایش

۱- مداری مطابق شکل زیر ببندید. در این مدار به جای مقاومتها از لامپهای رشته‌ای استفاده کنید. در هنگام بستن مدار تنظیم رنج ولتمتر، آمپرمترها و واتمتر را به دقت انجام دهید تا آسیبی به دستگاههای اندازه‌گیری نرسد.

الف- مقادیر جریان و ولتاژ و توان تکفاز را اندازه‌گیری نمایید (حالت متعادل) سپس یک فاز را قطع نموده و مقادیر جریان و ولتاژ و توان را اندازه گیری نمایید.

ب- از طریق محاسبه، مقدار ولتاژ نقطه خنثی جابجا شده را بدست آورده و با مقداری که از راه آزمایش بدست آمده مقایسه کنید و در مورد نتایج آزمایش بحث کنید.

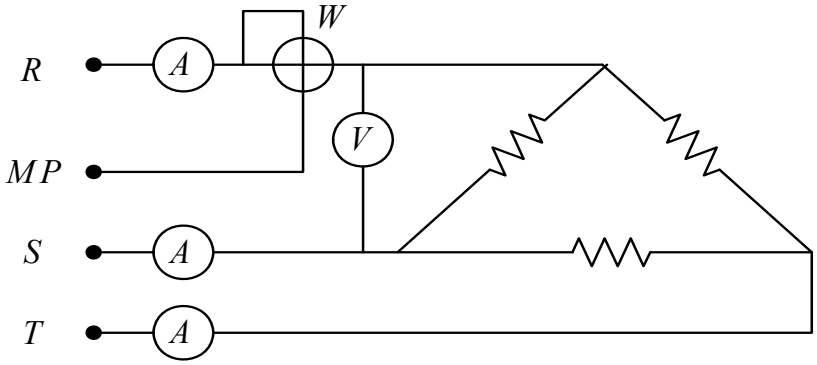


شکل (۱۱-۷)

۲- مداری مطابق شکل زیر ببندید. در این مدار چون ولتاژ خط به مقاومتها اعمال می‌شود از دو عدد لامپ سری به جای هر مقاومت استفاده شود. به دلیل تغییر مقادیر ولتاژها و جریانها، تنظیم رنج دستگاههای اندازه‌گیری مجدداً باید انجام شود.

الف- مقادیر جریان و ولتاژ و توان را اندازه‌گیری نمایید (اتصال متعادل). سپس به ترتیب یکی از فازها را قطع نموده و مقادیر جریان و ولتاژ و توان را اندازه گیری نمائید.

ب- مقدارتوان را از طریق محاسبه بدست آورده و با مقداری که از راه آزمایش بدست آمده مقایسه کنید و در مورد نتایج آزمایش بحث کنید.



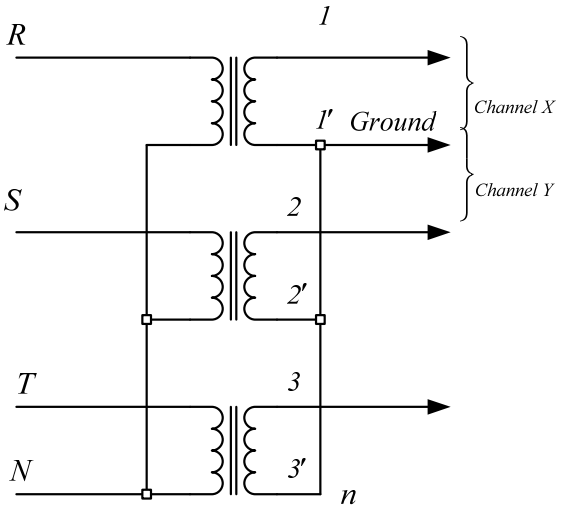
شکل (۱۱-۸)

۳- مداری مطابق شکل زیر ببندید.

الف - با استفاده از ولتمتر، ac سه ولتاژ خط و فاز را اندازه بگیرید.

ب- نقطه $1'$ و $2'$ را به زمین اسکوپ وصل کنید و نقاط ۱ و ۲ را به کانال‌های X و Y وصل نمایید. حال اختلاف فاز بین این دو ولتاژ را ببینید.

ج - به جای نقاط ۲ – $2'$ نقاط ۳ – $3'$ را انتخاب کنید و اختلاف فاز بین دو ولتاژ $2'$و $3'$ را ببینید.



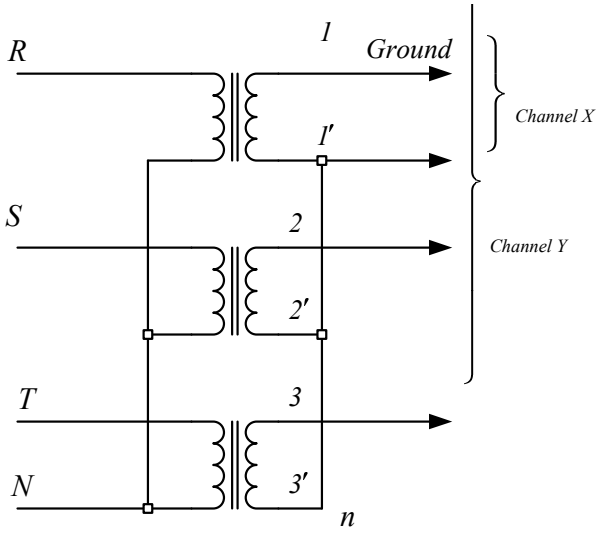
شکل (۱۱-۹)

۴- مداری مطابق شکل زیر ببندید.

الف - با استفاده از ولتمتر، ac سه ولتاژ خط و فاز را اندازه بگیرید.

ب- نقطه ۱ را به زمین اسکوپ وصل کنید و نقاط $1'$ و ۳ را به کانال های X و Y وصل نمایید. حال اختلاف فاز بین این دو ولتاژ را ببینید.

ج - این کار را برای ترکیب سه تایی از نقاط دیگر تکرار کنید.



شکل (۱۱-۱۰)