



## مقررات آزمایشگاه

### جلوگیری از حوادث

- دانستن قوانین آزمایشگاه و اقدامات ایمنی برای کلیه دانشجویان ضروری است.
- 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 برق گرفتگی 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 آزمایشگاه دکمه اضطراری را فشار دهید.

### نحوه انجام آزمایش

- نحوه شرکت دانشجویان در آزمایشها به صورت گروهی می باشد. هر گروه موظف است قوانین آزمایشگاه را به طور دقیق اجرا نماید.
- وسایل مورد احتیاج برای هر آزمایش در روی میزهای کار قرار داده شده است و دانشجویان می توانند با استفاده از شمای داده شده برای هر آزمایش مدار مورد نظر را ببینند.
- 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 نموده و از فهم مطالب آن مطمئن گردد. قبل از هر آزمایش و در ضمن آزمایش از دانشجویان سؤالاتی خواهد شد.

### کلیاتی در مورد پیش گزارش و گزارش کار

- فایل *pdf* دستور کار آزمایشگاه از آدرس زیر قابل دریافت است:  
<http://ece.ut.ac.ir/classpages/circuitlab>
- پیش گزارش مربوط به هر آزمایش به صورت انفرادی توسط هر دانشجو تهیه می گردد که شامل پاسخ به سؤالات و شبیه سازی با نرم افزار *Spice* می باشد و دانشجو موظف است پیش گزارش خود را قبل از شروع آزمایش به مسئول آزمایشگاه تحویل دهد.
- نمره پیش گزارشها و گزارشهای مشابه تقسیم خواهد شد.
- گزارش کار به صورت گروهی انجام می شود و حداکثر یک هفته بعد از انجام آزمایش باید تحویل داده شود در غیر این صورت به آن ترتیب اثر داده نخواهد شد.
- نتایج مربوط به اسپایس را در فرمت موجود در سایت آزمایشگاه قرار دهید.



- در برگه اول گزارشهای تحویلی اطلاعات زیر حتما "قید گردد:

\*نوع گزارشی که تحویل داده اید: گزارش کار- پیش گزارش

\*کد ۳ بخشی به صورت زیر:

|                      |       |                      |       |                      |
|----------------------|-------|----------------------|-------|----------------------|
| <input type="text"/> | ----- | <input type="text"/> | ----- | <input type="text"/> |
|----------------------|-------|----------------------|-------|----------------------|

شماره آزمایش      نام گروه      شماره section

به عنوان مثال: 01-A-4

\*نام گروه: بر اساس گروه ثبت نام شده در جلسه گروه بندی به صورت A,B,C, ... می باشد..

\*نام اعضای گروه به طور کامل در گزارش کار و نام فرد در پیش گزارش ذکر شود.

\*گزارش هایی که فاقد مشخصات ذکر شده باشد، تصحیح نمی گردند.



## فهرست مطالب

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| مقدمه.....                            | ۱  |
| ۱ آشنایی با اسیلوسکوپ.....            | ۱۲ |
| ۲ آشنایی با مولتی مترهای دیجیتال..... | ۲۴ |
| ۳ مدارهای مقاومتی.....                | ۳۰ |
| ۴ تقویت کننده های عملیاتی.....        | ۳۷ |
| ۵ پاسخ زمانی مدارهای مرتبه اول.....   | ۴۳ |
| ۶ پاسخ زمانی مدارهای مرتبه دوم.....   | ۴۷ |
| ۷ مدارهای غیرخطی.....                 | ۵۶ |
| ۸ پاسخ فرکانسی مدارهای مرتبه اول..... | ۶۰ |
| ۹ پاسخ فرکانسی مدارهای مرتبه دوم..... | ۷۳ |
| ۱۰ تطبیق امپدانس و تایمر ۵۵۵.....     | ۸۷ |
| ۱۱ مدارهای سه فاز.....                | ۹۸ |

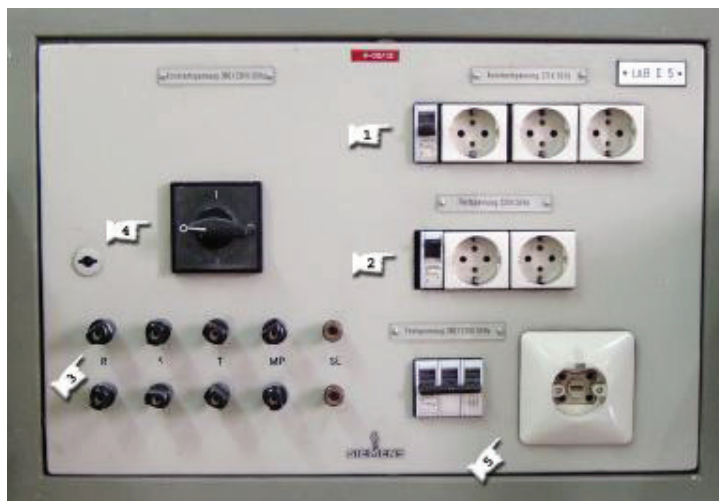


# مقدمه



## 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 کاملاً 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 خروجی های 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 تماماً 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.

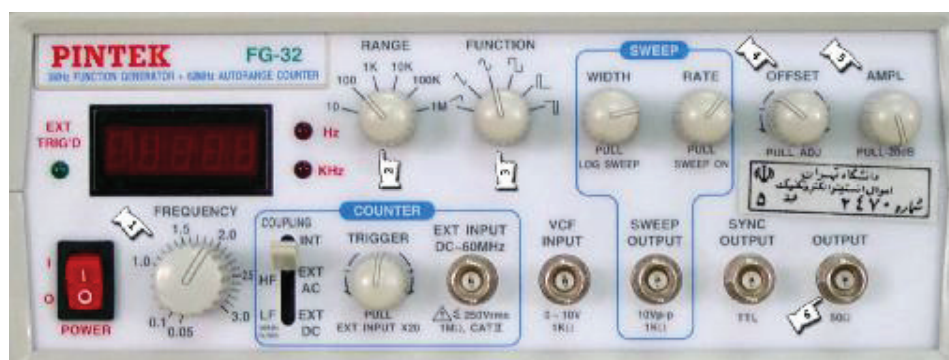
\*زمانی که هر دو دکمه داخل باشند، منابع جریان موازی می‌شوند و حداکثر تا ۶ آمپر جریان می‌دهند.

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 می شود این رنگها بدین ترتیبند:

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

رنگ آخر که معمولاً طلایی یا نقره‌ای است تolerانس یا درصد خطای مقاومت را مشخص می کند. بدین صورت 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٪ می باشد. برای خواندن مقدار مقاومت با چهار باند رنگی، مقدار اولین و دومین رنگ را نوشته و به ازای رنگ سوم به همان تعداد صفر می گذاریم، مثلاً:



$$5600 \Omega = 5.6 K\Omega (\pm 5\%)$$



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:

$$1 \quad 1/2 \quad 1/5 \quad 1/8 \quad 2/2 \quad 2/7 \quad 3/3 \quad 4/7 \quad 5/6 \quad 6/8 \quad 8/2$$

و کلیه مضارب اعشاری آنها، مثلاً مقاومت‌های  $2/7 K\Omega$ ،  $270 \Omega$ ،  $27 \Omega$ ،  $2/7 \Omega$  و ... موجود هستند ولی فرضاً مقاومت معمولی  $30 \Omega$  در بازار یافت نمی شود 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 را تحلیل کنید و جوابش را بدست آورید.

توجه به حداکثر توانی که مقاومت می تواند تلف کند نیز مهم است معمولاً مقاومت‌های کوچکی که در آزمایشگاه بکار می روند 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 تolerانس مقاومت خواهد بود.

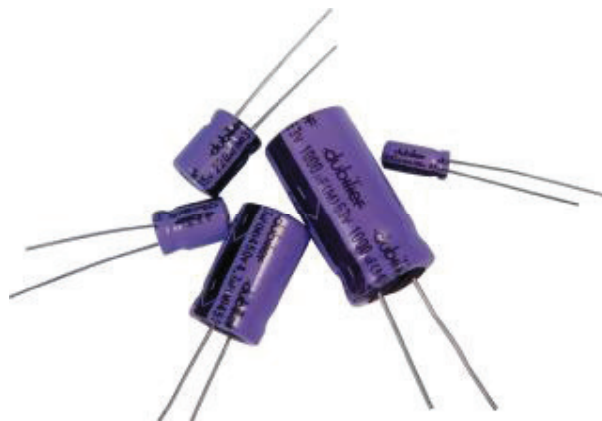




### ✓ خازنهای الکترولیتی (شیمیایی)

این خازن‌ها برای ظرفیتهای زیاد بیشتر از  $1\ \mu F$  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 و خازن 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  $16\ V$  و  $1000\ \mu F$  می‌تواند حداکثر تا  $16\ V$  ولت را تحمل کند و بکارگیری آن در کمتر از این ولتاژ نیز مجاز است. نشی 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  $1\ \mu F$  ساخته می‌شوند و برای فرکانس‌های زیاد 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  $154$  یعنی  $15000\ pF$  که معادل  $15\ nF$  است یا مثلاً  $104$  یعنی  $100\ nF$  یا  $1\ \mu F$ .

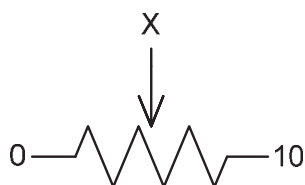


شکل (۷): خازن سرامیکی از نوع عدسی



### ✓ پتانسیومترها

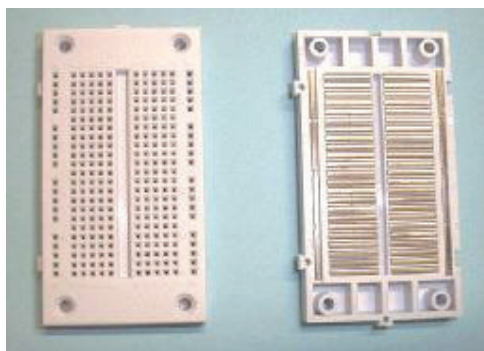
پتانسیومترها مقاومت‌های متغیری هستند که دارای سه پایانه می‌باشند. معمولاً از پتانسیومترها برای تغییر ولتاژ در مدار به طور مثال برای تغییر بلندی صدا (ولوم) در یک سیستم آمپلی فایر استفاده می‌شود. بسته به نوع نیاز، دو سر یا هر سه سر این عنصر می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. یک نمونه از پتانسیومترهای مورد استفاده در آزمایشگاهها مقاومت‌های ده دهی هستند (شکل (۶)). در این نوع مقاومت‌ها، یک سلکتور وجود دارد. در زیر سلکتور عددی نوشته شده است که نشان دهنده اسکیل مقاومت است؛ به طور مثال اگر سلکتور عدد ۴ را نشان دهد و اسکیل زیر آن  $1000 \times$  باشد آنگاه مقدار مقاومت بین سرهای ۰ و X برابر  $4 K\Omega = 4 \times 1000$  و مقدار مقاومت بین سرهای X و ۱۰ برابر  $6 K\Omega = 6 \times 1000$  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 با PSpice


در این بخش مختصری از مهمترین نکات در طراحی و شبیه سازی مدارهای الکتریکی توسط محیط نرم‌افزاری PSpice بیان شده و این امکان فراهم می‌شود تا قبل از اجرای عملی هر آزمایش و بعد از مطالعه گزارش کار با طراحی و پیاده سازی مدار توسط محیط PSpice مفاهیم مورد نظر در هر آزمایش را درک و تحلیل نمایید.

### PSpice چیست؟

Simulation Program for Integrated Circuits Emphasis یا بطور خلاصه SPICE نرم‌افزاری قدرتمند برای شبیه سازی مدارهای مختلف آنالوگ و دیجیتال می‌باشد. ویرایش‌های مختلف این نرم‌افزار ابزار مناسبی در اختیار مهندسين برق امروزی است. دو نسخه معروف آن شامل PSpice کاری از شرکت MICROSIM و HSPICE کاری از شرکت AVANT می‌باشند و به ترتیب برای کارهای آموزشی-پژوهشی و کارهای صنعتی کاربرد روزافزونی پیدا کرده‌اند.

نرم‌افزار Spice محیطی است که امکان طراحی و شبیه سازی مدارهای الکتریکی را توسط کامپیوتر فراهم می‌کند. دو نسخه اجرایی برای این نرم‌افزار ارائه شده است که شامل نسخه ویندوز و نسخه یونیکس می‌باشد. نسخه یونیکس که اطلاعات مدار را از طریق فایل‌های متنی دریافت می‌کند مورد نظر این بخش نبوده و بر روی عملکرد نسخه تحت ویندوز تأکید می‌شود. مدارهای شبیه‌سازی شده می‌توانند به فایل‌های word و یا پرینتر منتقل شده و یا توسط ماحول Probe تحلیل و شکل موجها ترسیم شوند.


### آماده سازی شماتیک برای طراحی مدار

برای ایجاد شماتیک جدید یا از طریق منوی File نرم‌افزار عمل کرده و یا بر روی نماد  کلیک کنید. برای باز کردن شماتیک ذخیره شده از طریق منوی File اقدام نمایید. لازم به ذکر است که فایل‌های شماتیک دارای پسوند sch می‌باشند.

### انتقال شماتیک به فایل WORD

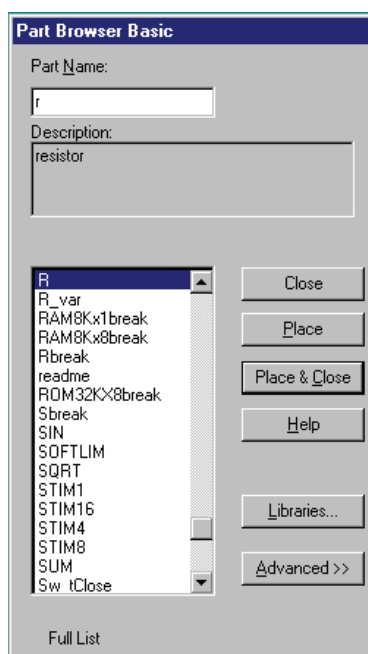
برای انتقال مدارهای طراحی شده در شماتیک به محیط‌های نرم‌افزاری دیگر شامل word از منوی File بر روی گزینه Copy to clipboard کلیک نماید. به این ترتیب با Paste کردن محتویات حافظه می‌توانید محتوای فایل شماتیک را به محیط دیگری منتقل نمایید.

### 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 یا بر روی نماد  کلیک کنید و یا با فشردن Cntrl+G این کار را انجام دهید. همچنین می‌توانید از منوی




نرم افزار در بخش *Draw->Place part* اقدام کنید. در ادامه پنجره زیر باز می شود:



با کلیک کردن بر روی دگمه *Libraries* می توانید اطلاعات کتابخانه ای محصولات کمپانی های مختلف را به لیست قابل انتخاب فعلی اضافه کنید. پس از انتخاب هر المان با کلیک چپ ماوس می توانید به تعداد نامحدود از هر انتخاب را در بخشهای مختلف مدار و صفحه شماتیک قرار دهید. با کلیک راست ماوس انتخاب و تکثیر المان از بین می رود.

- برای دوران دادن هر المان در صفحه جاری با انتخاب آن المان و فشردن کلیدهای *Cntrl+R* می توانید این کار را انجام دهید.
- برای آینه کردن المان و یا بخشهایی از مدار نیز با انتخاب آنها و فشردن *Cntrl+F* می توانید این کار را انجام دهید.
- حذف کردن هر المان با فشردن کلید *delete* بعد از انتخاب المان انجام می پذیرد.
- برای انتخاب منبع ولتاژ ثابت می توانید از دو المان *Vdc* و *Vsrc* استفاده نمایید.
- برای منابع جریان و یا ولتاژ وابسته از *E*، *F*، *G* و *H* استفاده می شود که به ترتیب منبع ولتاژ وابسته به ولتاژ، منبع جریان وابسته به جریان، منبع جریان وابسته به ولتاژ و منبع ولتاژ وابسته به جریان می باشند.
- منبع ورودی پله ای با عنوان *Vpulse* معرفی می شود.



برای برقراری اتصالات بین اجزای مختلف مدار یا بر روی نماد  کلیک کنید و یا در منوی نرم افزار گزینه *Draw->Wire* را انتخاب کنید. برای حذف یک اتصال پس از کلیک چپ بر روی کلید *delete* در صفحه کلید کلیک کنید.

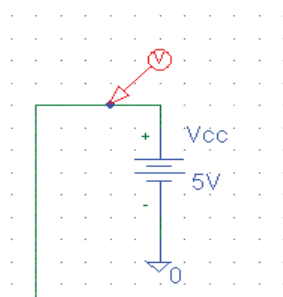


برای تغییر نام، مقدار و یا پارامترهای هر المان باید بر روی هر یک از موارد ذکر شده دوبار کلیک ماوس کنید. به این ترتیب می‌توانید نام، مقدار و پارامترهای مدار را تغییر دهید. در محیط *SPICE* مخففهای زیر از پیش تعریف شده‌اند:

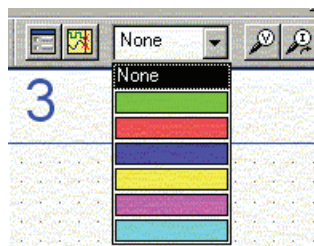
|         |          |          |         |
|---------|----------|----------|---------|
| P: پیکو | N: نانو  | U: میکرو | M: میلی |
| K: کیلو | MEG: مگا | G: گیگا  |         |


### تحلیل مدارهای طراحی شده

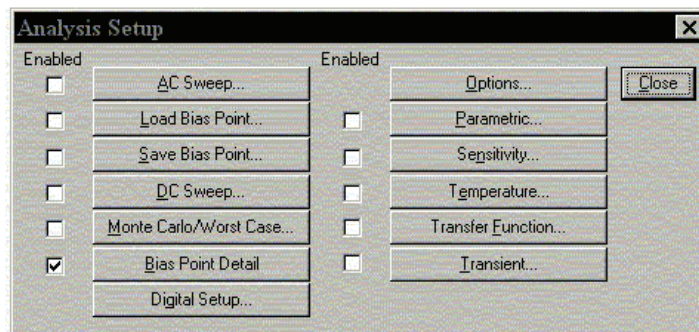
در تحلیل مدارهای طراحی شده نخست گره‌هایی از مدار را که برایتان دارای اهمیت است نام و یا علامت گذاری کنید. با دوبار کلیک بر روی هر گره می‌توانید برای آن گره نامی اختیار کنید. از نماد  و یا  نیز برای علامت گذاری گره‌ها به منظور اندازه‌گیری ولتاژ و یا جریان می‌توانید استفاده کنید.




شما می‌توانید از علامتهای پیچیده‌تری نیز برای علامتگذاری استفاده کنید که برای این منظور در منوی نرم‌افزار گزینه *Mark Advanced -> Markers* را انتخاب کنید. با این انتخاب گزینه‌های خاصی برای انتخاب نوع علامتگذاری ارائه می‌شود. شما می‌توانید رنگ هر پروب و یا علامت را پس از نصب با انتخاب هر یک و از طریق منوی بالای صفحه به شکل زیر تغییر دهید:




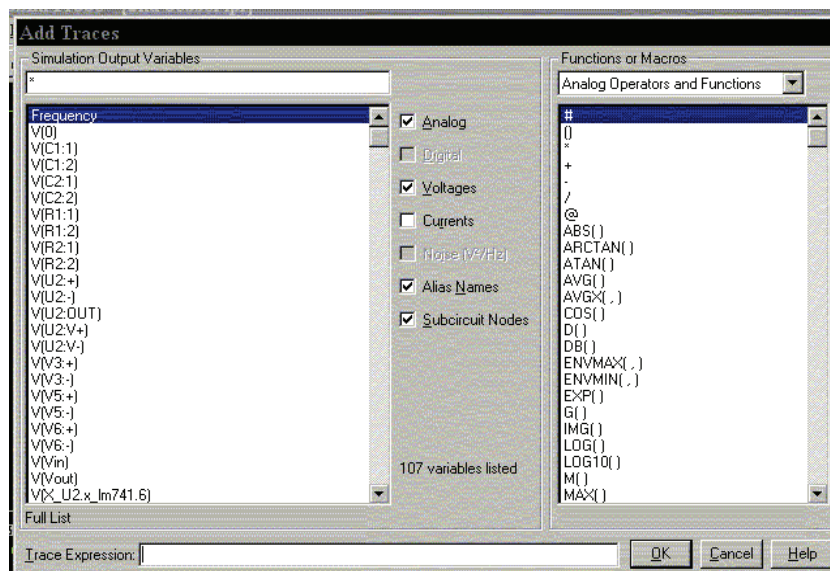
برای تحلیل مدار در بخش تنظیمات و راه‌اندازی مدار حتما موارد زیر را تنظیم و رعایت فرمایید. در ابتدا با انتخاب نماد  و یا گزینه *Setup -> Analysis* در منوی نرم‌افزار صفحه زیر را مشاهده خواهید کرد:



برای تحلیل پاسخ گذرای مدار بر روی *Transient* کلیک کرده و پارامترهای مربوطه را تنظیم می‌کنیم. در تحلیل حالت دائمی و یافتن پاسخ دائمی بر روی *AC Sweep* کلیک کرده و پارامترهای آن را تنظیم می‌کنیم.

با توجه به نوع و شیوه تحلیل مدار می‌توانید پارامترهای اولیه را تنظیم کرده و سپس برای تحلیل نهایی بر روی نماد  و یا گزینه *Simulation -> Analysis* در منوی نرم افزار کلیک کنید. (کلید کمکی *F11* نیز همین کار را انجام می‌دهد)

تحلیل مدار شما برای پروبهای تعیین شده و رنگ های انتخاب شده نمایش داده می‌شود که شما امکان افزودن شکل موجهای جدید را با کلیک بر  و یا انتخاب گزینه *Trace -> Add* دارید. شکل زیر ظاهر می‌شود:



ولتاژ و جریان تمامی نقاط مدار ارائه شده و امکان مشاهده شکل موج به انواع و اقسام فرمت‌های ریاضی مطابق ستون راست وجود دارد.



# 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 و تریگر کردن سیگنال آشنا خواهیم شد.

## مقدمات

### ✓ کاربرد اسیلوسکوپ

اسیلوسکوپ وسیله‌ای برای اندازه‌گیری انواع شکل موجهای ولتاژ می‌باشد.

### ✓ انواع اسیلوسکوپ

- آنالوگ
- دیجیتالی (حافظه‌دار و ...)

### ✓ آشنایی با پانل کنترل اسیلوسکوپ

پانل کنترل انواع اسیلوسکوپها دارای اجزای اصلی زیر می‌باشد که در شکل (۱-۱) نمایش داده شده است. این اجزا را به طور کلی به پنج دسته می‌توان تقسیم نمود.



شکل (۱-۱)

- 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 (CH1)
- د) کلیدهای مربوط به کنترل محور عمودی یا محور سیگنال اعمال شده (CH2)
- ه) کلیدهای مربوط به مدار *triggering*

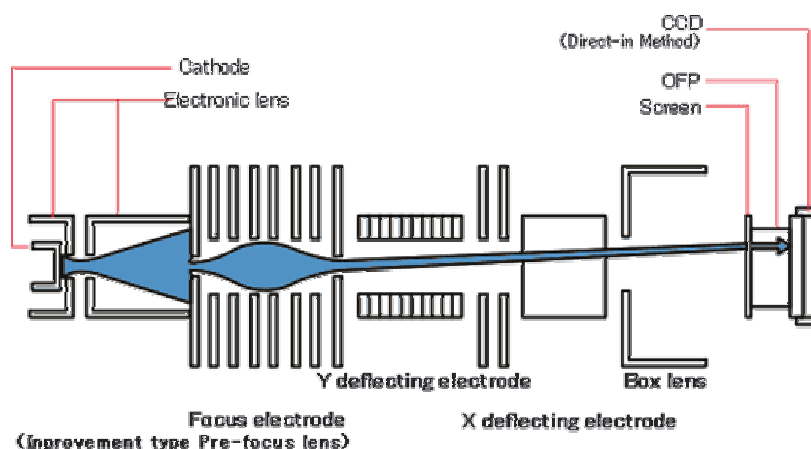




- ۱- درجه تنظیم شدت اشعه تابش (قدرت ابر الکترونی تولید شده)
- ۲- درجه تنظیم وضوح و فوکوس تصویر (تنظیم کلیماتور)
- ۳- ورودی کانال ۱ یا  $X$  (کانال دیگر نیز کاملاً مشخص است)
- ۴- درجه تنظیم وضعیت نمایش موج کانال ۱ به سه حالت مختلف:  
-  $GND$ : برای تنظیم خط زمین کانال  
-  $AC$ : برای حذف مقادیر  $DC$  ورودی و نمایش شکل موج متناوب  
-  $DC$ : برای نمایش شکل موج ورودی با در نظر گرفتن مقادیر  $AC$  و  $DC$
- ۵- درجه تنظیم ولتاژ نمایش یا در حقیقت مقیاس محور  $Y$  ها برای کانال ۱
- ۶- درجه تنظیم موقعیت شکل موج در صفحه نمایش در راستای عمودی (کانال ۱)
- ۷- درجه تنظیم کانال و وضعیت نمایش که دارای ۴ حالت می باشد:  
- انتخاب کانال ۱  
- انتخاب کانال ۲  
- نمایش ترکیبی هر دو کانال  
- شکل موج برآیند دو کانال (حاصل از جمع اسکالر)
- ۸- درجه تنظیم جزئی فرکانس موج جاروب کننده
- ۹- درجه تنظیم موقعیت شکل موج در صفحه نمایش در راستای محور  $X$  ها برای هر دو کانال
- ۱۰- درجه تنظیم فرکانس  $sweep$  و در حقیقت مقیاس محور  $X$  ها برای هر دو کانال

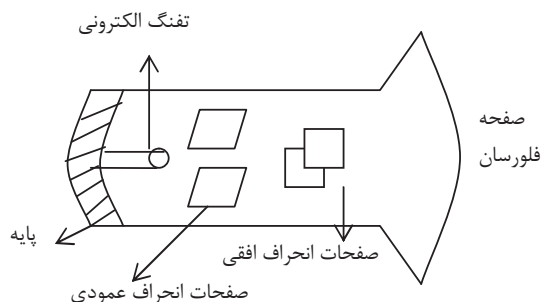
### ✓ آشنایی با مدارات داخلی اسیلوسکوپ و روش کار آن Cathode Ray Oscilloscope(CRO)

قلب اسیلوسکوپ لامپ اشعه کاتدی است که در داخلش اشعه ایجاد می کند و برخورد آن با صفحه فلورسان ایجاد نور می کند. عنصر اصلی اسیلوسکوپ همان لامپ است. قسمت های مهم این لامپ در شکل (۱-۲) نشان داده شده اند.



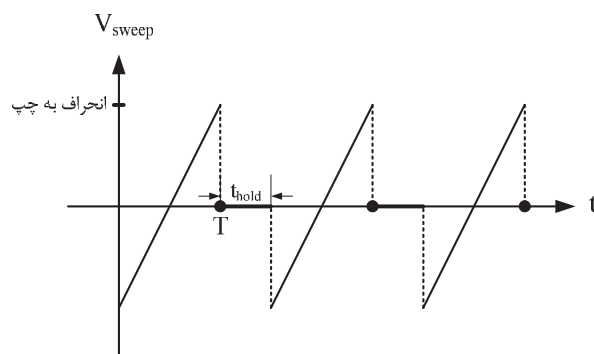
شکل (۱-۲): قسمت های مهم لامپ اشعه کاتدی

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.



شکل (۱-۳): CRT

دو جفت صفحه موازی هم وجود دارند که یک جفت افقی است و یک جفت عمودی. 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 در جهت عمودی و نهایتاً اشعه به صفحه می‌رسد. انحراف از نقطه مرکز به طرف راست یا چپ (افق) با ولتاژ  $V_{sweep}$  انجام می‌شود پس چون این انحراف با زمان متناسب است پس می‌تواند نمایانگر طی شدن زمان باشد در همین حین اشعه از مرکز به سمت بالا یا پائین (عمود) منحرف می‌شود که متناسب با سیگنال ورودی است پس می‌تواند نمایانگر دامنه ورودی باشد.



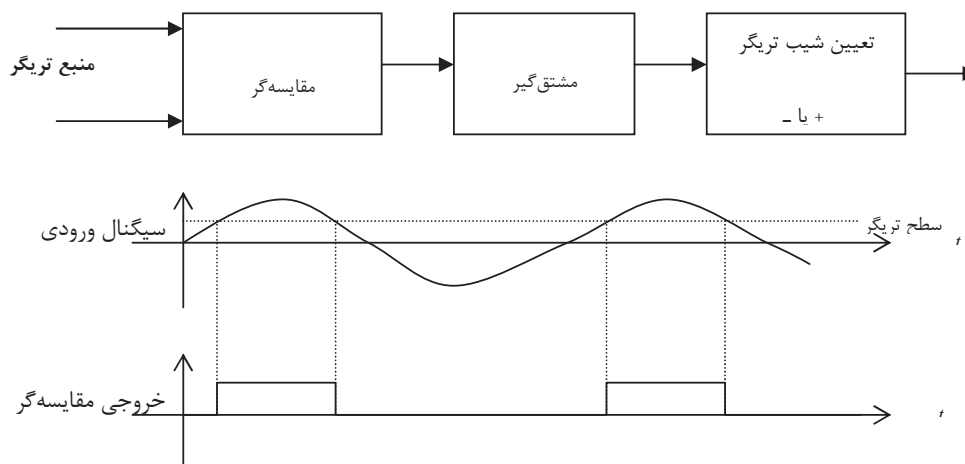
شکل (۱-۴): ولتاژ صفحه افقی

از شکل بالا دیده می‌شود که مدت زمان  $T$  طول می‌کشد تا  $V_{sweep}$  اشعه را از سمت راست به سمت چپ سوئیچ دهد این بدین معنی است که مدت  $T$  از سیگنال ورودی نیز انتخاب می‌شود که اشعه را تماماً 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 می شود.

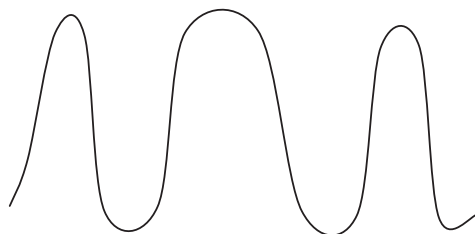


شکل (۱-۵): مدار تریگر

در نمودار آخر می بینیم مدار تریگر در دو نقطه مشابه از سیگنال ورودی به مولد دندانه اره ای دستور می دهد که سوئیچ کند. از مدار اشmitt تریگر برای ورودی هایی که اعوجاج (نویز) دارند استفاده می شود تا مقایسه گر درست تشخیص بدهد.

## مدار Hold-off

اگر شکل موج ورودی پیچیده باشد و بخواهیم مدار تریگر عمل کند در محلهایی تریگر می کند که باعث شود شکل روی صفحه نمایش داده شود مانند شکل زیر.



شکل (۱-۶)

مدار تریگر فقط برای آن قسمت که می خواهیم تریگر می کند و موج را نشان می دهد و بقیه زمانها *off* است.

## مدهای تریگر

*NORM*: آنچه تاکنون گفتیم مد *NORM* است.



**AUTO** : برای سیگنال‌های که در یک مدت از زمان سیگنال به سطح تریگر نرسد آنگاه برای جلوگیری از خاموش شدن اسکوپ با یک  $f = 50\text{ Hz}$  سوئیچ می‌شود.

**TV** : برای سیگنال‌های تلویزیون استفاده می‌شود.

معمولاً سورس تریگر همان سیگنال‌های ورودی است ولی اگر موج ورودی نتواند مولد خوبی ایجاد کند از سورس *external* استفاده می‌کنیم یا می‌توان سورس  $50\text{ Hz}$  *Line* نیز استفاده کرد.

### کوپلاژ تریگر

**dc** : خود سورس تریگر بعنوان ورودی مدار تریگر خواهد بود.

**Ac** : سورس تریگر پس از حذف مولفه *DC* ورودی مدار تریگر خواهد بود.

**HF Rej** : اگر بخواهیم محلهای تریگر از تغییرات سریع سیگنال ایجاد شود.

**LF Rej** : اگر بخواهیم محلهای تریگر از تغییرات کند سیگنال ایجاد شود.

### نمایش دو کانال با هم

#### روش Alt

برای نمایش دو موج فرکانس بالا از روش *Alt* استفاده می‌شود. در این روش برای یک دوره از سوئیچ، کانال (۱) به صفحات عمودی می‌رود و برای دوره بعد سوئیچ، کانال ۲ به صفحات عمودی می‌رود.

#### روش Chop

در فرکانس‌های پایین در طول یک سوئیچ چندین بار بین کانال ۱ و ۲ سوئیچ می‌شود.

#### پرسش

- ۱- برای ولتاژ ورودی زیاد  $mV/div$  را روی کم بگذاریم یا زیاد؟
- ۲- اگر سطح تشخیص در مدار تریگر بالاتر از سیگنال ورودی باشد چیزی در خروجی نمایش نمی‌دهد چرا؟
- ۳- مدار *Hold OFF* چگونه کار می‌کند؟ همراه با شکل سوئیچ بگوئید.
- ۴- چرا روش *Alt* برای فرکانس پائین تار نمایش می‌دهد.
- 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. 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  $\times 10$  مقاومت ورودی پروب زیاد است پس اسکوپ تأثیر کمی بر مدار دارد. بنابراین بهتر است که در اندازه‌گیری‌های فرکانس بالا ویا نقاطی که دارای امپدانس خروجی بزرگی هستند پروب را در حالت  $\times 10$  قرار داد.

### مراحل لازم برای مشاهده شکل موج گره مورد نظر:

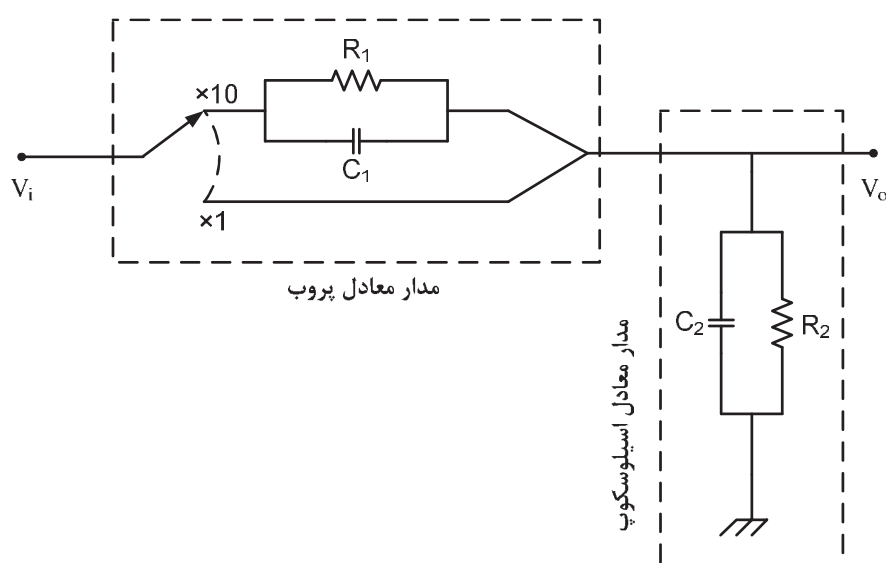
- اتصال زمین اسیلوسکوپ به زمین سیستم
- تنظیم وضوح و شدت اشعه با درجات *Focus* و *Intensity*
- تنظیم خط زمین یا *GND* برای هر دو کانال
- اتصال دقیق پروب به گره مورد نظر
- تغییر وضعیت کلید سه حالتی تنظیم هر کانال از موقعیت *GND* به *AC* یا *DC*
- تنظیم فرکانس *Sweep* و مقدار مقیاس ولتاژ

## پیش‌گزارش

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 برابر ۲۵ 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 دامنه 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 (حالت  $\times 10$ ). برای سیگنالهای ضعیف نیز پروبهای اکتیو وجود دارند که مخصوص 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  $\times 1$ )، در این حالت نیز با قرار دادن یک پروب اکتیو یا پسیو در حالت  $\times 10$  می‌توان مجموع امپدانس ورودی اسیلوسکوپ و پروب را زیاد کرد تا اثر بارگذاری قابل صرف نظر کردن باشد.

هنگامی که پروب در حالت  $\times 10$  قرار دارد دامنه ولتاژ اندازه‌گیری شده در اسیلوسکوپ  $0.1$  مقدار واقعی آن است لذا باید مقدار خوانده شده را در  $10$  ضرب نمود. در حالت  $\times 10$  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 زیر نشان داده شده است.



شکل (۷-۱): مدار معادل‌های پروب و اسیلوسکوپ که با هم سری می‌شوند.



- ۱- ابتدا 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.
- ۲- 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.
- ۳- 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

## ✓ بررسی کالیبره بودن اسیلوسکوپ و صحت پروبها

پروب کانال ۱ اسیلوسکوپ را 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* قرار دهید. 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 ویژه تنظیم پروب، خازن تریمر پروب را مانند شکل (۸-۱) در هر دو جهت تغییر دهید و شکل موجهای مشاهده شده را ترسیم کنید. شکلهای مشاهده شده را با شکل (۹-۱) مقایسه کنید.



شکل (۸-۱): نحوه تنظیم خازن تریمر پروب

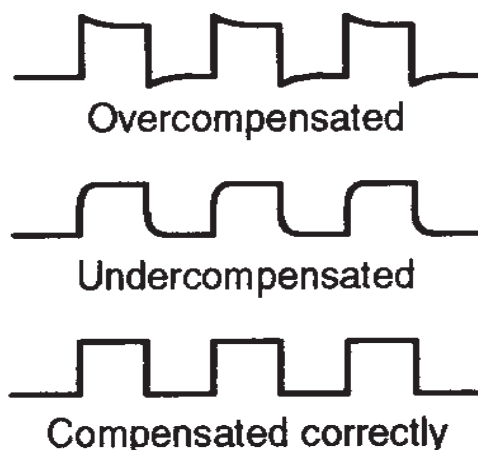
با تنظیم خازن تریمر پروب شکل مربعی را مشاهده کنید در این حالت پروب بصورت صحیح جبران سازی شده است. جهت تنظیم بهتر می توانید تنظیم زمانی (*Time/div*) را کوچکتر کرده تا ابتدای موج را بهتر مشاهده کنید. آیا شکل مشاهده شده مربعی کامل است؟ در مورد این موضوع در گزارش خود بحث کنید. بعد از تنظیم پروب سیگنال مشاهده شده در اسیلوسکوپ را اندازه گیری کنید. آیا مقادیر اندازه گیری شده با مقادیر نوشته شده در کنار کالیبراتور انطباق دارند؟ پرسش: به نظر شما اگر پروبی در اختیار داشته باشید که حالت های  $\times 1$  و  $\times 10$  را داشته باشد تنظیم خازن پروب برای چه حالتی باید انجام شود و چرا؟

پروب کانال ۲ را نیز به کالیبراتور متصل کنید. وضعیت مشاهده سیگنالها را در حالت *ALT* قرار دهید. خازن پروب کانال ۲ را به گونه ای تنظیم کنید که در حالت *undercompensated* قرار داشته باشد. در این حالت





تنظیم پروبها، با کمک سیگنال ژنراتور یک موج سینوسی از فرکانس پایین ۱۰۰ هرتز تا ۱۰۰ کیلو هرتز به هر دو کانال اسیلوسکوپ متصل کنید. دقت کنید در فرکانس پایین باید وضعیت مشاهده سیگنالها را در حالت *CHOP* قرار دهید. همچنین در این آزمایش باید سیگنالهای مشاهده شده در فرکانسهای پایین کاملاً بر هم منطبق باشند. مشاهدات خود را برای فرکانسهای ۱۰۰ هرتز، ۱ کیلو، ۱۰ کیلو و ۱۰۰ کیلو هرتز ترسیم کنید.



شکل (۹-۱): حالت‌های مختلف مشاهده سیگنال مربعی با پروب تنظیم شده و تنظیم نشده

همین آزمایش را برای پروب کانال ۲ که در حالت *overcompensated* قرار داده‌اید تکرار کنید و مشاهدات خود را یادداشت کنید. در مورد این آزمایش بحث کنید و مشاهدات خود را در *Spice* شبیه‌سازی کنید. پروب کانال ۲ را بصورت صحیح تنظیم کنید تا شکل مربعی را مشاهده کنید.

### ✓ تریگر کردن سیگنالها

با کمک سیگنال ژنراتور یک سیگنال سینوسی با دامنه کم و فرکانس تقریبی ۱ کیلو هرتز به کانال ۱ اسیلوسکوپ بدهید. منبع تریگر را کانال ۱ انتخاب کنید. حالت تریگر را *slope+* و *slope-* انتخاب کنید و اثر این انتخاب را ثبت کنید.

تنظیم *Trigger level* را تغییر دهید و مشاهدات خود را یادداشت کنید. در یکی از حالت‌هایی که سیگنال تریگ شده است مقدار سطح تریگر را بدست آورید. تنظیم *Trigger level* را برای وضعیت *Trigger* در حالت‌های *Auto* و *Normal* انجام دهید. آیا تفاوتی بین این دو حالت مشاهده می‌کنید؟ بار دیگر یک سیگنال سینوسی با فرکانس کمتر از ۵ Hz اعمال کنید و وضعیت *Trigger* را در حالت‌های *Auto* و *Normal* مقایسه کنید. مشاهدات خود را یادداشت کنید.

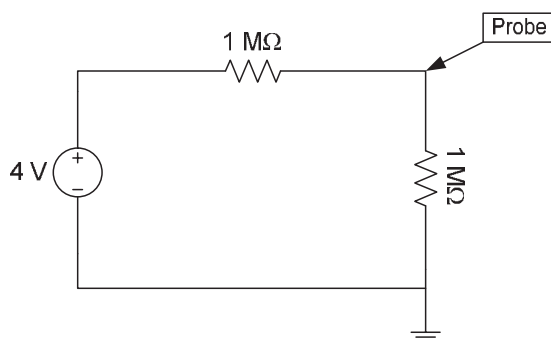


### ✓ اثر اتصال DC و AC

یک سیگنال مربعی با فرکانس پایین به هر دو کانال ۱ و ۲ متصل کنید. وضعیت پروبها را در حالت ۱× قرار دهید. ورودی هر دو کانال را ابتدا در حالت DC قرار دهید. آیا شکل موجهای مشاهده شده برای هر دو کانال یکی هستند؟ ورودی کانال ۲ را در حالت AC قرار دهید. آیا اکنون تفاوتی بین مشاهدات از دو کانال وجود دارد؟ این اختلاف به چه عاملی مربوط می‌شود، بحث کنید.

### ✓ اثر بارگذاری پروبها

مدار زیر را ببندید و دامنه منبع DC را ۴ ولت قرار دهید. مقدار اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت را با اسیلوسکوپ و پروب در حالت ۱× و ۱۰× اندازه بگیرید و مقادیر را با هم و با تئوری مقایسه کنید و علت اختلاف را توضیح دهید.



شکل (۱-۱۰)



## آزمایش ۲

آشنایی با مولتی مترهای دیجیتال



هدف از این آزمایش آشنایی شما با مقدمات استفاده صحیح از مولتی‌مترهای دیجیتال معمولی است. در این آزمایش با نحوه اندازه‌گیری ولتاژ، جریان و مقاومت الکتریکی با استفاده از مولتی‌مترهای دیجیتال آشنا خواهید شد. مقاومت داخلی مولتی‌متر در عملکردها و رنجهای مختلف آن اندازه‌گیری خواهد شد. همچنین بازه فرکانسی قابل قبول برای اندازه‌گیری و خطای مولتی‌متر در فرکانس‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## پیش‌گزارش

نمایش ولتاژ متناوب و یا جریان متناوب در مولتی‌مترهای دیجیتال معمولی همواره بر اساس مقدار مؤثر انجام می‌شود در حالیکه در مولتی‌مترهای دیجیتال ساده، اندازه‌گیری بر اساس قله ولتاژ (جریان) انجام می‌شود. با فرض سینوسی بودن شکل موج ولتاژ، این اندازه‌گیری و نمایش با در نظر گرفتن ضریب  $0.707$  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 غیر سینوسی 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 (شکل (۲-۱)). در اینگونه مولتی‌مترها مقدار دقیق مؤثر نشان داده می‌شود.

۱- برای تمرین، رابطه مقدار مؤثر، مقدار قله و مقدار متوسط (برای مقدار متوسط نیم دوره تناوب در نظر بگیرید) را برای شکل موجهای سینوسی، مثلثی و مربعی بدست آورید.

۲- روشهای متعددی برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی وجود دارند. به نظر شما با چه روشهایی می‌توان مقاومت ورودی ولت‌متر و یا آمپر‌متر را اندازه گرفت و در هر روش به چه نکاتی باید توجه کرد؟



## شرح آزمایش

### ✓ بررسی رابطه مقدار مورد نمایش و اندازه‌گیری در ولتاژهای متناوب

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، موتورهای ژنراتورها از برق ۴۰۰ هرتز استفاده می‌شود) و دامنه ۱ ولت تولید کرده، به اسیلوسکوپ و هر دو مولتی‌متر در اختیارتان متصل کنید. یکی از مولتی‌مترها دستی است که براحتی قابل حمل و نقل است. نمونه‌ای از این مولتی‌متر دستی را در شکل (۱-۲) مشاهده می‌کنید. مولتی‌متر دیگر اصطلاحاً مولتی‌متر رومیزی گفته می‌شود که نیاز به برق شهر جهت تأمین تغذیه آن دارد. نمونه‌ای از این مولتی‌متر رومیزی را در شکل (۲-۲) مشاهده می‌کنید. دقت کنید در اتصال مربوط به سیگنال ژنراتور سیم قرمز رنگ، سیم سیگنال و سیم مشکی به معنی زمین است. مقدار قله ولتاژ را از اسیلوسکوپ قرائت کنید و با مقادیر نشان داده شده توسط مولتی‌مترها مقایسه کنید. حال با کمک دکمه‌های انتخاب شکل موج بر روی سیگنال ژنراتور، شکل موج را مثلی انتخاب کنید. اندازه‌گیری را مجدداً تکرار کنید. این کار را برای شکل موج مربعی نیز تکرار کنید. آیا مولتی‌مترهای در اختیار شما اندازه‌گیری درستی را ارائه می‌کنند؟



شکل (۱-۲): راست: یک مولتی‌متر دستی نمونه - چپ: یک مولتی‌متر دستی True RMS



شکل (۲-۲): یک مولتی‌متر رومیزی نمونه

✓ بررسی رفتار فرکانسی مولتی مترهای دیجیتال

مشابه مرحله قبل سیگنال ژنراتور را به اسیلوسکوپ و هر دو مولتی متر متصل کنید. شکل موج را بر روی سیگنال ژنراتور سینوسی انتخاب کنید. با تغییر فرکانس از ۱۰ هرتز تا ۱۰۰ کیلو هرتز مقادیر قله ولتاژ از اسیلوسکوپ و مقادیر نشان داده شده از مولتی مترها را مقایسه کنید و در جدول زیر یادداشت کنید. برای سادگی مقایسه مقادیر بدست آمده می توانید در صورت تغییر قله ولتاژ بر روی اسیلوسکوپ با تنظیم سطح ولتاژ بر روی سیگنال ژنراتور مقدار آن را ثابت حفظ کنید.

| $f(Hz)$          | ۱۰ | ۵۰ | ۱۰۰ | ۲۰۰ | ۵۰۰ | ۱۰۰۰ | ۲۰۰۰ | ۵۰۰۰ | ۱۰۰۰۰ | ۲۰۰۰۰ | ۵۰۰۰۰ | ۱۰۰۰۰۰ |
|------------------|----|----|-----|-----|-----|------|------|------|-------|-------|-------|--------|
| اسیلوسکوپ        |    |    |     |     |     |      |      |      |       |       |       |        |
| مولتی متر دستی   |    |    |     |     |     |      |      |      |       |       |       |        |
| مولتی متر رومیزی |    |    |     |     |     |      |      |      |       |       |       |        |

مقادیر بدست آمده را در بر اساس فرکانس ۱۰۰ هرتز برای هر دو مولتی متر یکه کنید (مقادیر بدست آمده را بر مقدار بدست آمده در ۱۰۰ هرتز همان مولتی متر تقسیم کنید) و بر حسب فرکانس در یک نمودار رسم کنید. برای مقایسه بهتر معمولاً این نمودار را بصورت نیمه لگاریتمی (محور فرکانس لگاریتمی باشد) نمایش می دهند که تمام دهه های فرکانسی به یک میزان نشان داده شوند. در غیر این صورت فرکانس های کمتر فضای بسیار کمی از نمودار را اشغال خواهند کرد و اطلاعات زیادی از آنها حاصل نمی شود. به شکل بدست آمده پاسخ فرکانسی مولتی متر می گویند.

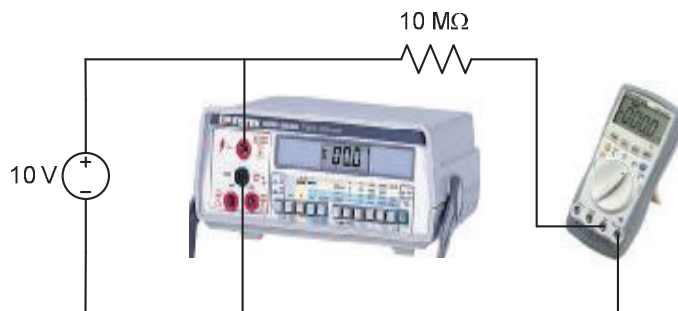
✓ بررسی مقاومت ورودی در حالت ولتمتر

یک مقاومت ۱۰ مگا اهمی را با مولتی متر دستی در اختیاران سری کنید. یک ولتاژ مستقیم ۱۰ ولت به مجموعه سری مقاومت و مولتی متر دستی اعمال کنید. با کمک مولتی متر رومیزی مقدار ولتاژ اعمالی را اندازه بگیرید (شکل (۲-۳)). با کمک قانون تقسیم ولتاژ بین مقاومت های سری میزان مقاومت ورودی مولتی متر دستی را بیابید. با تغییر ولتاژ و رنج دستگاه مشاهده کنید که آیا مقاومت ورودی به رنج انتخاب شده روی مولتی متر بستگی دارد یا خیر؟ با تغییر جای مولتی متر دستی و مولتی متر رومیزی مقدار مقاومت داخلی مولتی متر رومیزی را بدست آورید.

مولتی متر رومیزی را در حالت اهم متر قرار دهید و مقدار مقاومت ورودی مولتی متر دستی را در حالت ولتمتری اندازه گیری کنید. آیا مقادیر بدست آمده برابر هستند؟ همین کار را با تغییر جای مولتی متر دستی و مولتی متر رومیزی تکرار کنید.



با کمک روشی که در پیش گزارش پیشنهاد داده‌اید مقدار مقاومت داخلی هر دو مولتی‌متر را بدست آورید و با نتایج قبلی مقایسه کنید.



شکل (۲-۳): اندازه‌گیری مقاومت ورودی مولتی‌متر در حالت ولت‌متر

### ✓ بررسی مقاومت ورودی در حالت آمپر‌متر

تمام مولتی‌مترهای دیجیتال دارای ذات اندازه‌گیری ولتاژ هستند، لذا برای اندازه‌گیری جریان آن را با عبور از مقاومت شنت (موازی) تبدیل به ولتاژ می‌کنند و بعد با توجه به مشخص بودن مقدار مقاومت الکتریکی می‌توانند مقدار جریان را نشان دهند. برای اندازه‌گیری این مقاومت مولتی‌متر دستی را در حالت آمپر‌متر (اندازه‌گیری جریان در حد آمپر) قرار داده و با مقاومت  $0.1$  اهمی (پتانسیومتر  $1/10 \times$ ) موازی کنید. با توجه به اهمیت افت ولتاژ روی سیم‌های رابط باید از سیم‌های کوتاه و ضخیم جهت موازی کردن آنها بهره جست. حال مولتی‌متر رومیزی را در حالت آمپر‌متر (اندازه‌گیری جریان در حد آمپر) با مجموعه موازی مقاومت و آمپر‌متر دستی سری کنید. با کمک منبع تغذیه آزمایشگاهی، مقداری جریان در حدود  $1$  آمپر به مجموعه تغذیه کنید (شکل (۲-۴)). برای این کار باید ابتدا تنظیم جریان منبع را در حداقل قرار دهید و سپس منبع را به مجموعه کامل شده وصل کنید. با افزایش سطح جریان و قرائت آن توسط مولتی‌متر رومیزی مقدار جریان را به مقدار مورد نظر برسانید.



شکل (۲-۴): اندازه‌گیری مقاومت ورودی مولتی‌متر در حالت آمپر‌متر



با کمک قانون تقسیم جریان بین دو مقاومت موازی مقدار مقاومت ورودی آمپر متر را تعیین کنید. در این حالت برای دقت بهتر می‌توان با تغییر مقاومت موازی، جریان آمپر متر موازی را نصف جریان آمپر متر سری کرد. با حاصل شدن این شرایط مقدار مقاومت موازی برابر با مقاومت داخلی آمپر متر موازی خواهد شد. با کاهش جریان و تغییر رنج آمپر متر، این اندازه‌گیری را برای حالت‌های دیگر تکرار کنید. در این مرحله باید دقت داشته باشید که هرگز نباید جریانی بیش از رنج انتخاب شده از آمپر مترها عبور کند. اگر نسبت تقسیم جریان جهت محاسبات مناسب نبود با تغییر مقاومت مقداری مناسب را انتخاب کنید. در این مرحله لازم می‌شود که از مقاومت‌های دهنده‌ی دیگری که در روی میز کارتان قرار دارد استفاده کنید. چه عوامل خطایی در این آزمایش وجود دارند؟

با کمک اهم‌متر دستگاه رومیزی مقدار مقاومت ورودی آمپر متر دستی را تعیین کنید. در مورد نتایج آزمون بحث کنید.

با کمک روشی که در پیش‌گزارش پیشنهاد داده‌اید مقدار مقاومت ورودی آمپر متر را تنها در حالت آمپر متری (نه میکروآمپر متری یا میلی‌آمپر متری) تعیین کنید. مقدار بدست آمده را با روشهای قبلی مقایسه کنید.





## آزمایش ۳

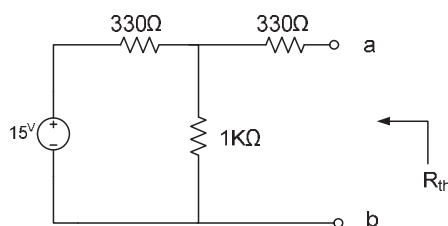
بررسی قانون اهم و قوانین ولتاژ و جریانهای کیرشهف،  
قوانین تقسیم ولتاژ و تقسیم جریان، بررسی مدار تون و نورتن،  
قضیه انتقال حداکثر توان و بررسی مدار پل و تسون



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

## پیش گزارش

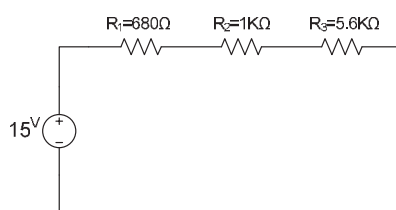
- ۱- شرایط لازم برای انتقال حداکثر توان از منبع به بار را بیان کرده و اثبات کنید.
- ۲- در حالت تعادل پل وتسون گزارش، روابط ولتاژ و جریان شاخه ها را بنویسید.
- ۳- دو روش برای اندازه گیری  $R_{th}$  در مدار شکل زیر بیان کنید.



- ۴- برای کلیه مدارهای موجود در گزارش به کمک نرم افزار *Spice*، تحلیل *DC* انجام داده و شماتیک هر مدار را در حالی که ولتاژ و جریان هر شاخه توسط *Spice* روی آن مشخص شده به پیش گزارش ضمیمه کنید.

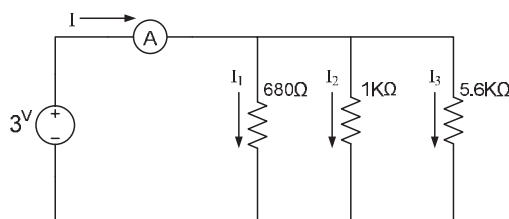
- ۵- به کمک نرم افزار *Spice* مدار شکل زیر را تحلیل کنید. جریان و ولتاژ دو سر هر یک از مقاومتها را مشخص کرده در مورد فرمول زیر (تقسیم ولتاژ) برای هر کدام از مقاومتها تحقیق کنید.

$$V_R = \frac{R}{R_1 + R_2 + R_3} \times V_i$$



- ۶- به کمک نرم افزار *Spice* مدار شکل صفحه بعد را تحلیل کنید. جریان را در هر یک از شاخه ها و همچنین شاخه اصلی پیدا کرده در مورد فرمول زیر (تقسیم جریان) برای هر شاخه تحقیق کنید.

$$I_{R_2} = \frac{R_1 \times R_3}{R_1 \times R_2 + R_1 \times R_3 + R_2 \times R_3} \times I$$

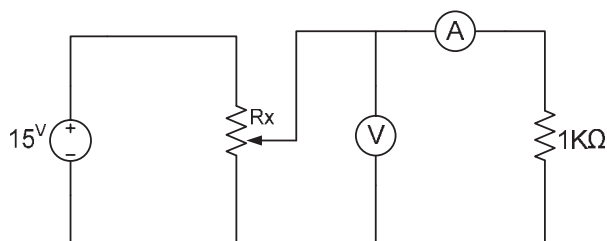




## شرح آزمایش

### ✓ قانون اهم

۱- مدار شکل زیر را ببندید. 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 به ازای  $R = cte$  (مقاومت ثابت) رسم نمایید. از پتانسیومتر  $\times 1000$  برای مقاومت متغیر استفاده کنید.

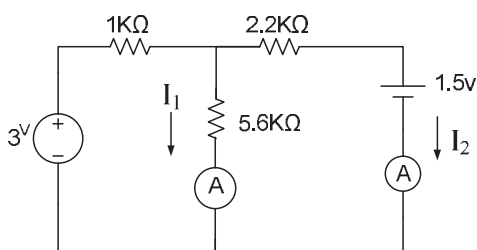


شکل (۱-۳)

| $R_x (K\Omega)$ | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ |
|-----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $I(mA)$         |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
| $V(V)$          |   |   |   |   |   |   |   |   |   |

### ✓ جمع آثار

۲- مدار شکل زیر را ببندید و جریانهای  $I_1$  و  $I_2$  را یادداشت نمایید. سپس یکبار منبع  $1.5V$  ولتی را و بار دیگر منبع  $3V$  ولتی را غیر فعال کرده جریانهای  $I_1$  و  $I_2$  را در هر مرحله بطور مجزا بخوانید و در مورد اصل جمع آثار یا *Superposition* تحقیق نمایید.

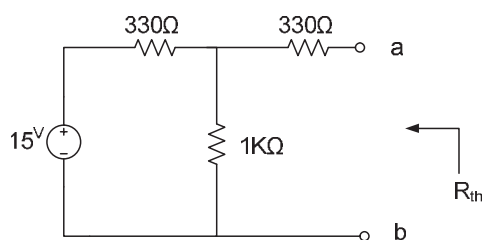


شکل (۲-۳)



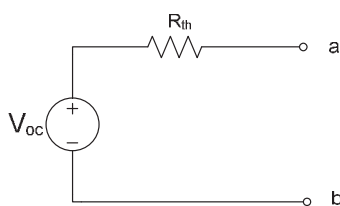
### ✓ بررسی مدار تونن و نورتن

۳- مدار شکل زیر را ببندید. با اتصال کوتاه کردن دو نقطه  $a$  و  $b$  جریان  $I_{sc}$  (جریان اتصال کوتاه بین این دو نقطه) را اندازه گرفته و سپس با مدار باز کردن دو نقطه  $a$  و  $b$ ،  $V_{oc}$  (ولتاژ مدار باز) را با ولتمتر بخوانید. سپس با داشتن این دو مقدار  $R_{th}$  را محاسبه کنید.



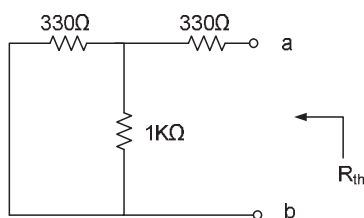
شکل (۳-۳)

۴- حال مدار شکل زیر را با توجه به مقادیر بدست آمده از مرحله ۱ ببندید. (برای جایگزینی  $R_{th}$  در مدار از پتانسیومتر استفاده کنید). مجدداً مقادیر  $I_{sc}$  و  $V_{oc}$  را بدست آورده و سپس با اعداد قبلی مقایسه نمایید. چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟ بنویسید.



شکل (۴-۳)

۵- مدار شکل نخست را غیر فعال کنید. توسط اهم متر دیجیتالی مقاومت  $R_{th}$  را اندازه‌گیری کنید و مقدار آن را یادداشت کنید. سپس نتیجه را با آزمایشهای قبلی مقایسه کرده علت اختلافات احتمالی را بنویسید.

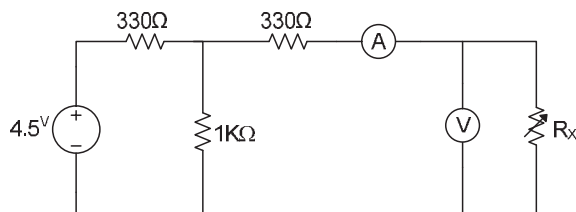


شکل (۵-۳)



## ✓ قضیه انتقال حداکثر توان

۶- مدار شکل زیر را ببندید. از پتانسیومتر  $\times 100$  برای  $R_x$  استفاده کنید.



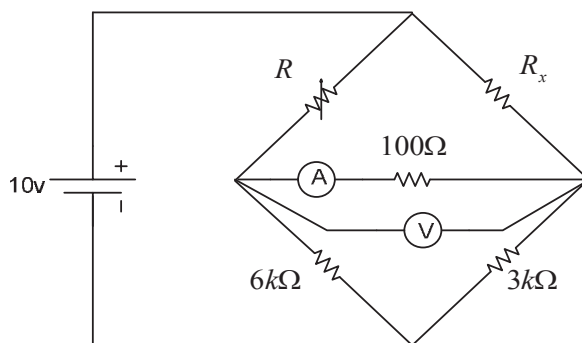
شکل (۳-۶)

با تغییر مقاومت  $R_x$  مقدار جریان عبوری از آن و ولتاژ دو سرش را بخوانید. (مقادیر جریان و ولتاژها را در جدول زیر یادداشت کنید). سپس مقدار توان جذب شده را در هر حالت محاسبه کنید. مقدار مقاومتی را که به ازای آن توان جذب شده به مقدار ماکزیمم رسیده است را پیدا کنید. برای این کار منحنی  $R_x$  را رسم نموده مقاومتی را که به ازای آن مقدار توان ماکزیمم شده است از روی منحنی پیدا کنید. سپس از طریق محاسبه نیز مقاومت ماکزیمم را بدست آورده با نتیجه فوق مقایسه کنید. در صورتیکه اختلافی مشاهده می‌کنید دلیل آن را ذکر کنید.

| $R_x (\Omega)$ | ۱۰۰ | ۲۰۰ | ۳۰۰ | ۴۰۰ | ۵۰۰ | ۶۰۰ | ۷۰۰ | ۸۰۰ | ۹۰۰ | ۱۰۰۰ |
|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| V(V)           |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |
| I(mA)          |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |
| P(mW)          |     |     |     |     |     |     |     |     |     |      |

## ✓ بررسی مدار پل وتسون

۷- مدار شکل (۷) را ببندید. (به جای مقاومت  $3k\Omega$  از اتصال سری ۳ مقاومت یک کیلو اهمی و نیز از پتانسیومتر  $\times 1000$  به جای  $R$  استفاده کنید. مقاومت مجهول را از مسئول آزمایشگاه تحویل بگیرید).



شکل (۳-۷)



الف- مقاومت  $R$  را مطابق جدول زیر تغییر داده و در هر مرحله مقدار جریان و ولتاژ دو سر مقاومت  $100\Omega$  را یادداشت کنید.

ب- مقدار  $R$  را که به ازای آن پل متعادل می شود، مشخص کرده و به کمک آن مقدار مقاومت مجهول  $R_x$  را مشخص کنید.

ج- در حالتی که جریان و ولتاژ دو سر مقاومت  $100\Omega$  برابر صفر شده، جریان عبوری از مقاومت  $R_x$  را اندازه گرفته و با مقدار تئوری در این حالت مقایسه کنید.

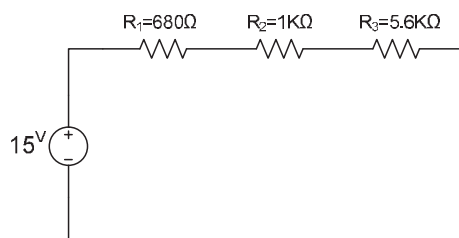
| R(k $\Omega$ ) | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ |
|----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| V(V)           |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| I(mA)          |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |

۸- در بخش ۷ به جای مقاومت  $100\Omega$ ، خازن  $3/3 nF$  قرار داده و مجدداً آزمایش را تکرار کنید و با نتایج بخش ۷ مقایسه کنید.

### لطفاً در گزارش کار به سؤالات زیر پاسخ دهید :

- ۱- شرایط لازم برای انتقال حداکثر توان از منبع به بار را بیان کرده و اثبات کنید.
- ۲- در حالت تعادل پل وتسون شکل (۷)، روابط ولتاژ و جریان شاخه ها را بنویسید.
- ۳- شکل ۱ را به ازای  $5 K\Omega$ ,  $1 K\Omega$  به کمک نرم افزار *Spice*، تحلیل *DC* انجام داده و شماتیک مدار را در حالی که ولتاژ و جریان هر شاخه توسط *Spice* روی آن مشخص شده به گزارش کار ضمیمه کنید.
- ۴- مانند سوال ۳ به کمک نرم افزار *Spice* مدار شکل زیر را تحلیل کنید. جریان و ولتاژ دو سر هر یک از مقاومتها را مشخص کرده در مورد فرمول زیر (تقسیم ولتاژ) برای هر کدام از مقاومتها تحقیق کنید.

$$V_R = \frac{R}{R_1 + R_2 + R_3} \times V_i$$

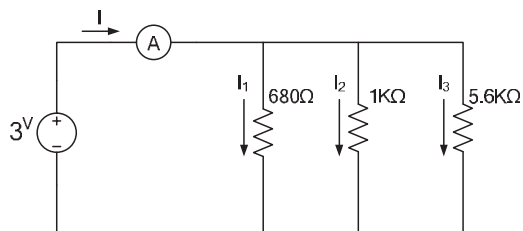


شکل (۳-۸)



۵- به کمک نرم افزار *Spice* مدار شکل زیر را تحلیل کنید. جریان را در هر یک از شاخه ها و همچنین شاخه اصلی پیدا کرده در مورد فرمول زیر (تقسیم جریان) برای هر شاخه تحقیق کنید.

$$I_{R_r} = \frac{R_l \times R_r}{R_l \times R_r + R_r \times R_r + R_l \times R_r} \times I$$



شکل (۹-۳)



## آزمایش ۴

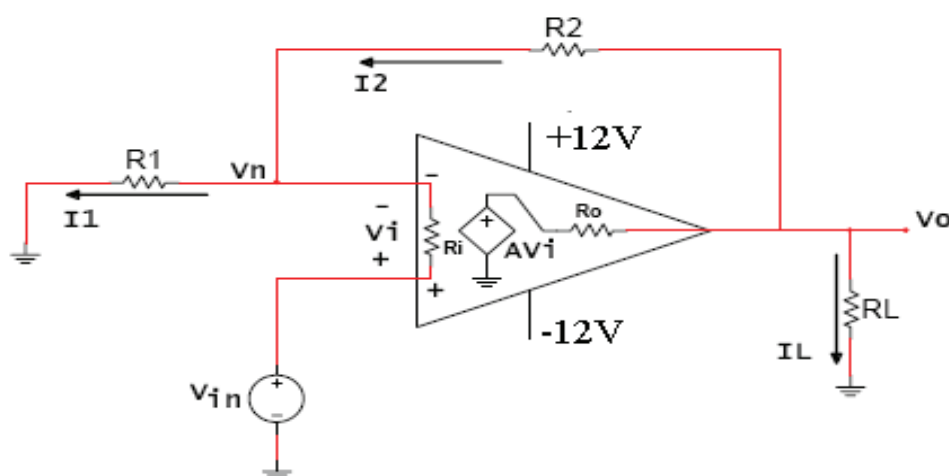
تقویت‌کننده‌های عملیاتی



هدف از این آزمایش آشنایی با تقویت کننده عملیاتی ۷۴۱ می باشد. عملکرد این تقویت کننده در موده های خطی و اشباع مورد توجه قرار می گیرد. برخی از کاربردهای این IC از قبیل بافر، جمع کننده و منبع جریان مورد بررسی قرار می گیرند.

## پیش گزارش

۱- به کمک نرم افزار *Spice* مدار شکل (۱-۴) را با آپامپ ۷۴۱ شبیه سازی کرده و شماتیک مدار را که شامل ولتاژ هر گره و جریان هر شاخه می باشد، به پیش گزارش ضمیمه کنید.  $R_i$  و  $R_o$  را به گونه ای انتخاب کنید که بهره ولتاژ مدار برابر ۳ گردد.  $R_L = 1\text{ K}\Omega$  و  $V_{in}$  را مساوی ۲ ولت قرار دهید.

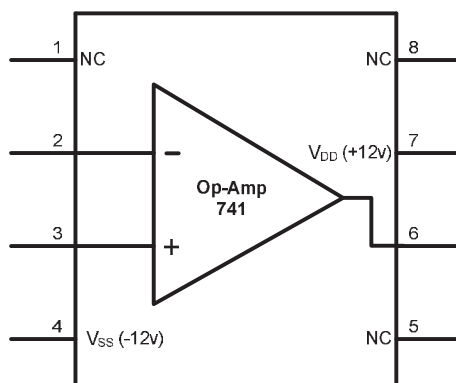


شکل (۱-۴)

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

## شرح آزمایش

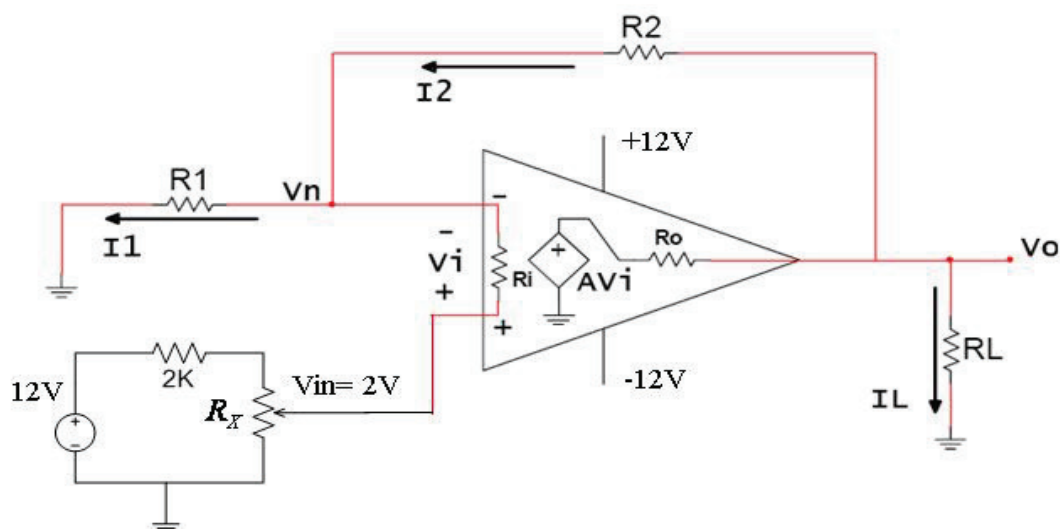
پایه های آی سی ۷۴۱ در شکل (۲-۴) زیر نشان داده شده اند. ( $V_{DD} = +12$  ,  $V_{SS} = -12$ )



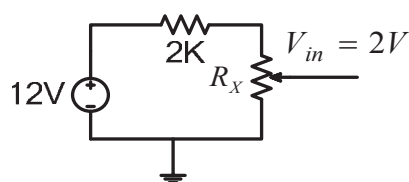
شکل (۲-۴)

### ✓ بررسی عملکرد آپامپ ایده آل در حالت ناوارونگر

با استفاده از آپامپ ۷۴۱ مدار شکل (۳-۴) را ببندید.  $R_L$  و  $R_F$  را به گونه ای انتخاب کنید که بهره ولتاژ مدار برابر ۳ گردد.  $R_L = 1 K\Omega$  و  $V_{in}$  را مساوی ۲ ولت قرار دهید. مقدار  $V_{in}$  را به کمک مدار شکل (۴-۴) بسازید. به جای مقاومت های  $R_x$  از پتانسیومتر  $1000 \times$  و به جای مقاومت  $1 K\Omega$  از پتانسیومتر  $1000 \times$  یا  $2 K\Omega$  به صورت سری استفاده کنید. مقاومت  $R_x$  را آنقدر تغییر دهید تا داشته باشیم:  $V_{in} = 2 V$ .



شکل (۳-۴)

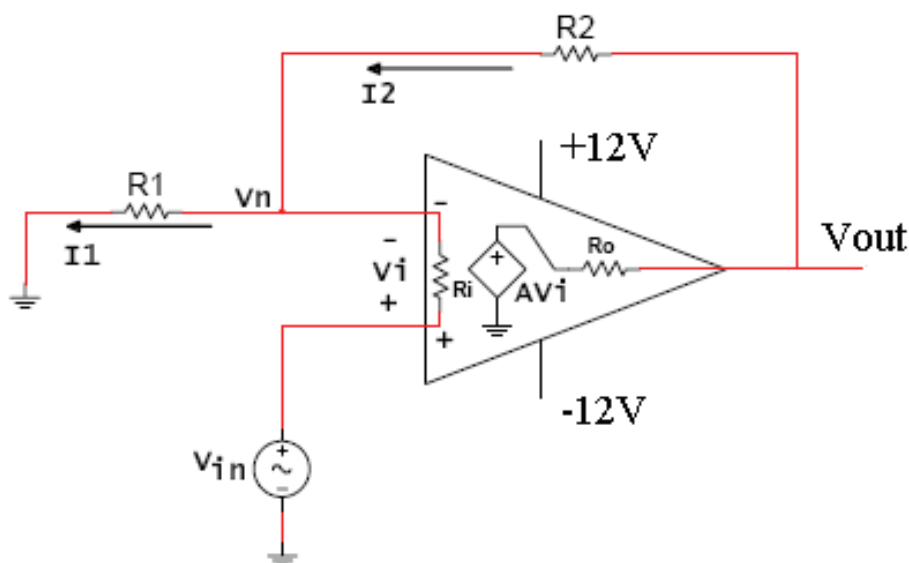


شکل (۴-۴)

- 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 شبیه سازی پیش گزارش مقایسه کنید. آیا  $I_1 + I_L$  قانون  $KCL$  را برقرار می کند؟ چرا؟
- ۲- شرایط  $R_L = \infty$  و  $R_L = 0$  را برقرار کنید. خروجی مدار را اندازه گرفته و عملکرد مدار را در این حالت توضیح دهید.

### ✓ بررسی عملکرد آپ امپ در حالت اشباع

در مدار شکل (۴-۵) به جای ولتاژ ورودی  $DC$  از منبع ولتاژ سینوسی استفاده شده است. فرکانس موج ورودی را  $1\text{ KHz}$  قرار داده و شکل موج خروجی را به ازای دامنه ورودی  $2V, 4V$  و  $5V$  و در حالت بهره ۳ مشاهده کنید. در هر حالت دامنه ولتاژ خروجی چه مقدار است؟ چه نتیجه ای می گیرید؟

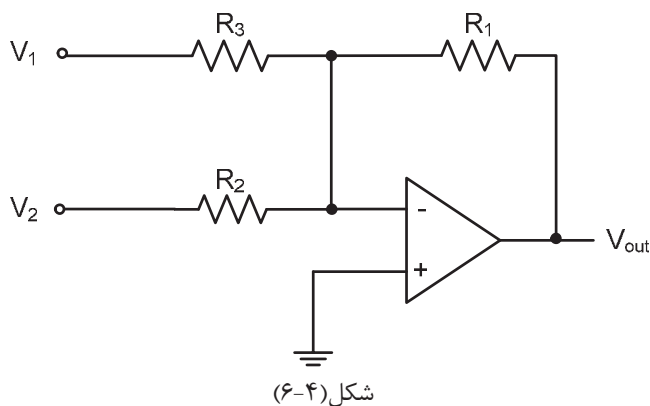


شکل (۴-۵)



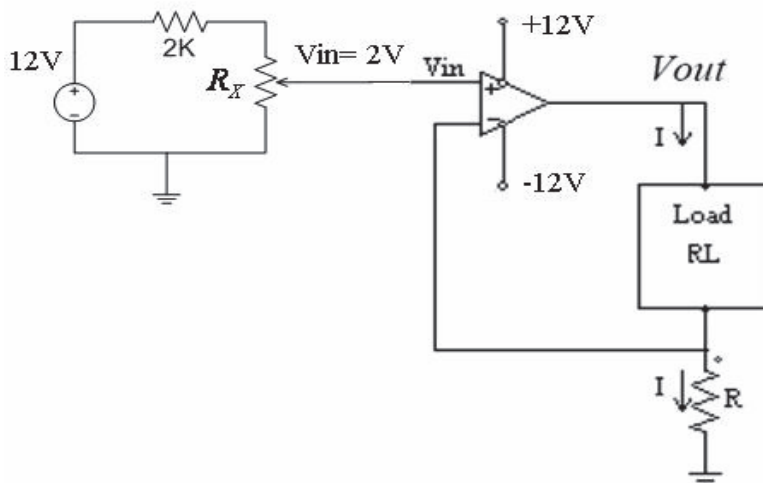
### ✓ مدار جمع‌کننده

یکی دیگر از مداراتی که به کمک آپ‌امپ می‌توان ساخت، مدار جمع‌کننده می‌باشد. به کمک مدار شکل (۴-۶) رابطه  $V_{out} = -\frac{1}{3}V_1 - \frac{1}{6}V_2$  را پیاده‌سازی کرده و مقدار خروجی را بخوانید. ( $V_1 = -12V$  و  $V_2 = +12V$ ).



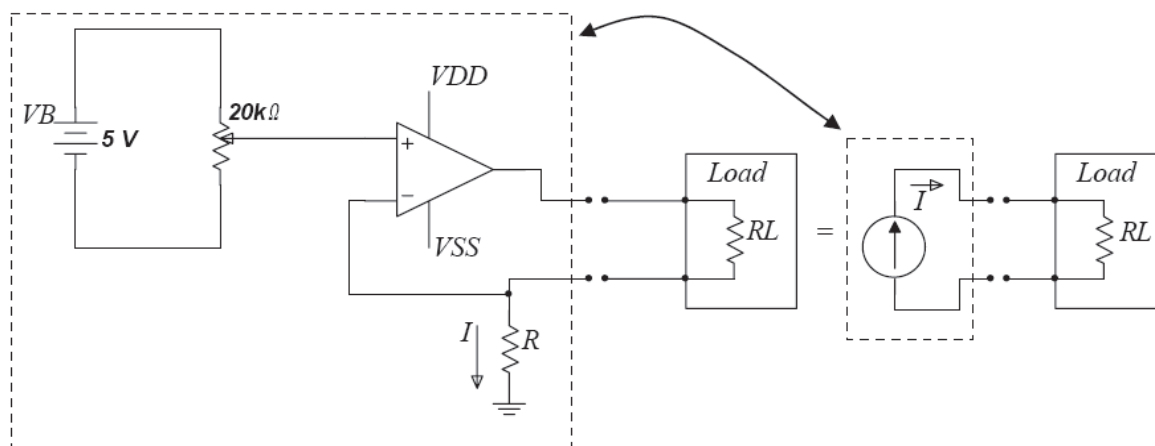
### ✓ منبع جریان کنترل شده با ولتاژ

با توجه به عملکرد آپ‌امپ ایده‌آل در مدار شکل (۴-۷) داریم:  $V_{out} = (1 + R_L/R)V_{in}$  و جریان جاری در مقاومت  $R_L$  برابر  $I = \frac{V_{in}}{R}$  می‌باشد.





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 (۸-۴)، مدار داخل خط‌چین این منبع را نشان می‌دهد.



شکل (۸-۴)

۱- برای بررسی بیشتر، مدار شکل (۷-۴) را ببینید و جدول زیر را کامل کنید. ولتاژ ورودی  $V_{in}$  را به کمک مدار شکل (۴-۴) 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) | $R_L$ (KΩ) | $R$ (KΩ) | $V_{out}$ 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 (۷-۴) اعمال کرد؟



## آزمایش ۵

پاسخ زمانی مدارهای مرتبه اول



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.

## پیش‌گزارش

- 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 (۵-۱) را به ازای  $L = 22 \text{ mH}$  و مقاومتهای  $100 \Omega$  و  $1 \text{ K}\Omega$  و ورودی موج مربعی با فرکانس  $500 \text{ Hz}$  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 *Spice* مدارهای سؤال ۳ را شبیه‌سازی 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 *Spice*، شکل موج خروجی از دو سر خازن در یک مدار  $RC$  سری را به ازای مقاومتهای  $10 \text{ K}\Omega$ ،  $50 \text{ K}\Omega$ ،  $90 \text{ K}\Omega$  روی یک نمودار رسم کنید. ورودی را یک موج مربعی با دامنه ۱ ولت و فرکانس  $300 \text{ Hz}$  و مقدار خازن را  $100 \text{ nF}$  فرض کنید.
- ۷- به کمک نرم افزار *Spice*، 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  $R = 10 \text{ K}\Omega$  و  $C = 100 \text{ nF}$ ).
- ۸- در کدام یک از حالت‌های بالا، انتگرال بهتری از موج ورودی را مشاهده می‌کنید؟ نتیجه را با جواب سؤال ۴ مقایسه کنید.

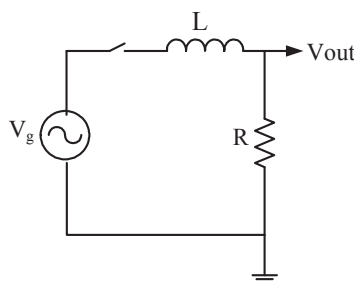


## شرح آزمایش

## ✓ پاسخ گذرای مدار RL

مداری مطابق شکل زیر ببندید. ورودی مدار را منبع موج مربعی با دامنه ۴ ولت انتخاب کنید. مقدار سلف ۲۲ میلی هانری می باشد.

۱- شکل موج دو سر R را روی اسیلوسکوپ مشاهده نمایید و به کمک روش پیشنهادی خودتان ثابت زمانی مدار را به کمک اسیلوسکوپ و به ازای مقاومت های  $100\Omega$  ،  $200\Omega$  ،  $500\Omega$  ،  $1K\Omega$  و ورودی موج مربعی با فرکانس  $1KHz$  اندازه گرفته و در هر حالت آن را با مقادیر محاسبه شده در پیش گزارش مقایسه کنید. (برای سهولت تغییر مقدار مقاومتها از پتانسیومتر استفاده کنید)



شکل (۵-۱)

- ۲- خطای اندازه گیری به ازای کدام یک از مقاومت های بالا بیشتر بوده و علت آن را توضیح دهید.
- ۳- بخش شماره ۱ را مجدداً برای مقاومت  $500\Omega$  به ازای ورودی موج مربعی با فرکانس  $500Hz$  تکرار کنید و مقدار ثابت زمانی بدست آمده را با مقدار بدست آمده در بخش ۱ برای مقاومت  $500\Omega$  مقایسه کنید. چه نتیجه ای می گیرید؟
- ۴- به ازای مقاومت  $100\Omega$  ثابت زمانی مدار را در فرکانس های  $500Hz$  و  $2KHz$  اندازه گرفته و مقادیر تئوری و عملی را مقایسه کرده و علت اختلاف را بیان کنید.
- ۵- شکل موج دو سر سلف (L) را به ازای مقاومت های  $100\Omega$  ،  $200\Omega$  ،  $500\Omega$  ،  $1K\Omega$  و ورودی موج مربعی با فرکانس  $1KHz$  روی اسیلوسکوپ مشاهده نمایید و شکل یک پررود آن را در دستگاه مختصات مناسبی رسم کنید.
- ۶- در شکل موجهای رسم شده در بخش ۵ ملاحظه می شود که در نقاط ناپیوستگی موج مربعی ورودی، شکل موج ولتاژ دو سر سلف دارای جهش ولتاژی معادل دو برابر دامنه منبع می باشد، به عنوان مثال اگر دامنه منبع ۴ ولت باشد جهش ولتاژ سلف ۸ ولت می باشد، علت این پدیده را توضیح دهید.
- ۷- آیا جهش ولتاژ اشاره شده در قسمت ۶ برای ولتاژ دو سر مقاومت نیز اتفاق می افتد؟ چرا؟

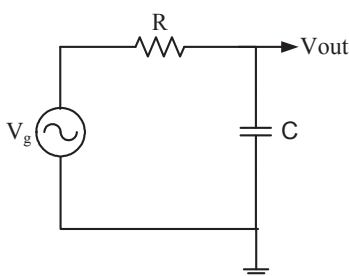




۸- دقت کنید که اختلاف پتانسیل دو سر سلف شباهت زیادی با مشتق موج ورودی دارد. از این روش می توان برای ساختن مشتق گیر استفاده کرد. از روی منحنی های ولتاژ  $V_L$ ، شرط لازم را برای داشتن یک مشتق گیر خوب بیان کنید و از لحاظ تئوری ثابت کنید.

### ✓ پاسخ گذرای مدار RC

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



شکل (۴-۲)

۹- نوسان ساز را به ورودی مدار متصل نموده و یک موج مربعی با دامنه ۴ ولت و فرکانس ۵۰۰ هرتز به مدار اعمال نمایید و پاسخ مدار را بوسیله اسیلوسکوپ مشاهده نمایید. با استفاده از مقاومتهای  $90 K\Omega$ ،  $50 K\Omega$  و  $10 K\Omega$  به جای R، شکل موج خروجی را در هر حالت مشاهده و به دقت رسم نمایید. (از پتانسیومتر  $1000 \times$  برای تغییر مقاومتهای استفاده کنید). در کدام حالت انتگرال بهتری از موج ورودی را در خروجی مشاهده می کنید؟ چرا؟

### ✓ فعالیت اضافی:

۱۰- مدار شکل (۵-۲) را با پتانسیومتر  $100 \times$  و خازن  $C = 100 nF$  تشکیل دهید. نوسان ساز را به ورودی مدار متصل نموده و یک موج مربعی با دامنه ۴ ولت به مدار اعمال نمایید و پاسخ مدار را بوسیله اسیلوسکوپ مشاهده نمایید. فرکانس موج ورودی را روی یک کیلوهرتز تنظیم نمایید. خروجی از دو سر مقاومت گرفته می شود. با استفاده از پتانسیومتر  $100 \times$  مقاومتهای  $1 K\Omega$ ،  $600 \Omega$  و  $300 \Omega$  را به جای R قرار داده و شکل موج خروجی را در هر حالت مشاهده و به دقت رسم نمایید. در کدام حالت مشتق بهتری از موج ورودی را در خروجی مشاهده می کنید؟ چرا؟

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



## آزمایش ۶

پاسخ زمانی مدارهای مرتبه دوم

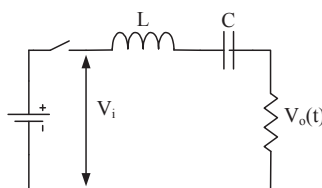


هدف از انجام این آزمایش بررسی رفتار انواع حالت‌های گذرای مدارهای مرتبه دوم  $RLC$ ، اندازه‌گیری پارامترهای مختلف معادله مشخصه، بررسی مقاومت بحرانی و آشنایی با پدیده  $Overshoot$  است.

## 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 (۶-۱)

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:

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

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 ریشه‌های  $s_1$  و  $s_2$  می‌باشد:



$$s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC} = 0$$

$$s_1 = \frac{-R}{2L} + \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}$$

$$s_2 = \frac{-R}{2L} - \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$i(t) = k_1 e^{s_1 t} + k_2 e^{s_2 t}$$

$$i(0) = 0$$

$$\frac{di(0)}{dt} = \frac{V}{L}$$

برحسب اینکه  $\frac{R}{2L}$  بزرگتر از، مساوی با و یا کوچکتر از  $\frac{1}{\sqrt{LC}}$  باشد، پاسخ مدار (یا جریان  $i(t)$ ) دارای

شکلهای زیر خواهد بود:

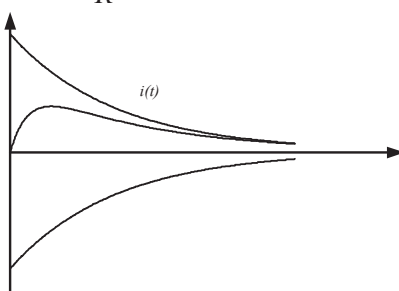
۱- اگر  $\frac{R}{2L} > \frac{1}{\sqrt{LC}}$  باشد پاسخ مدار به یک مقدار ماکزیمم می‌رسد و با ثابت زمانی معینی به سوی صفر

میل می‌کند. این پاسخ به حالت فوق میرایی موسوم است که در آن:

$$i(t) = \frac{V}{L\omega} e^{-t/\tau} \left[ \frac{e^{\omega t} - e^{-\omega t}}{2} \right]$$

$$\omega = \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}$$

$$\tau = \frac{2L}{R}$$



شکل (۶-۲)

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  $\omega$  و  $-\omega$  نیز در ایجاد آن نقش دارند و تنها تحت شرایطی که

$\omega$  خیلی کوچک باشد می‌توان گفت که تقریباً ثابت زمانی  $\frac{2L}{R}$  است که این وضعیت در حالت میرای بحرانی

محسوس‌تر است.

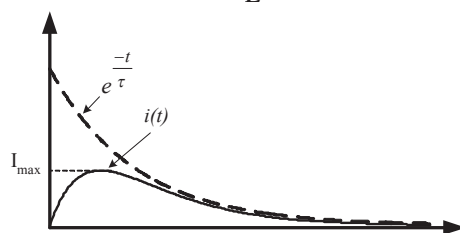


۲- اگر  $\frac{R}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{2L}$  باشد جریان به مقدار ماکزیمم  $I_{\max}$  می‌رسد و با ثابت زمانی  $\tau = \frac{2L}{R}$  به سمت صفر میل می‌کند. این حالت به میرای بحرانی یا *Critically Damped* موسوم است.

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

$$\tau = \frac{2L}{R}$$

$$I_{\max} = \frac{V \tau}{L} e^{-1}$$



شکل (۳-۶)

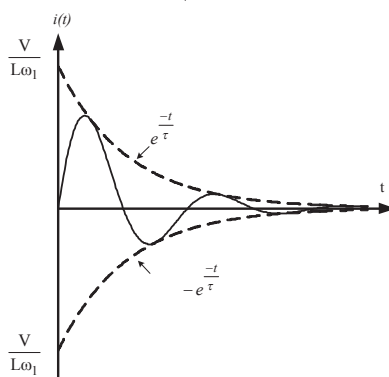
۳- اگر  $\frac{R}{\sqrt{LC}} < \frac{1}{2L}$  باشد، پاسخ مدار بصورت یک موج سینوسی است که دامنه آن رفته رفته کم شده و به صفر می‌رسد. این حالت به نوسانی میرا یا *Oscillatory Damped* موسوم می‌باشد.

$$i(t) = \frac{V}{L\omega_1} e^{-t/\tau} \sin \omega_1 t$$

$$\omega_1 = j\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$$

و فرکانس نوسانات برابر است با:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$$



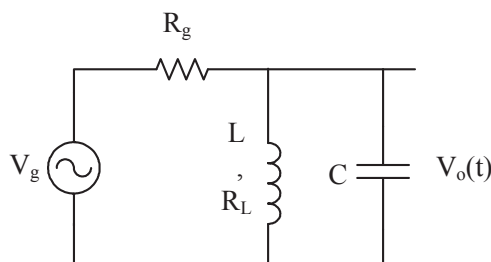
شکل (۴-۶)



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 می توان مقدار  $f_1$  را به صورت  $f_1 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  نوشت.

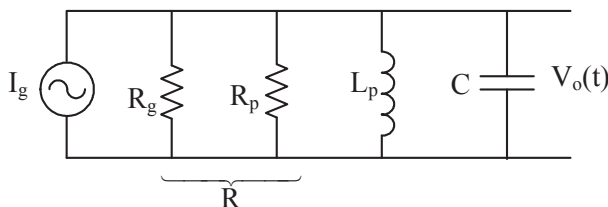
### ✓ مدار RLC موازی

شکل زیر مدار RLC موازی را نمایش می دهد:



شکل (۵-۶)

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



شکل (۶-۶)

پس از اعمال جریان پله ای به دامنه  $I_g$ ، می توان نوشت:

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

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

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



نظیر مدار سری سه حالت زیر در پاسخ گذرا مشاهده می شود:

۱.  $\frac{1}{\tau RC} > \frac{1}{\sqrt{L_p C}}$  حالت فوق میرایی یا Over Damped خواهد بود.

۲.  $\frac{1}{\tau RC} = \frac{1}{\sqrt{L_p C}}$  حالت میرایی بحرانی یا Critically Damped خواهد بود.

۳.  $\frac{1}{\tau RC} < \frac{1}{\sqrt{L_p C}}$  حالت نوسانی میرا یا Oscillatory Damped خواهد بود.

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

$$\tau = \tau RC$$

ضریب میرایی یا Damping Factor نسبت  $\alpha = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau RC}$  را می گویند.

مقاومت بحرانی یا Critical Resistance مقدار  $R_C = \frac{1}{\tau} \sqrt{L/C}$  می باشد.



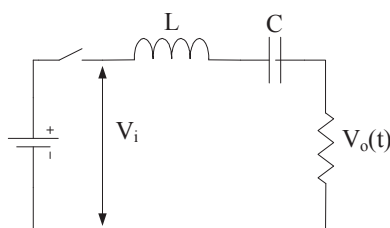
## پیش‌گزارش

- 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  $C = 3,3 \text{ nF}$  و  $L = 18 \text{ mH}$ ، مقاومت بحرانی و به ازای مقاومت  $1 \text{ K}\Omega$  فرکانس نوسانات را برای *RLC* سری و موازی محاسبه کنید.
- ۴- ثابت زمانی ( $\tau$ ) 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  $\tau$ ، در هر کدام از حالت های میرای بحرانی و نوسانی میرا در مدار *RLC* ارائه کنید.
- ۶- مدار *RLC* سری را با مقادیر سلف ۱۸ میلی‌هائری و خازن ۳,۳ نانوفاراد و یک ولتاژ موج مربعی با دامنه ۲ ولت و فرکانس ۱  $\text{KHz}$  به کمک نرم افزار *Spice* شبیه سازی کرده و با تغییر مقدار مقاومت، حالت پاسخ گذرای مدار را در یک نمودار رسم کنید. خروجی از دوسر مقاومت گرفته شود.



## شرح آزمایش

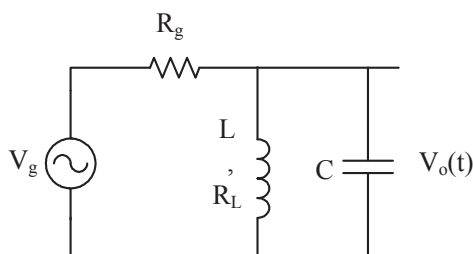
مطابق شکل زیر مدار  $RLC$  سری را با مقادیر سلف ۱۸ میلی هانری و خازن ۳,۳ نانوفاراد و پتانسیومتر ۱ تا ۱۰ کیلو اهم ساخته و یک ولتاژ مربعی با دامنه ۲ ولت و فرکانس ۱  $KHz$  به آن اعمال می کنیم و خروجی را از دو سر مقاومت می بینیم.



شکل (۶-۷)

- ۱- با تغییر مقاومت، سه حالت پاسخ گذرای مدار شامل فوق میرا، میرای بحرانی و نوسانی میرا را روی اسیلوسکوپ مشاهده کرده و مقدار مقاومت بحرانی را اندازه بگیرید.
- ۲- ثابت زمانی و ضریب میرایی مدار را در حالت میرای بحرانی به ازای مقاومت بحرانی و در حالت نوسانی میرا به ازای مقاومت ۱  $K\Omega$  به کمک روش پیشنهادی خودتان اندازه بگیرید.
- ۳- فرکانس نوسانات را در حالت نوسانی میرا به ازای مقاومت ۱  $K\Omega$  اندازه گرفته و سپس درصد  $Overshoot$  خازن (نسبت ولتاژ  $Overshoot$  خازن به ولتاژ پایدار خازن ضربدر ۱۰۰) را به ازای همین مقاومت اندازه بگیرید.

مدار  $RLC$  موازی را مطابق شکل زیر با مقادیر سلف ۱۸ میلی هانری و خازن ۳/۳ نانوفاراد و پتانسیومتر ۱ تا ۱۰ کیلو اهم (به جای مقاومت  $R_g$ ) ساخته و یک ولتاژ مربعی با دامنه ۲ ولت و فرکانس ۱  $KHz$  به آن اعمال می کنیم و خروجی را از دو سر خازن می بینیم. از پتانسیومتر  $\times 1000$  برای مقاومت  $R_g$  استفاده کنید.



شکل (۶-۸)

- ۴- با تغییر مقاومت، سه حالت پاسخ گذرای مدار شامل فوق میرا، میرای بحرانی و نوسانی میرا را روی اسیلوسکوپ مشاهده کرده و مقدار مقاومت بحرانی را اندازه بگیرید.



- ۵- ثابت زمانی و ضریب میرایی مدار را در حالت میرای بحرانی به ازای مقاومت بحرانی و در حالت نوسانی میرا به ازای مقاومت  $3 K\Omega$  به کمک روش پیشنهادی خودتان اندازه بگیرید.
- ۶- فرکانس نوسانات را در حالت نوسانی میرا به ازای مقاومت  $3 K\Omega$  اندازه بگیرید.



## آزمایش ۷

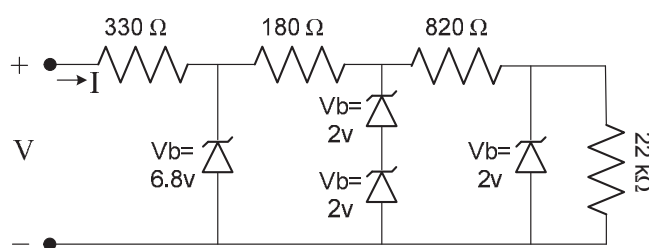
مدارهای غیرخطی



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

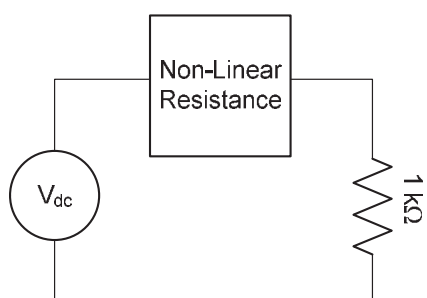
## پیش‌گزارش

۱- مدار شکل زیر تحقق یک مقاومت غیرخطی است (یعنی منحنی جریان-ولتاژ این شبکه‌ی تک قطبی خطی نیست). با کمک نرم‌افزار *Spice* 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  $0 < V_i < 15\text{ V}$  قرار دهید.



شکل (۱-۷)

۲- در مدار شکل زیر منحنی جریان-ولتاژ عنصر غیرخطی را همان منحنی بدست آمده از نرم‌افزار در قسمت قبل 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.

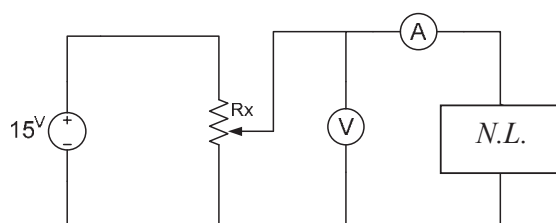


شکل (۲-۷)



## شرح آزمایش

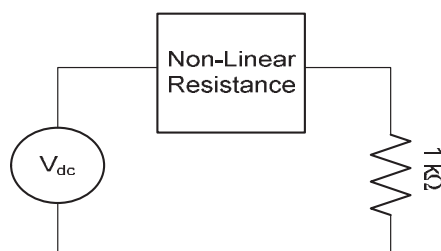
۱- در شکل زیر عنصر مفروض همان عنصر غیرخطی شکل (۷-۱) است. با تغییر پتانسیومتر و در نتیجه تغییر  $R_x$ ، مقادیر جریان و ولتاژ را بخوانید و جدول زیر را کامل نمایید. سپس منحنی تغییرات  $I = f(V)$  را برای عنصر غیرخطی رسم نمایید. از پتانسیومتر  $\times 1000$  برای مقاومت متغیر استفاده کنید.



شکل (۷-۳)

|                     |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|---------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| $R_x$ (k $\Omega$ ) | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ |
| I (mA)              |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| V (V)               |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |

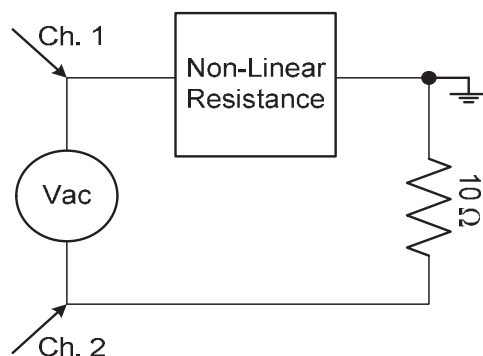
۲- با استفاده از عنصر غیرخطی قسمت قبل مدار شکل زیر را ببندید. منبع ولتاژ را روی ۱۰ ولت تنظیم کنید. مقادیر ولتاژ و جریان مقاومت  $1\text{ k}\Omega$  را بدست آورید. نتایج را با مقادیر بدست آمده از تئوری مقایسه کنید (از منحنی بدست آمده در قسمت قبل استفاده کنید).



شکل (۷-۴)



۳- منحنی جریان-ولتاژ عنصر غیرخطی فوق را می‌توان با استفاده از مود عملکردی لیسازو روی اسیلوسکوپ مشاهده کرد. برای این کار مدار شکل زیر را ببندید. یک ولتاژ سینوسی با دامنه‌ی ۶ ولت و آفست ۶ ولت با فرکانس ۵۰۰ Hz اعمال کنید.



شکل (۵-۷)

چرا در این آزمایش از یک ولتاژ سینوسی با دامنه‌ی ۶ ولت و آفست ۶ ولت استفاده می‌شود؟  
در این آزمایش چرا زمین منبع  $ac$  را از زمین ساختمان ایزوله می‌کنیم؟ چگونه؟



## آزمایش ۸

پاسخ فرکانسی مدارهای مرتبه اول



هدف از این آزمایش آشنایی با رفتار فرکانسی مدارهای مرتبه اول، 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  $V_i(t) = V_{im} \sin \omega t = V_{ie} \angle 0^\circ$  باشد، می‌توان ولتاژ خروجی را بصورت زیر نوشت:

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

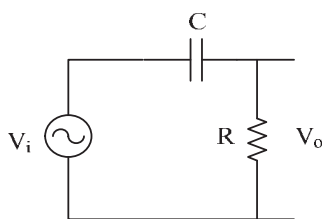
نسبت ولتاژ خروجی به ولتاژ ورودی تابعی از فرکانس بوده و به تابع پاسخ فرکانسی و یا تابع انتقال موسوم است و با رابطه زیر نشان داده می‌شود:

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \left| \frac{V_o}{V_i} \right| \angle \varphi^\circ$$

بطوریکه خواهیم دید،  $\left| \frac{V_o}{V_i} \right|$  و  $\varphi$  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  $\varphi$  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:

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

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

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



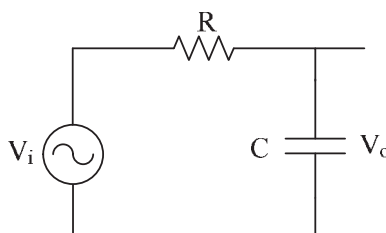


در فرکانس‌های بالا، وقتی که  $\omega RC \gg 1$  است،  $\varphi \approx 0^\circ$  و  $|V_o/V_i| \approx 1$  و وقتی که  $\omega RC \ll 1$  می‌باشد،  $\varphi \approx 90^\circ$  و  $|V_o/V_i| \approx 0$  و به این ترتیب مدار  $RC$  فوق که ولتاژهای با فرکانس بالا را از خود عبور می‌دهد و ولتاژهای با فرکانس پایین را به شدت تضعیف می‌نماید به فیلتر بالاگذر موسوم است. در این حالت نیز فرکانس قطع جایی است که ولتاژ خروجی به  $1/\sqrt{2}$  ولتاژ ورودی در فرکانس عبور کاهش می‌یابد. بنابراین داریم:

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

### ✓ 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:

$$\begin{cases} V_i = (R + \frac{1}{j\omega C})I \\ V_o = (\frac{1}{j\omega C})I \end{cases} \Rightarrow A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 + j\omega RC} = |A_v| \angle \varphi^\circ$$

که در آن:

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

$$\varphi = \text{Arctg}(-\omega RC)$$

رابطه نخست نشان می‌دهد که در فرکانس‌های پایین، وقتی که  $\omega RC \ll 1$  است  $|V_o/V_i| \approx 1$  خواهد بود. همچنین در فرکانس‌های بالا، وقتی که  $\omega RC \gg 1$  می‌باشد،  $|V_o/V_i| \approx 0$  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  $\varphi \approx 0^\circ$  بوده و در فرکانس‌های بالا  $\varphi \approx -90^\circ$  خواهد بود.

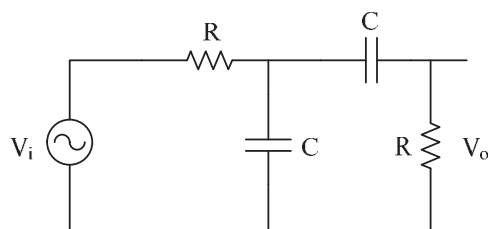


فرکانس قطع یا فرکانس نصف قدرت که با  $f_c$  نشان داده می‌شود، فرکانسی است که صافی پایین‌گذر فرکانس‌های بالاتر از آن را به شدت تضعیف می‌کند. در این فرکانس اندازه توان خروجی به نصف ماکزیمم توان خروجی می‌رسد (در این مدار ولتاژ خروجی به  $1/\sqrt{2}$  ولتاژ ورودی در فرکانس عبور کاهش می‌یابد). بنابراین فرکانس قطع برابر است با:

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

### ✓ 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:

$$A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC - \omega^2 R^2 C^2}$$

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

$$\varphi = 90^\circ - \text{Arctg}\left(\frac{\omega RC}{1 - \omega^2 R^2 C^2}\right)$$

در فرکانس‌های بالا ( $\omega RC \gg 1$ ) و همچنین در فرکانس‌های پایین ( $\omega RC \ll 1$ ) خواهیم داشت:  $|V_o/V_i| \approx 0$ ؛ 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  $f_c$  نشان می‌دهند. اختلاف بین دو فرکانس که در آنها خروجی به  $1/\sqrt{2}$  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:

$$\frac{d|A_v|}{d\omega} = 0 \Rightarrow \omega = \frac{1}{RC} \Rightarrow f_o = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$A_v(f_o) = \frac{j}{1 + 3j - 1} \Rightarrow A_v(f_o) = \frac{1}{3}$$

محاسبه پهنای باند به شکل زیر است:

$$|A_v| = \frac{1}{3\sqrt{2}} \Rightarrow R^2 C^2 \omega^4 - 11 R^2 C^2 \omega^2 + 1 = 0$$

$$BW = f_1 - f_2, \quad f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi}, \quad f_2 = \frac{\omega_2}{2\pi}$$

$$(\omega_1 - \omega_2)^2 = \omega_1^2 + \omega_2^2 - 2\omega_1\omega_2 = \frac{11}{R^2 C^2} - 2 \frac{1}{R^2 C^2} \Rightarrow \omega_1 - \omega_2 = \frac{3}{RC}$$

$$BW = \frac{3}{2\pi RC}, \quad \omega_1 = \frac{3/3}{RC}, \quad \omega_2 = \frac{0/3}{RC}$$

### ✓ منحنی‌های لیسازو و اندازه‌گیری دامنه و اختلاف فاز

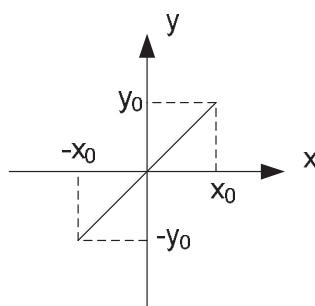
یکی از روشهای بدست آوردن پاسخ فرکانسی یک مدار استفاده از اشکال لیسازو است. تصاویر لیسازو تصاویری هستند که در آنها یک موج بر حسب موج دیگر ترسیم می‌شود به گونه‌ای که متغیر زمان از معادلات شکل موج حذف شود. به کمک این تصاویر می‌توان اختلاف فاز میان دو موج سینوسی هم فرکانس و نیز نسبت فرکانسی دو موج سینوسی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

دو موج سینوسی  $x = x_o \sin \omega t$  و  $y = y_o \sin(\omega t + \varphi)$  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  $\varphi = 0$

$$\begin{cases} x = x_o \sin \omega t \\ y = y_o \sin \omega t \end{cases} \Rightarrow y = \frac{y_o}{x_o} x$$

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 (۴-۸)

ب: دو شکل موج دارای اختلاف فاز برابر  $\pi/2$  هستند یعنی  $\varphi = \pi/2$ .

$$\begin{cases} x = x_0 \sin \omega t \\ y = y_0 \sin(\omega t + \pi/2) = y_0 \cos \omega t \end{cases}$$

با حذف زمان از معادلات فوق رابطه زیر بدست می آید:

$$\left(\frac{x}{x_0}\right)^2 + \left(\frac{y}{y_0}\right)^2 = 1$$

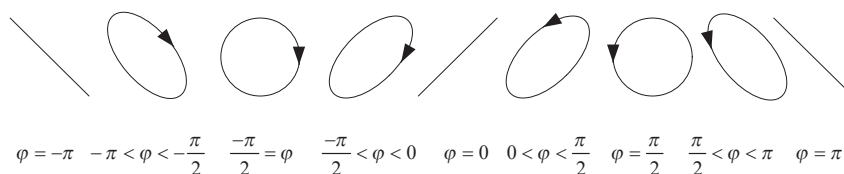
که نشان دهنده یک بیضی است که اقطار آن در امتداد محورهای  $x$  و  $y$  می باشد (بیضی استاندارد). در همین حالت اگر دامنه دو موج با هم برابر باشد  $x_0 = y_0 = a$ ، در این صورت تصویر حاصل یک دایره به شعاع  $a$  خواهد بود.

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

$$\begin{cases} x = x_0 \sin \omega t \\ y = y_0 \sin(\omega t + \pi) = -y_0 \sin \omega t \end{cases} \Rightarrow y = -\frac{y_0}{x_0} x$$

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

در شکل زیر تصاویر مختلف حاصل برای مقادیر مشخصی از  $\varphi$  نشان داده شده است. علامت فلش روی این نمودارها مربوط به جهت حرکت الکترون‌ها روی صفحه اسیلوسکوپ می باشد.

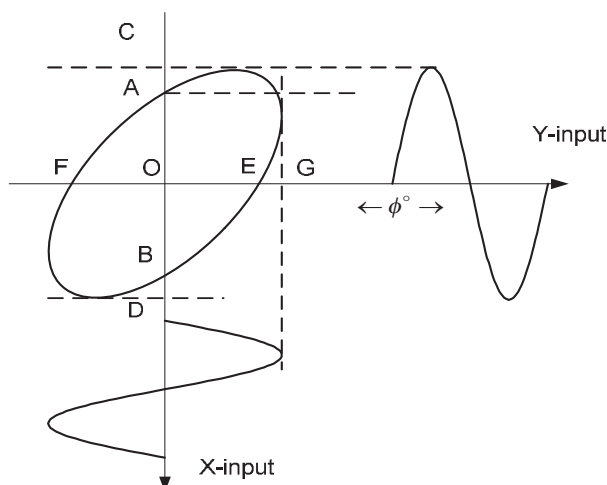


شکل (۵-۸)



### اختلاف فاز:

اکنون فرض می‌کنیم که دو موج دارای فرکانس برابر و اختلاف فاز آنها  $0 < \phi < \pi/2$  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)

$$\begin{cases} x = x_0 \sin \omega t = 0 \Rightarrow \omega t = k\pi \\ y = y_0 \sin(\omega t + \phi) \Rightarrow y = y_0 \sin(k\pi + \phi) = \pm y_0 \sin \phi \end{cases}$$

به این ترتیب داریم:

$$y|_{x=0} = y_0 \sin \phi \Rightarrow \phi = \text{Arc sin} \left( \frac{y_{x=0}}{y_0} \right)$$

اگر در نظر بگیریم که  $y_{x=0} = \alpha$  و  $y_0 = \beta$  باشد، اختلاف فاز خواهد شد:  $\phi = \text{Arc sin} \left( \frac{\alpha}{\beta} \right)$   
 دقت کنید که در اندازه‌گیری اختلاف فاز دو موج سینوسی با کمک تصاویر لیسازو نقطه نورانی اسیلوسکوپ باید در مبدأ و وسط صفحه تنظیم شود.

### اندازه‌گیری فرکانس مجهول:

اگر  $f_x$  فرکانس یک موج سینوسی  $x = x_0 \sin \omega_x t$  و  $f_y$  فرکانس موج سینوسی  $y = y_0 \sin \omega_y t$  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 افقی به تعداد نقاط ماکزیمم در جهت محور قائم می‌باشد.

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



## پیش‌گزارش

\* با توجه به شکل (۲-۸) و مقادیر  $R=10\ K\Omega$  و  $C=100\ nF$  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  $159/5$  هرتز و دامنه  $4$  ولت محاسبه کنید. فرکانس  $159/5$  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 *Spice*، 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 (۲-۸) رسم کنید. خروجی از دو سر خازن دیده شود. (فرکانس قطع روی نمودار مشخص گردد).

\* با توجه به شکل (۱-۸) و مقادیر  $R=10\ K\Omega$  و  $C=100\ nF$  به سؤالات زیر پاسخ دهید:

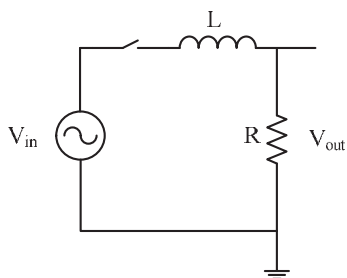
- ۵- فرکانس قطع یا فرکانس نصف قدرت  $f_c$  را برای فیلتر بالاگذر با مقادیر داده شده حساب کنید.
- ۶- مانند پیش‌گزارش ۱ به کمک نرم افزار *Spice*، منحنی نمایش تغییرات  $|V_o/V_i|$  و منحنی تغییرات  $(\angle V_o - \angle V_i) = \varphi$  را نسبت به فرکانس برای فیلتر بالاگذر شکل (۱-۸) با مقادیر داده شده رسم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

\* با توجه به فیلتر میانگذر شکل (۳-۸) و مقادیر  $R=10\ K\Omega$  و  $C=100\ nF$  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 *Spice*، 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 (۳-۸) 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  $R=500\ \Omega$  و  $L=22\text{ mH}$  به سوالات زیر پاسخ دهید:



شکل (۷-۸)

۹- فرکانس قطع یا فرکانس نصف قدرت  $f_c$  را برای فیلتر پایین‌گذر شکل (۸-۴) با مقاومت  $R=500\ \Omega$  و سلف ۲۲ میلی‌هانری حساب کنید (با ذکر روابط).

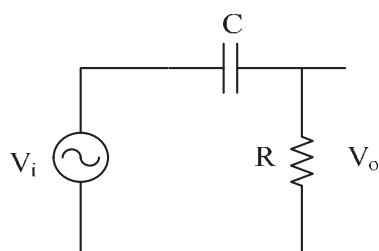
۱۰- به کمک نرم افزار *Spice*، منحنی نمایش تغییرات  $|V_o/V_i|$  و منحنی تغییرات  $(\angle V_o - \angle V_i) = \varphi$  را نسبت به فرکانس برای مدار شکل (۷-۸) با مقادیر  $R=500\ \Omega$  و سلف ۲۲ میلی‌هانری رسم کنید. (فرکانس قطع روی نمودار مشخص گردد).



## شرح آزمایش

### ✓ فیلتر بالاگذر: بررسی پاسخ فرکانسی RC

با استفاده از  $R=10\text{ K}\Omega$  و  $C=100\text{ nF}$  فیلتر بالاگذری مطابق شکل (۸-۱۱) 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.

ب- در جدول زیر سطر مربوط به  $V_0$  محاسبه شده و  $\phi$  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.

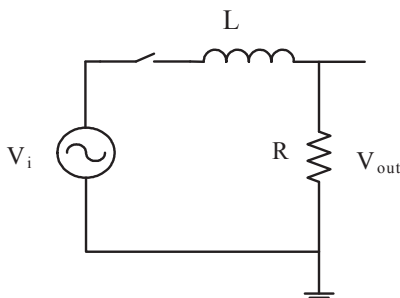
| فرکانس $f$ (Hz)        | ۵۰ | ۱۰۰ | ۱۵۰ | ۵۰۰ | ۱۰۰۰ | ۱۰,۰۰۰ |
|------------------------|----|-----|-----|-----|------|--------|
| $V_0$ اندازه‌گیری شده  |    |     |     |     |      |        |
| $\phi$ اندازه‌گیری شده |    |     |     |     |      |        |
| $V_0$ محاسبه شده       |    |     |     |     |      |        |
| $\phi$ محاسبه شده      |    |     |     |     |      |        |





### ✓ فیلتر پایین‌گذر: بررسی پاسخ فرکانسی RL

با استفاده از مقاومت  $R=500\Omega$  و  $L=22\text{mH}$  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  $\phi$  بین موج ورودی و خروجی را بوسیله اسیلوسکوپ یافته و یادداشت کنید. اختلاف فاز  $\phi$  بین موج ورودی و خروجی را به کمک منحنی‌های لیسازو (اندازه‌گیری  $\alpha, \beta$ ) 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  $\phi$  محاسبه شده از طریق روابط تئوری را در گزارش کار نهایی کامل کنید و با نتایج آزمایش مقایسه کنید.

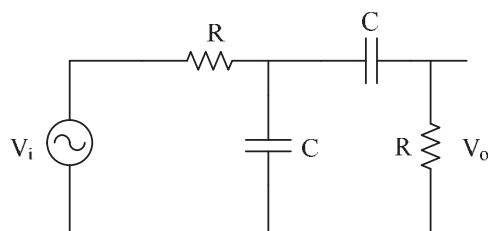
ج- فرکانس قطع این فیلتر را به کمک اسیلوسکوپ اندازه گرفته و با نتیجه تئوری مقایسه کنید.

| فرکانس $f$ (Hz)                              | ۱۰۰ | ۵۰۰ | ۱۰۰۰ | ۳۰۰۰ | ۱۰,۰۰۰ | ۲۰,۰۰۰ |
|--|-----|-----|------|------|--------|--------|
| $\alpha$ اندازه‌گیری شده                     |     |     |      |      |        |        |
| $\beta$ اندازه‌گیری شده                      |     |     |      |      |        |        |
| $V_0$ اندازه‌گیری شده                        |     |     |      |      |        |        |
| $\phi = \text{Arcsin}(\frac{\alpha}{\beta})$ |     |     |      |      |        |        |
| $V_0$ محاسبه شده                             |     |     |      |      |        |        |
| $\phi$ محاسبه شده                            |     |     |      |      |        |        |



### ✓ فیلتر میان‌گذر

با استفاده از  $R=10\text{ K}\Omega$  و  $C=100\text{ nF}$  فیلتر میان‌گذری مطابق شکل (۸-۱۳) 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  $\phi$  محاسبه شده از طریق روابط تئوری را در گزارش کار تحویلی کامل کنید.

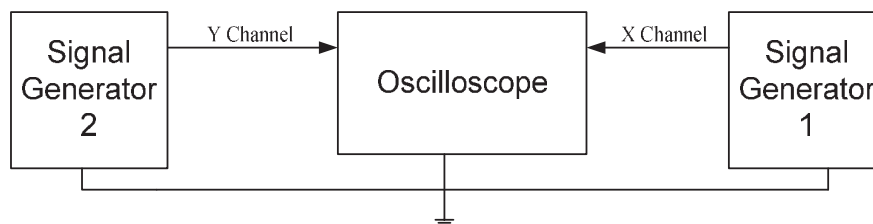
ب - مقدار ماکزیمم دامنه خروجی، فرکانس مرکزی، فرکانس قطع بالا، فرکانس قطع پایین و پهنای باند را به کمک اسیلوسکوپ اندازه گرفته و با نتایج تئوری مقایسه کنید.

| فرکانس $f$ (Hz)        | ۲۵ | ۵۰ | ۱۰۰ | ۱۵۰ | ۲۰۰ | ۵۰۰ | ۱۰۰۰ |
|------------------------|----|----|-----|-----|-----|-----|------|
| $V_0$ اندازه‌گیری شده  |    |    |     |     |     |     |      |
| $\phi$ اندازه‌گیری شده |    |    |     |     |     |     |      |
| $V_0$ محاسبه شده       |    |    |     |     |     |     |      |
| $\phi$ محاسبه شده      |    |    |     |     |     |     |      |



### ✓ اندازه‌گیری فرکانس مجهول و منحنی‌های لیسازو

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 (۸-۱۴) به دو نوسان‌ساز موج سینوسی مجزا متصل کنید. اسیلوسکوپ را در مد  $XY$  قرار دهید. سعی کنید با تغییر فرکانس منبع معلوم و مشاهده منحنی‌های لیسازو، 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 ضربی از فرکانس ثابت مفروض قرار دهید که این ضرایب شامل ۱، ۲ و ۳ می‌باشد. شکل‌های حاصل را ترسیم نمایید. چرا منحنی‌های لیسازو در این حالات بر روی صفحه ثابت نمی‌شوند؟ معادله منحنی‌های لیسازو را در حالت ضرایب فرکانسی ۲ و ۳ هنگامی که به یک تابع تبدیل می‌شوند بدست آورید.



## آزمایش ۹

پاسخ فرکانسی مدارهای مرتبه دوم



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.

## مقدمات

### ✓ پاسخ فرکانسی مدار RLC سری

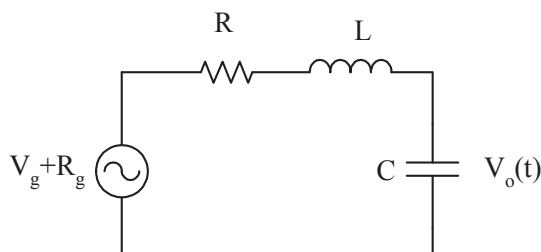
مدار  $RLC$  سری را می توان برای نمایش بسیاری از شبکه ها به کار برد. ترکیب سری و یا موازی اجزای  $L$ ،  $R$  و  $C$  دارای یک پاسخ طبیعی با فرکانس طبیعی معینی می باشد. هنگامی که این مدارها با یک منبع سینوسی که فرکانس آن برابر و یا نزدیک به فرکانس طبیعی مدار است تحریک می شوند اثر جالبی از آنها بروز می کند، که به پدیده تشدید موسوم است. در این آزمایش مدار تشدید سری  $RLC$  را مورد بررسی قرار می دهیم.

### الف: خروجی ولتاژ خازن

شکل زیر مدار  $RLC$  سری را نشان می دهد که خروجی از دو سر خازن گرفته شده است. هنگامی که نوسان ساز تغییر می کند و ولتاژ آن ثابت می ماند، پاسخ مدار و یا جریان  $I$  تغییر می کند. امپدانس مدار که از دو سر منبع دیده می شود برابر است با:

$$Z = R_t + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$

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



شکل (۹-۱)

بررسی رابطه فوق نشان می دهد که در فرکانس:

$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{LC}} \Rightarrow f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

امپدانس مدار به حداقل مقدار خود یعنی  $Z = Z_s = R_t$  کاهش می یابد. 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 می آید، 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:

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

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

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 می دهند 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 می کند.

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

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

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

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

در فرکانس های بسیار پایین  $|A_v| \approx 1$  می باشد. همانطور که قبلاً گفته شد در صورتیکه  $|A_v| > 1$  باشد مدار بصورت یک تقویت کننده عمل می نماید، لذا در فرکانس مشخصی باید ولتاژ خازن به ماکزیمم مقدار برسد. برای محاسبه مقدار ماکزیمم ولتاژ خازن از  $|A_v|$  نسبت به  $\omega$  مشتق می گیریم:

$$|A_v|' = \frac{d|A_v|}{d\omega} = 0 \Rightarrow \omega_1 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R_t^2}{4L^2}} \Rightarrow f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R_t^2}{4L^2}}$$

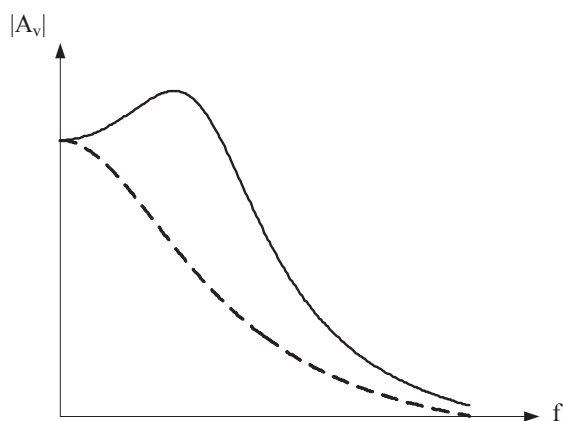
$$f_1 < f_s$$

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

شرط  $Q_s > 1$  همان  $R_t^2 < \frac{L}{C}$  است ولی شرط وجود نقطه ماکزیمم برای ولتاژ خازن  $R_t^2 < \frac{4L}{C}$  می باشد.

مشخصه پاسخ دامنه برای ولتاژ خازن بصورت یک فیلتر پایین گذر می باشد و در بعضی از حالتها با برقراری

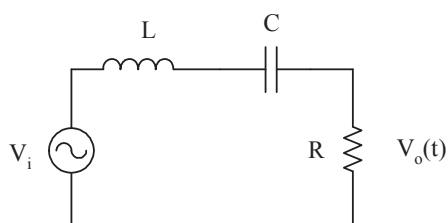
شرط  $R_t^2 < \frac{4L}{C}$  دارای یک ماکزیمم نیز خواهد بود.



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 می توان 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:

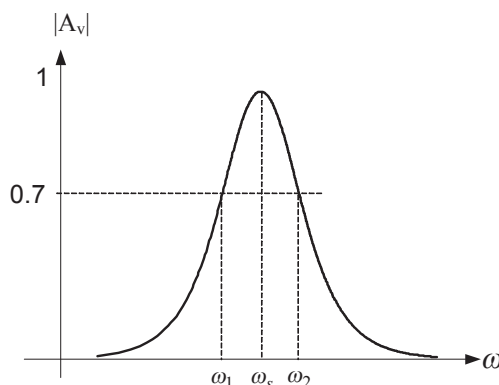
$$|A_v| = \frac{1}{\sqrt{1 + Q_s^2\left(\frac{\omega}{\omega_s} - \frac{\omega_s}{\omega}\right)^2}}$$

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



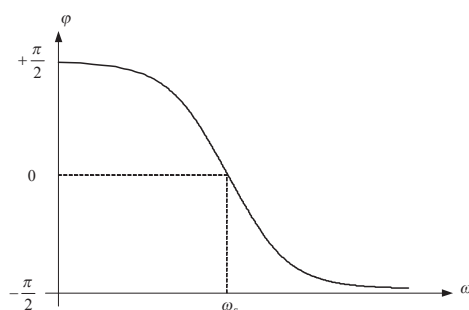
روابط فوق نشان می‌دهند که وقتی فرکانس منبع برابر  $\omega = \omega_s$  باشد،  $\left| \frac{V_o}{V_i} \right| = 1$  است و برای فرکانس  $\omega < \omega_s$  و  $\omega > \omega_s$  با فرض  $Q_s > 1$  ولتاژ خروجی تقریباً صفر است.  $\left( \left| \frac{V_o}{V_i} \right| \approx 0 \right)$  شکل زیر منحنی نمایش پاسخ دامنه را نشان می‌دهد. نقاط  $\omega_1$  و  $\omega_2$  در این شکل حائز اهمیت زیادی هستند. نقاط  $\omega_1$  و  $\omega_2$  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  $3 \text{ dB}$  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  $\omega_1$  تا  $\omega_2$  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.



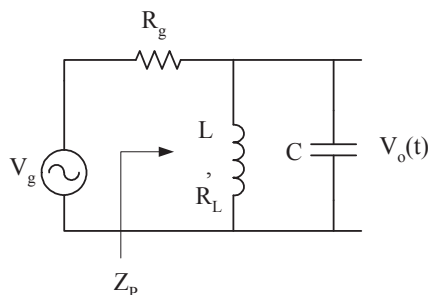
شکل (۹-۵)





## ✓ پاسخ فرکانسی مدار RLC موازی

مدار RLC موازی را به شکل زیر در نظر می گیریم.



شکل (۹-۶)

از ویژگیهای حالت تشدید در مدار آن است که  $V_o$  ماکزیمم،  $Z_p$  کاملاً مقاومتی و  $V_g$  و  $V_o$  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 می شود. ادمیتانس مدار موازی عبارت است از:

$$Y = Y_L + Y_C$$

$$Y = \frac{1}{R_L + j\omega L} + j\omega C$$

$$\Rightarrow Y = \frac{R_L}{R_L^2 + \omega^2 L^2} - j \left( \frac{\omega L}{R_L^2 + \omega^2 L^2} - \omega C \right)$$

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

$$\omega_p = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left( \frac{R_L}{L} \right)^2}$$

رابطه فوق به صورت زیر نیز نوشته می شود:

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

که در آن  $\omega_s$  فرکانس تشدید مدار سری RLC است و  $Q_s = \frac{L\omega_s}{R_L}$  ضریب کیفیت مدار سری در فرکانس تشدید  $\omega_s$  است. بدیهی است که برای مقادیر بزرگ  $Q_s$  فرکانس مدار تشدید موازی  $\omega_p$  برابر  $\omega_s$  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:

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

برای مقادیر بزرگ  $Q_p$  می توان نوشت:

$$Z_p = R_L Q_p^2$$

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad Q_s \gg 1$$

$$Z_p = \frac{L}{CR_L} \quad Q_s, Q_p \gg 1$$

با این ترتیب با انتخاب مناسب  $L$  و  $C$  می توان مقاومت های ورودی متفاوتی بدست آورد. بدیهی است که اگر  $Z_p = R_g$  باشد ماکزیمم مقدار قدرت از منبع به بار منتقل می شود. 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 می توان گفت که مدار بصورت یک تقویت کننده جریان عمل می کند. از این روست که در ورودی گیرنده های رادیویی یا تلویزیونی عموماً از مدار تشدید موازی استفاده می کنند. (آنتن ها به منزله منبع جریان هستند)

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

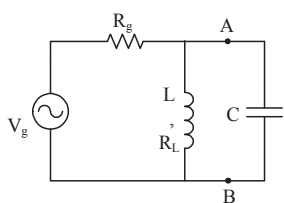
$$A_V = \frac{V_C}{V_g} = \frac{Z_p}{Z_p + R_g}$$

نظر به اینکه در فرکانس تشدید  $Z_p$  ماکزیمم مقدار خود را داراست لذا ولتاژ خروجی به حداکثر مقدار خود می رسد. در فرکانس های 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:

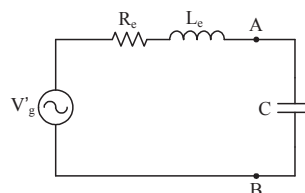
$$BW = \frac{\omega_p}{Q_p}$$



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



مدار موازی



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

شکل (۹-۷)

$$\begin{cases} V'_g = \frac{R_L + j\omega L}{R_g + R_L + j\omega L} V_g \\ R_e = \frac{R_g (R_g R_L + R_L^r + \omega^r L^r)}{(R_g + R_L)^r + \omega^r L^r} \\ L_e = \frac{R_g^r L}{(R_g + R_L)^r + \omega^r L^r} \end{cases}$$

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

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

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

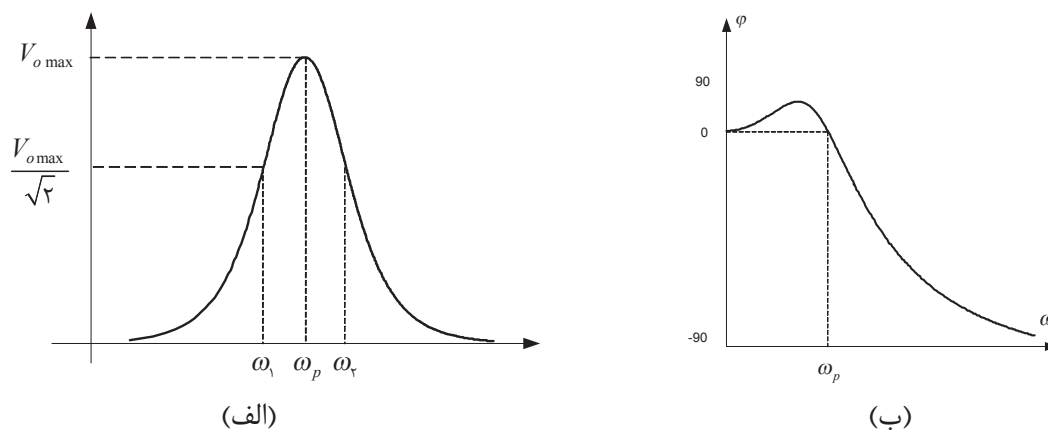
$$BW = \frac{R_L}{L} \left( 1 + \frac{R_L}{R_g} + \frac{\omega_s^r L^r}{R_g R_L} \right)$$

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

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 می شود معنای درستی ندارد. در حالیکه در شکل فوق چون  $V'_g$  تابعی از فرکانس است لذا مشخصه پاسخ دامنه در دو سر  $A$  و  $B$  به صورت یک فیلتر میان گذر خواهد بود.



فرمول پنهایی 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.



شکل (۸-۹)



## پیش‌گزارش

- 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  $3\text{ dB}$ ، 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  $C = 3/3\text{ nF}$  و  $L = 18\text{ mH}$  و مقاومت  $1\text{ K}\Omega$  و  $3\text{ K}\Omega$  محاسبه کنید.
- ۶- به کمک نرم افزار *Spice*، منحنی نمایش تغییرات  $\left| \frac{V_o}{V_i} \right|$  نسبت به فرکانس را که به مشخصه پاسخ دامنه و منحنی تغییرات  $\phi$  نسبت به فرکانس را که به مشخصه فاز موسوم است، برای فیلتر میان‌گذر مدار  $RLC$  سری با مقادیر داده شده در شکل (۹-۹)، 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 *Spice*، منحنی نمایش تغییرات  $\left| \frac{V_o}{V_i} \right|$  نسبت به فرکانس را که به مشخصه پاسخ دامنه و منحنی تغییرات  $\phi$  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  $R: 1\text{ K}\Omega, 3\text{ K}\Omega, 7\text{ K}\Omega, 10\text{ K}\Omega$ ، روی یک نمودار رسم کرده و منحنی‌ها را توجیه کنید. در کدام حالت ماکزیمم تقویت‌کنندگی ولتاژ دیده می‌شود؟
- ۸- در مدار  $RLC$  سری شکل (۹-۹) 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 *Spice* 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).

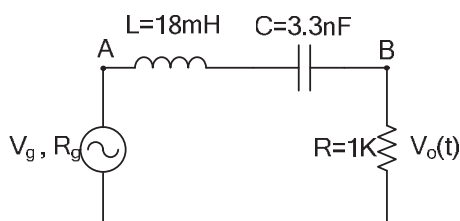
۱۲- فرکانس تشدید و ضریب کیفیت  $Q$  را برای مدار  $RLC$  موازی به ازای  $C = 3/3 \text{ nF}$  و  $L = 18 \text{ mH}$  و مقاومت  $7 \text{ K}\Omega$  محاسبه کنید.

## 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  $\times 1000$  به جای مقاومت  $R$  استفاده کنید).



شکل (۹-۹)

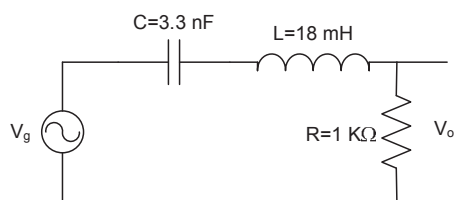
۱- حال فرکانس منبع را تغییر دهید تا جریان مدار ماکزیمم شود. در این حالت (تشدید)، مدار مقاومتی بوده و اگر سلف  $L$  ایده‌آل باشد ولتاژ دو سر  $AB$  صفر خواهد شد. اما چون در عمل سلف ایده‌آل نیست ماکزیمم جریان با می‌نیمم شدن ولتاژ دو سر  $AB$  حاصل می‌شود. در این حالت فرکانس تشدید،  $f_s$ ، با ماکزیمم شدن  $V_R$  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 می‌دهیم. 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 می‌کنیم. از نوسان‌ساز با امپدانس کم استفاده کنید.



شکل (۱۰-۹)



۴- با توجه به رابطه تقریبی  $Q_s \approx \frac{\omega_0}{BW} = \frac{f_0}{f_r - f_1}$  و به ازای  $R = 1 K\Omega$  و  $R = 3 K\Omega$  مقادیر  $(f_r - f_1)$

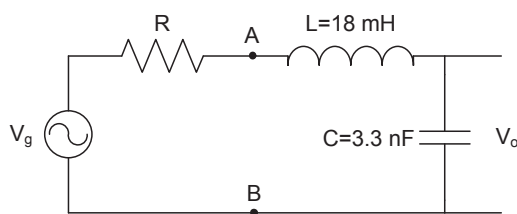
و  $f_0$  را اندازه گرفته و برای هر کدام مقدار  $Q_s$  را محاسبه کنید، سپس آن را با مقدار محاسبه شده در پیش گزارش مقایسه کنید.  $f_0$  فرکانس تشدید و  $(f_r - f_1)$  پهنای باند مدار می باشد.

۵- به ازای  $R = 1 K\Omega$  انتظار می رود پاسخ دقیق تری بدست آورید. چرا؟

۶- چرا در ابتدای آزمایش از شما خواسته شده که از نوسان ساز با امپدانس کم استفاده کنید؟

### 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 (۹-۱۱)

۷- ابتدا به ازای  $R = 7 K\Omega$  با تغییر فرکانس نوع فیلتر را مشخص کنید.

نکته :

a- اگر  $R^2 > \frac{L}{C}$  باشد : (۱) اندازه دامنه ولتاژ  $V_C$  در فرکانسی غیر از فرکانس صفر مقدار ماکزیمم ندارد،

(۲)  $Q_s < 1$ ، در نتیجه مدار به صورت تقویت کننده ولتاژ عمل نمی کند .

b- اگر  $\frac{L}{C} < R^2 < \frac{L}{C}$  باشد : (۱) اندازه دامنه ولتاژ  $V_C$  در فرکانسی غیر از فرکانس صفر مقدار ماکزیمم

دارد، (۲)  $Q_s < 1$ ، در نتیجه مدار در محدوده خاصی از فرکانس که شامل فرکانس تشدید نمی شود تقویت کنندگی ولتاژ خواهد داشت.

c- اگر  $R^2 < \frac{L}{C}$  باشد : (۱) اندازه دامنه ولتاژ  $V_C$  در فرکانسی غیر از فرکانس صفر مقدار ماکزیمم دارد.

(۲)  $Q_s > 1$ ، در نتیجه در فرکانس تشدید هم، مدار به صورت تقویت کننده ولتاژ عمل می کند. به ازای  $R$  های خیلی کوچک فرکانس ماکزیمم شدن دامنه  $V_C$  و فرکانس تشدید مدار بر هم منطبق می شود و بیشترین تقویت کنندگی ولتاژ نیز در همین حالت و در دو سر خازن یا سلف اتفاق می افتد.

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  $V_C$  در فرکانس تشدید اتفاق می افتد.





- ۸- مقاومت مدار را در حالت‌های  $7\text{ K}\Omega$ ،  $3\text{ K}\Omega$ ،  $1\text{ K}\Omega$  و  $0\text{ K}\Omega$  قرار داده و در هر حالت فرکانس تشدید، دامنه ولتاژ خازن در فرکانس تشدید، فرکانس ماکزیمم شدن دامنه ولتاژ خازن و دامنه ولتاژ خازن را در فرکانس مورد نظر اندازه بگیرید و سپس مقادیر اندازه‌گیری شده را با هم مقایسه کرده و درستی نکته بیان شده در بخش ۷ را تحقیق کنید.
- ۹- ماکزیمم تقویت‌کنندگی ولتاژ به ازای چه مقاومتی اتفاق می‌افتد؟ مقدار ولتاژ خروجی را در این حالت بخوانید و با دامنه ورودی مقایسه کنید.



## آزمایش ۱۰

تطبيق امپدانسى و تايمر ۵۵۵

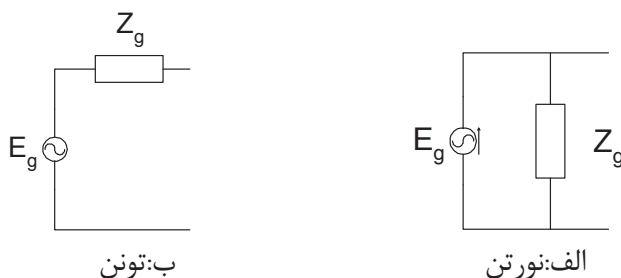


هدف از این آزمایش آشنایی با نحوه تطبیق مدارهایی با مقاومت ورودی معین به منبعی با مقاومت ورودی معین است. بدین منظور می‌توان از یک مدار  $LC$  بین این دو بخش استفاده نمود. در قسمت بعد با عملکرد مداری تایمر ۵۵۵ آشنا می‌شوید.

## مقدمات

### ✓ اندازه‌گیری امپدانس داخلی منبع

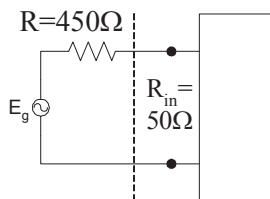
همانطور که می‌دانید مقاومت داخلی (یا امپدانس) منبع ولتاژ، تأثیر زیادی بر روی برخی مدارها دارد و چنانچه مقاومت داخلی منبع ولتاژ کوچکتر باشد مزیت بیشتری دارد. در این آزمایش مقاومت و یا امپدانس داخلی منبع ولتاژ به کار برده شده را تعیین می‌کنیم. معمولاً در اندازه‌گیری‌های سعی می‌شود که از مدل تونن (یا نورتن) منابع بدست آمده و در محاسبات به کار برده شود. شکل زیر این مدلها را نشان می‌دهد. برای پی بردن به اهمیت این موضوع فرض کنیم که یک منبع ولتاژ ۱۰۰ ولتی دارای مقاومت داخلی ۴۵۰ اهم باشد. اگر مقاومت ورودی شبکه مصرف‌کننده ۵۰ اهم باشد در این صورت ولتاژی که به دو سر بار مصرفی می‌رسد عبارت است از:



شکل (۱۰-۱)

$$V_{load} = V_{ab} = \frac{50}{450 + 50} \times 100 = 10 \text{ V}$$

به این ترتیب ۱۰ درصد ولتاژ منبع در دو سر بار ظاهر می‌شود. بنابراین باید سعی شود که مقاومت داخلی منبع خیلی کوچک باشد تا اتلاف انرژی در دو سر مقاومت داخلی به حداقل برسد. نکته قابل توجه دیگر در انتقال توان ماکزیمم به بار است. بطوریکه می‌دانیم بایستی  $R_{load} = R_{in}$  باشد تا این امر صورت پذیرد. برای همین منظور لازم است که برخی اوقات تغییراتی برای تطبیق و هماهنگی مقاومت بار با مقاومت داخلی منبع در مدار داده شود که مساله تطبیق امپدانس مطرح می‌شود. لذا برای آزمایش فوق بایستی که مقاومت داخلی منبع را بشناسیم.



شکل (۱۰-۲): شبکه مصرف و منبع ۴۵۰ اهمی



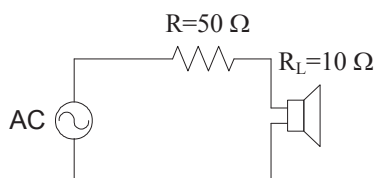
## ✓ تطبیق امپدانس

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



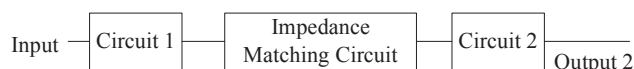
شکل (۱۰-۳)

اگر امپدانس ورودی مدار دوم با امپدانس خروجی مدار اول مطابق نباشد، توان لازم به مدار دوم و خروجی ۲ منتقل نمی‌شود. مثلاً اگر یک بلندگو به امپدانس ۱۰ اهم را به خروجی مداری به امپدانس ۵۰ اهم وصل کنیم تنها  $\frac{1}{5}$  توان به بار می‌رسد و  $\frac{5}{6}$  آن در امپدانس خروجی تلف می‌شود.



شکل (۱۰-۴)

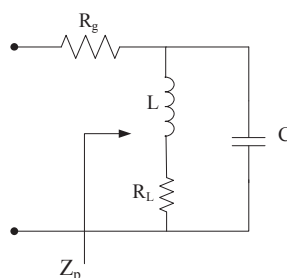
بنابراین در اتصال دو مدار به هم باید در تطابق امپدانس آنها دقت کرد. در صورت عدم تطابق با قرار دادن مدارهای واسطه‌ای می‌توان تطبیق امپدانس ایجاد نمود.



شکل (۱۰-۵)

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  $\omega_p$  برابر است با:

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



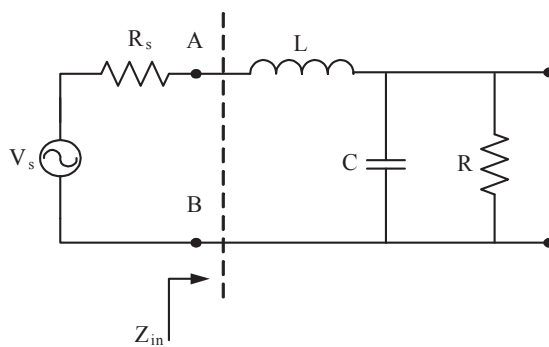
شکل (۱۰-۶)



می توان 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 نمی کنند، لذا توان منتقله در  $R_L$  مصرف خواهد شد. شرط تطبیق امپدانس  $Z_g = Z_{in}$  می باشد به طوریکه توان ماکزیمم به خروجی منتقل می شود و  $Z_{in}$  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 می کنیم. با محاسبه  $Z_{in}$  داریم:



شکل (۷-۱۰)

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

برای انتقال ماکزیمم توان شرط زیر باید برقرار باشد:

$$Z_{in} = \bar{R}_s$$

و از آنجا خواهیم داشت:

$$\text{Im}(Z_{in}) = 0 \quad \text{Re}(Z_{in}) = R_s$$

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

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

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

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

لذا مدار فوق برای حالتی بکار می رود که مقاومت بار بزرگتر از مقاومت منبع باشد.



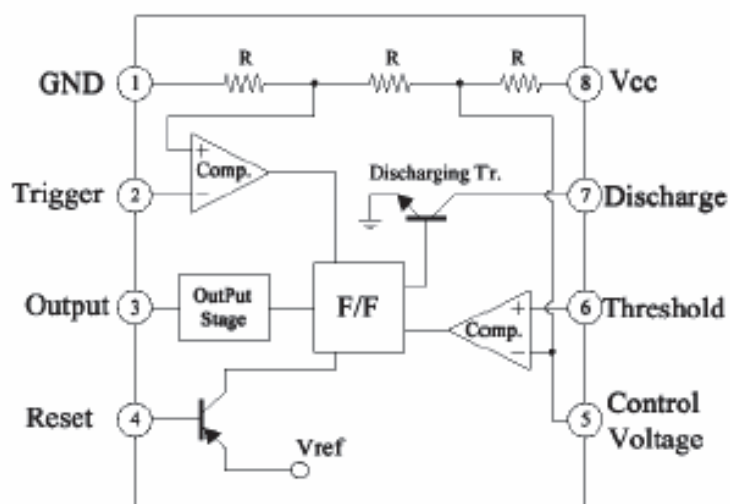
در مسائل روزمره  $R$  و  $R_s$  مشخص هستند و فرکانسی که در آن توان ماکزیمم باید انتقال یابد نیز معلوم می باشد لذا از روابط فوق  $L$  و  $C$  محاسبه می شوند. با این وجود در آزمایشگاه به دلیل محدودیت در مقادیر سلفهای موجود، سلف برابر ۱۸ میلی هانری انتخاب می شود به این ترتیب خازن لازم و فرکانسی که در آن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

### ✓ عملکرد تایمر ۵۵۵

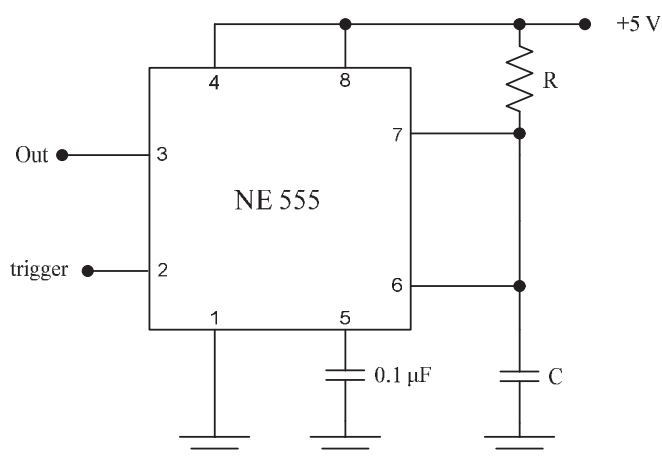
آی سی ۵۵۵ به آی سی تایمر نیز معروف است ( شکل (۱۰-۸)) و انواع تایمرها و نوسان سازها را می توان به وسیله آن تحقق بخشید. مدار موجود به صورت نوسان ساز کار می کند و با توجه به مقادیر  $C$  و  $R$  فرکانس نوسان را می توان تعیین کرد، بدین ترتیب که مدت زمان یک یا صفربودن پالسهای خروجی این آی سی با یک خازن تعیین می شود 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 می توان با دقت زیاد محاسبه کرد.

### عملکرد *Astable*:

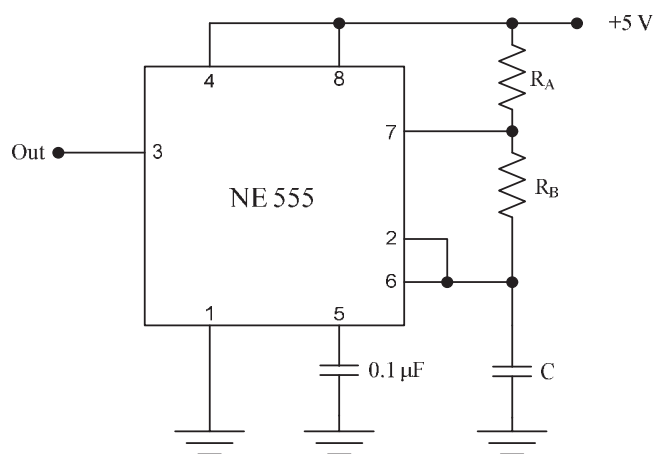
عملکرد *AstableTimer* با اضافه کردن مقاومت  $R_b$  به شکل (۱۰-۹) و ایجاد ترکیب شکل (۱۰-۱۰) بدست می آید. در یک عملکرد *Astable*، ترمینال *trigger* و ترمینال *threshold* برای تشکیل یک *self-trigger* متصل شده اند که به عنوان یک نوسانگر چندگانه عمل می کند. زمانیکه خروجی تایمر *high* است، دشارژ ورودی  $T_r$  خاموش شده و  $V_C$  با یک تابع نمایی با ثابت زمانی  $(R_A + R_B)C$  افزایش پیدا می کند. زمانیکه  $V_C$  یا ولتاژ *threshold* به  $\frac{2}{3}V_{CC}$  می رسد، خروجی *comparator* در ترمینال *threshold*، *high* می شود،  $F/F$ ، *reset* شده و باعث می شود که خروجی *timer*، *low* شود. به نوبت، دشارژ  $T_r$  روشن شده و  $C_1$  از طریق کانال دشارژ ایجاد شده بوسیله  $R_B$  و دشارژ  $T_r$  تخلیه می شود. زمانیکه  $V_C$  کمتر از  $\frac{V_{CC}}{3}$  می شود، خروجی *comparator* در ترمینال *trigger*، *high* شده و خروجی *timer* دوباره *high* می شود؛ دشارژ  $T_r$  خاموش شده و  $V_C$  دوباره افزایش می یابد.



شکل (۸-۱۰)



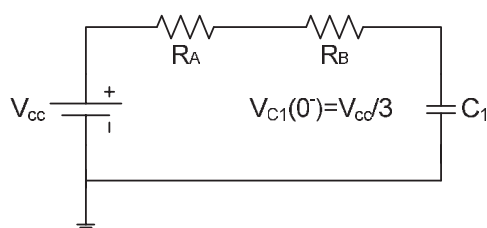
شکل (۹-۱۰)



شکل (۱۰-۱۰)



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



شکل (۱۰-۱۱)

$$C_1 \frac{dV_{C_1}}{dt} = \frac{V_{CC} - V_{C_1}}{R_A + R_B} \quad (۱)$$

$$V_{C_1}(0^+) = \frac{V_{CC}}{3} \quad (۲)$$

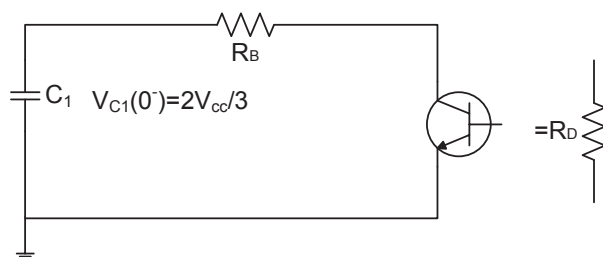
$$V_{C_1}(t) = V_{CC} \left[ 1 - \frac{2}{3} e^{-\frac{t}{(R_A + R_B)C_1}} \right] \quad (۳)$$

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

$$V_{C_1}(t) = \frac{2}{3} V_{CC} = V_{CC} \left[ 1 - \frac{2}{3} e^{-\frac{t_H}{(R_A + R_B)C_1}} \right] \quad (۴)$$

$$t_H = C_1 (R_A + R_B) \ln 2 = 0.693 (R_A + R_B) C_1 \quad (۵)$$

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



شکل (۱۰-۱۲)





$$C_1 \frac{dV_{C_1}}{dt} + \frac{1}{R_D + R_B} V_{C_1} = 0 \quad (6)$$

$$V_{C_1}(t) = \frac{2}{3} V_{CC} e^{-\frac{t}{(R_D + R_B)C_1}} \quad (7)$$

پس مدت زمانی که خروجی *timer* در حالت *low* قرار دارد ( $t_L$ ) برابر مقدار زمانی می باشد که  $V_{C_1}$  به  $\frac{1}{3} V_{CC}$  می رسد.

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

$$t_L = C_1 (R_D + R_B) \ln 2 = 0.693 (R_D + R_B) C_1 \quad (9)$$

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

$$t_L = 0.693 R_B C_1 \quad (10)$$

در نتیجه اگر *timer* در حالت *Astable* کار کند، دوره 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 می باشد.

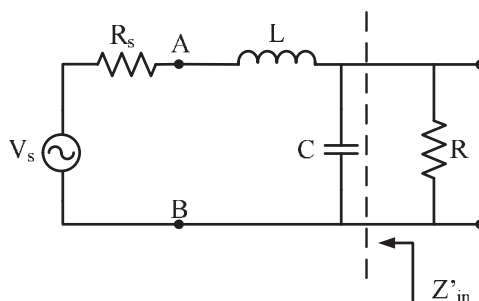
$$\Rightarrow f = \frac{1}{T} = \frac{1/44}{(R_A + 2R_B)C_1}$$



## پیش‌گزارش

- ۱- با توجه به مدار شکل (۷-۱۰) و مقادیر  $R = 10\text{ K}\Omega$  و  $R_S = 3/3\text{ K}\Omega$ ، برای مقادیر سلف  $18\text{ mH}$ ,  $22\text{ mH}$  و خازن  $C$  و فرکانس لازم برای تطبیق را حساب کنید.
- ۲- با توجه به سؤال قبل و شکل (۷-۱۰)، نمودار ولتاژ دو سر مقاومت بار  $R = 10\text{ K}\Omega$  و ولتاژ  $V_{AB}$  (دو سر نقاط  $B, A$ ) را در حوزه فرکانس برای سلف  $18\text{ mH}$ ,  $22\text{ mH}$  به کمک نرم افزار *spice* رسم کرده و شکل موجها را توجیه کنید. (۴ شکل موج)
- ۳- با توجه به شکل زیر، رابطه ای برای  $L, C$  بر حسب  $R, R_S$  بدست آورید به طوریکه داشته باشیم:  

$$Z'_{in} = \bar{R}$$
نتیجه را با روابط  $C\omega = \frac{1-\alpha}{\alpha} \cdot \frac{1}{R}$ ,  $\frac{L}{C} = \alpha R^2$  مربوط به شکل (۷-۱۰) مقایسه کنید. آیا شرط  $Z'_{in} = \bar{R}$  باعث انتقال توان ماکزیمم به بار  $R$  می‌شود؟ چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟



شکل (۱۰-۱۳)

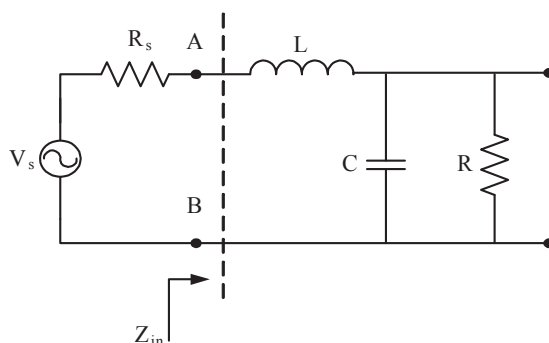
- ۴- در حالتی که مقاومت بار کمتر از مقاومت منبع باشد چگونه باید تطبیق را انجام داد؟
- ۵- برای مدار شکل (۱۰-۱۰) در حالت *Astable* با شرایط پالس  $1/386\text{ ms}$  و *duty cycle* برابر ۷۵٪ مقادیر  $R_A$  و  $R_B$  و  $C$  را محاسبه نمایید. (*duty cycle* نسبت  $t_H$  به  $T$  می‌باشد)
- ۶- برای تغییر مقادیر  $R_A$  و  $R_B$  و  $C$  چه کاری می‌توان انجام داد؟  
 الف) برای  $\text{duty cycle} = 50\%$  و فرکانس  $1\text{ KHz}$  مدار را طراحی کنید.  
 ب) برای  $\text{duty cycle} = 25\%$  و فرکانس  $1\text{ KHz}$  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.
- ۷- در صورت افزایش مقدار  $V_{CC}$  در شکل موج خروجی چه تغییری حاصل می‌شود؟
- ۸- مقادیر  $R_A$  و  $R_B$  و  $C$  را برای موجی با پریود ۱ ثانیه طراحی کنید.
- ۹- به کمک نرم افزار *spice* شکل موج پایه های ۶، ۷ و ۳ را در شکل (۱۰-۱۰) رسم نمایید.



## شرح آزمایش

✓ تطبیق امپدانسی

۱- مدار شکل زیر را ببندید. می‌توانیم توان ماکزیمم به مقاومت  $R = 10\text{ K}\Omega$  انتقال یابد. مقاومت منبع  $R_s = 3/3\text{ K}\Omega$  (با احتساب  $R_g$ ) و سلف موجود  $L = 18\text{ mH}$  و دامنه ولتاژ  $V_S = 2\text{ V}$  است. مقاومت  $R_s$  را خودتان در مدار قرار دهید. نزدیکترین مقدار خازن موجود به مقدار خازن محاسبه شده در پیش گزارش 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.



شکل (۱۰-۱۴)

۲- در گزارش کار نهایی، درصد خطای فرکانس تطبیق اندازه‌گیری شده نسبت به مقدار تئوری را حساب کرده و علت آن را توضیح دهید.

۳- به ازای فرکانس‌های مختلف به تعداد نقاط دلخواه دو سمت فرکانس  $f_m$  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.

|                               |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |
|-------------------------------|--|--|--|--|--|-------|--|--|--|--|--|
| $f\text{ (KHz)}$              |  |  |  |  |  | $f_m$ |  |  |  |  |  |
| $V_{o\text{ p-p}}\text{ (V)}$ |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |

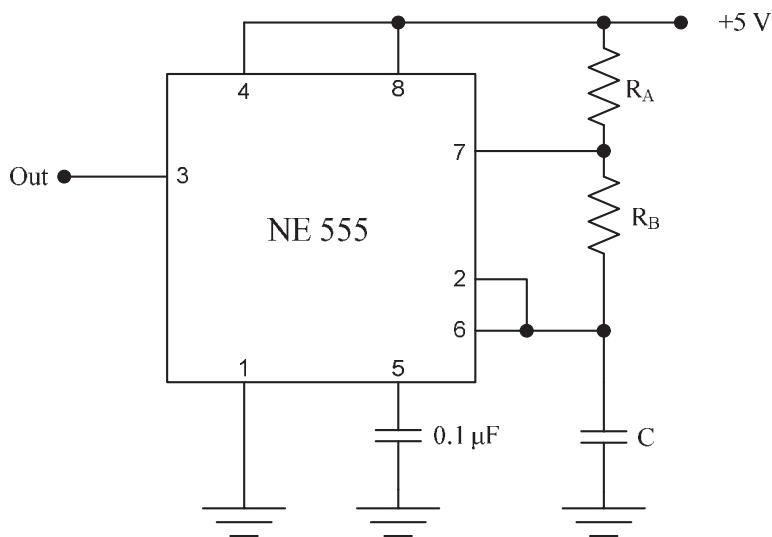
۴- قسمت‌های ۱، ۲ و ۳ را برای مقدار سلف  $L = 22\text{ mH}$  مجدداً تکرار کنید.

۵- برای قسمت ۴ توانی که به بار می‌رسد را یک بار بدون مدار تطبیق و بار دیگر با مدار تطبیق (با دامنه ولتاژ  $V_S = 2\text{ V}$ ) اندازه‌گیری و مقایسه نمایید.



### ✓ عملکرد تایمر ۵۵۵

۶- مدار شکل زیر را در حالت *Astable* با شرایط پالس  $1/386\text{ ms}$  ؛ *duty cycle* برابر ۷۵٪ و قراردادن  $R_A = 1\text{ K}\Omega$  و  $R_B = 500\text{ }\Omega$  و  $C$  برابر ۱ میکروفاراد ببندید.



شکل (۱۰-۱۵)

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.

۷- آزمایش بالا را با  $R_A = 4/7\text{ K}\Omega$  و  $R_B = 22\text{ K}\Omega$  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 سه فاز



هدف از این آزمایش آشنایی با مدارهای سه فاز می باشد که در صنعت از اهمیت فوق العاده ای برخوردار می باشند. در این آزمایش با دو ساختار متفاوت مدارهای سه فاز یعنی ستاره و مثلث آشنا می شوید. ولتاژ، جریان و توان خط و فاز را اندازه گرفته و روابط آنها را بدست می آورید. در نهایت اهمیت سیم نول و مدارهای متعادل و نامتعادل را بررسی خواهید کرد.

## مقدمات

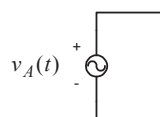
### ✓ مروری بر مدارهای سه فاز

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

### ۱- تولید ولتاژها و جریانهای سه فاز

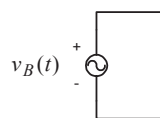
یک مولد سه فاز تشکیل شده است از سه مولد تک فاز که ولتاژ هر کدام از نظر مقداری مساوی بوده و نسبت به هم  $120^\circ$  اختلاف فاز دارند. این سه مولد می توانند به سه بار مشابه توسط یک جفت سیم وصل شوند که مدار حاصل طبق شکل (۱-۱۱) خواهد بود. چنین سیستمی مدار سه فاز خواهد بود که نسبت به یکدیگر  $120^\circ$  اختلاف فاز دارند. جریان عبوری از هر بار از معادله زیر بدست می آید:

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



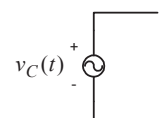
$$v_A(t) = \sqrt{2} V \cdot \sin \omega t \text{ V}$$

$$V_A = V \angle 0^\circ \text{ V}$$



$$v_B(t) = \sqrt{2} V \cdot \sin(\omega t - 120^\circ) \text{ V}$$

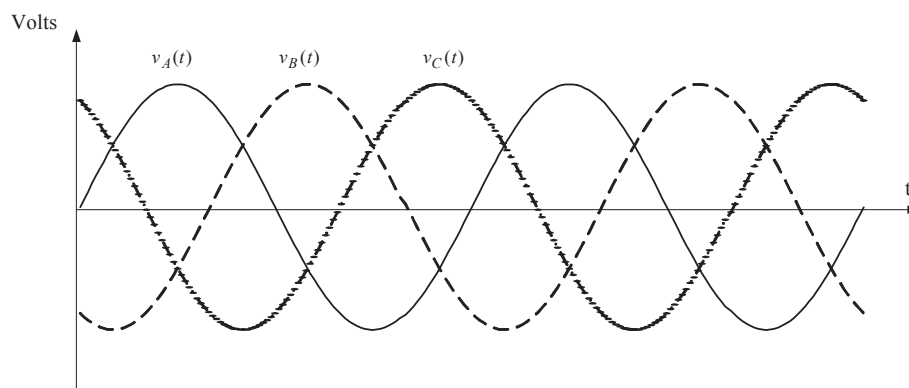
$$V_B = V \angle -120^\circ \text{ V}$$



$$v_C(t) = \sqrt{2} V \cdot \sin(\omega t - 240^\circ) \text{ V}$$

$$V_C = V \angle -240^\circ \text{ V}$$

شکل (۱-۱۱) الف



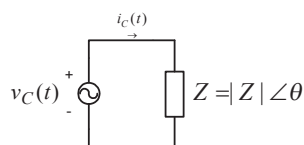
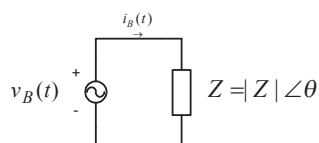
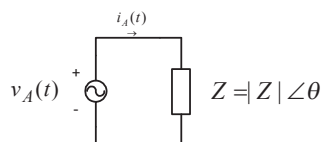
شکل (۱۱-۱) ب

بنابراین جریانهای عبوری از سه فاز عبارتند از:

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

$$I_B = \frac{V \angle -120^\circ}{Z \angle \theta} = I \angle -120^\circ - \theta$$

$$I_C = \frac{V \angle -240^\circ}{Z \angle \theta} = I \angle -240^\circ - \theta$$



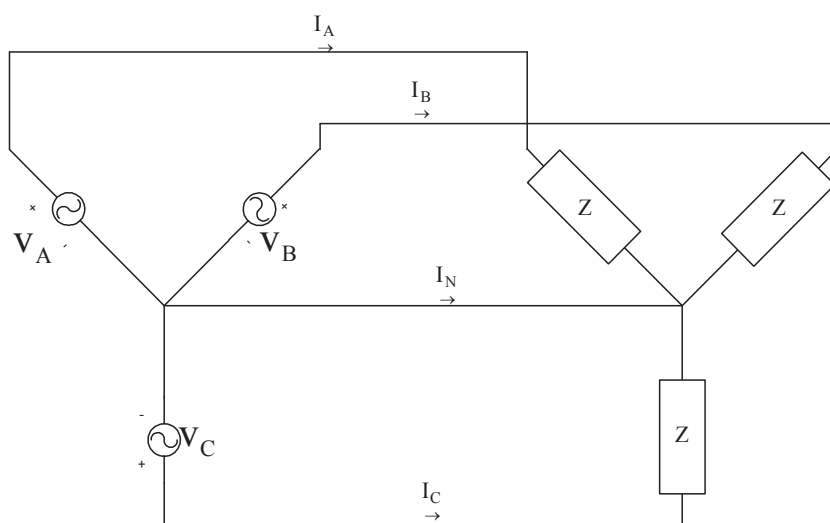
شکل (۱۱-۱) ج

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 می توانند از بارها به مولدها برگردند. جریان برگشت طبق شکل (۲-۱۱) مجموع جریانهای هر فاز سیستم خواهد بود که این جریان برابر است با:

$$\begin{aligned} I_N &= I_A + I_B + I_C \\ &= I \angle -\theta + I \angle -\theta - 120^\circ + I \angle -\theta - 240^\circ \\ &= I \cos(-\theta) + jI \sin(-\theta) \\ &\quad + I \cos(-\theta - 120^\circ) + jI \sin(-\theta - 120^\circ) \\ &\quad + I \cos(-\theta - 240^\circ) + jI \sin(-\theta - 240^\circ) \\ &= I [\cos(-\theta) + \cos(-\theta - 120^\circ) + \cos(-\theta - 240^\circ)] \\ &\quad + jI [\sin(-\theta) + \sin(-\theta - 120^\circ) + \sin(-\theta - 240^\circ)] \end{aligned}$$



شکل (۲-۱۱)

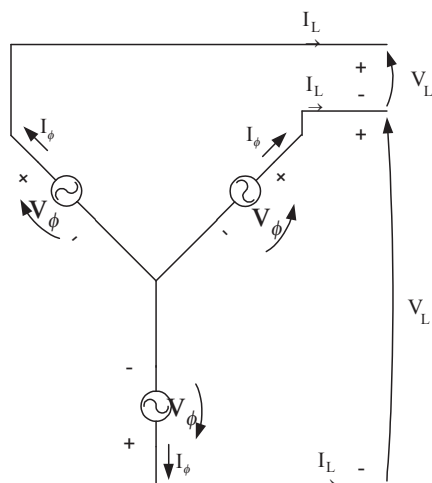
از بسط رابطه فوق داریم:

$$\begin{aligned} I_N &= I [\cos(-\theta) + \cos(-\theta) \cos(120^\circ) + \sin(-\theta) \sin(120^\circ) + \cos(-\theta) \cos(240^\circ) + \sin(-\theta) \sin(240^\circ)] \\ &\quad + jI [\sin(-\theta) + \sin(-\theta) \cos(120^\circ) - \cos(-\theta) \sin(120^\circ) + \sin(-\theta) \cos(240^\circ) - \cos(-\theta) \sin(240^\circ)] \\ &= I [\cos(-\theta) - \frac{1}{2} \cos(-\theta) + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(-\theta) - \frac{1}{2} \cos(-\theta) - \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(-\theta)] \\ &\quad + jI [\sin(-\theta) - \frac{1}{2} \sin(-\theta) - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(-\theta) - \frac{1}{2} \sin(-\theta) + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin(-\theta)] \\ &= 0 \text{ A} \end{aligned}$$

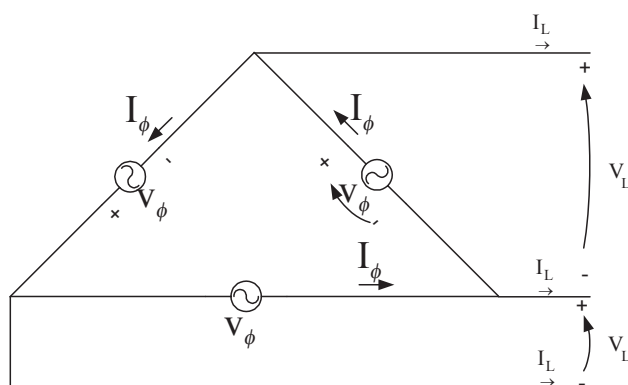
تا مادامی که سه جریان بار مساوی باشند، جریان برگشت در خط خنثی صفر است. سیستم قدرتی که در آن سه مولد ولتاژهای مساوی با اختلاف فاز  $120^\circ$  داشته باشد و بارها مقدار مساوی و زاویه مساوی داشته باشند سیستم قدرت سه فاز متعادل خوانده می شود. در چنین سیستمی خط خنثی دیگر لازم نیست.



اتصال شکل (۳-۱۱) الف اتصال ستاره Y است و اتصال شکل (۳-۱۱) ب اتصال مثلث  $\Delta$  است.



شکل (۳-۱۱) الف



شکل (۳-۱۱) ب

## ۲- ولتاژها و جریان ها در یک مدار سه فاز

هر مولد و هر بار در سیستم قدرت سه فاز می تواند به صورت ستاره یا مثلث وصل شود. در یک سیستم قدرت سه فاز تعدادی مولد و بار با اتصال ستاره یا مثلث می تواند وجود داشته باشد. شکل (۴-۱۱) مولد سه فاز را با اتصال ستاره نشان می دهد. ولتاژها و جریانها در یک فاز معین را کمیات فازی (با اندیس  $\phi$ ) می نامند و ولتاژها و جریانهای خطوط وصل به مولدها کمیات خط (با اندیس  $L$ ) نامیده می شوند. رابطه بین کمیات خطی و فازی برای یک مولد یا بار بستگی به نوع اتصال دارد.

### اتصال ستاره Y:

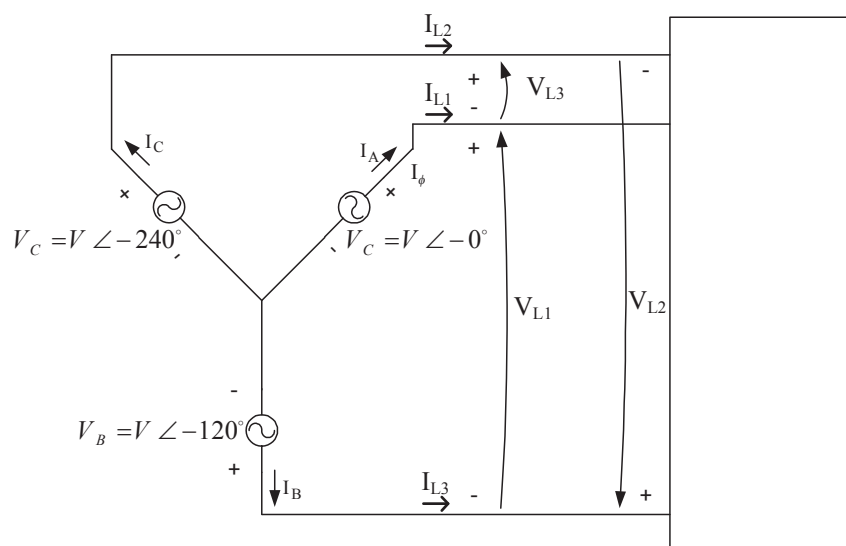
یک مولد با اتصال ستاره که به بار مقاومتی وصل شده در شکل (۴-۱۱) نشان داده شده است. ولتاژهای فازی در این مولد عبارتند از:



$$V_A = V \angle 0^\circ$$

$$V_B = V \angle -120^\circ$$

$$V_C = V \angle -240^\circ$$



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:

$$I_A = I \angle 0^\circ$$

$$I_B = I \angle -120^\circ$$

$$I_C = I \angle -240^\circ$$

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

$$I_L = I_\phi \quad \text{اتصال Y}$$

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

$$V_{L1} = V_A - V_B$$

$$= V \angle 0^\circ - V \angle -120^\circ$$

$$= V - \left( -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}V \right)$$

$$= \frac{3}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}V$$

$$= \sqrt{3}V \left( \frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2} \right)$$

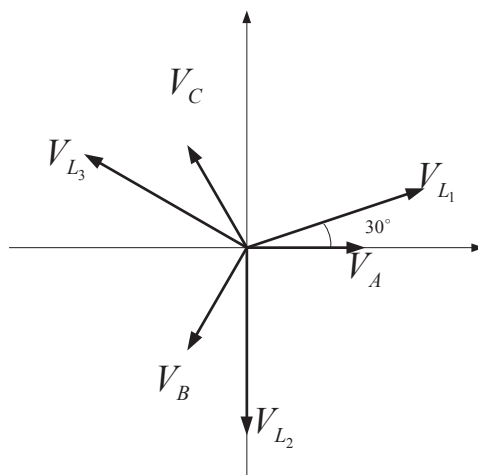
$$= \sqrt{3}V_\phi \angle 30^\circ$$



لذا رابطه بین مقدار ولتاژ خطی و فازي در مولد يا بار با اتصال ستاره چنين است:

$$V_L = \sqrt{3} V_\phi \quad \text{اتصال } Y$$

بعلاوه ولتاژهای خطی نسبت به ولتاژهای  $30^\circ$  اختلاف فاز دارند. ولتاژهای خطی و فازي در اتصال ستاره در شکل (۱۱-۵) نشان داده شده‌اند.



شکل (۱۱-۵)

#### اتصال مثلث $\Delta$ :

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

$$V_A = V \angle 0^\circ$$

$$V_B = V \angle -120^\circ$$

$$V_C = V \angle -240^\circ$$

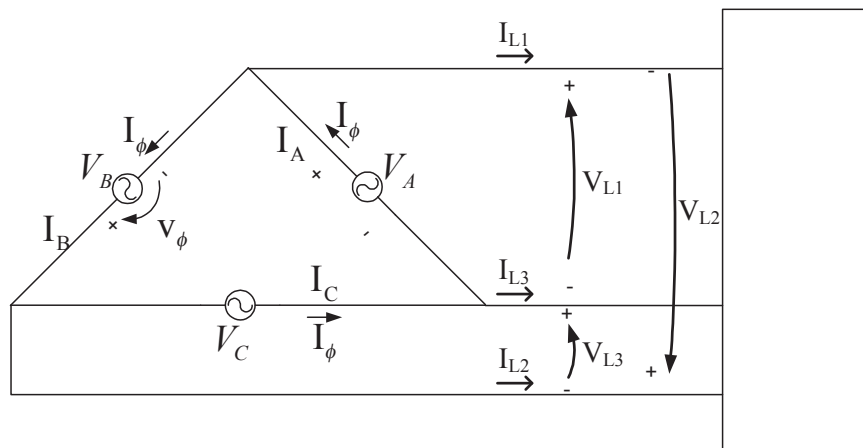
بعلت اينکه بار اهمي است جريانهای فاز عبارتند از:

$$I_A = I \angle 0^\circ$$

$$I_B = I \angle -120^\circ$$

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

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



شکل (۱۱-۶)

رابطه بین جریان خط و جریان فاز با استفاده از قانون گره در گره های مثلث بدست می آید:

$$\begin{aligned} I_{L1} &= I_A - I_B \\ &= I \angle 0^\circ - I \angle -120^\circ \\ &= I - \left( -\frac{1}{2}I - j\frac{\sqrt{3}}{2}I \right) \\ &= \frac{3}{2}I + j\frac{\sqrt{3}}{2}I \\ &= \sqrt{3}I \left( \frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2} \right) \\ &= \sqrt{3}I \angle 30^\circ \end{aligned}$$

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  $30^\circ$  اختلاف فاز دارد.

اگر چه رابطه بین ولتاژها و جریانه های 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 ساده تر کرده است.

## پیش گزارش

- ۱- اتصال ستاره و مثلث را با هم مقایسه نمایید.
- ۲- یک مدار سه فاز با بار ستاره متعادل را به کمک Spice 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 Spice تحلیل نمایید.

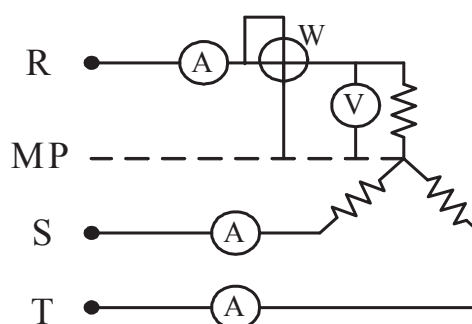


## شرح آزمایش

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 اندازه‌گیری 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.

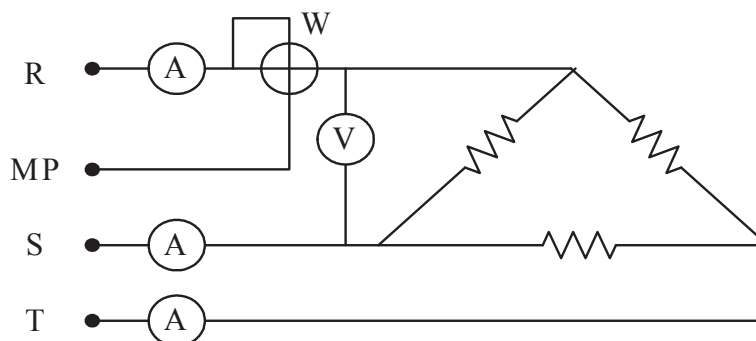


شکل (۱۱-۷)

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 اندازه‌گیری نمایید.

ب- مقدار توان 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)

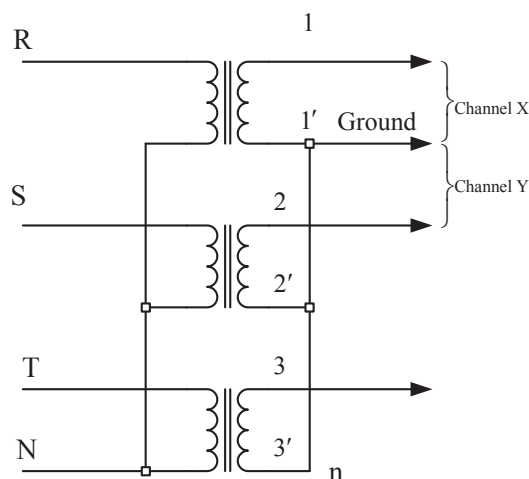


۳- مداری مطابق شکل زیر ببندید.

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

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

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



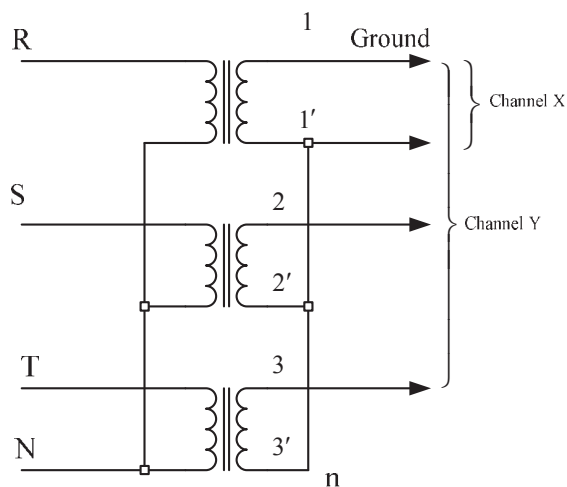
شکل (۹-۱۱)

۴- مداری مطابق شکل زیر ببندید.

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

ب- نقطه ۱ را به زمین اسکوپ وصل کنید و نقاط ۱' 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 (۱۰-۱۱)