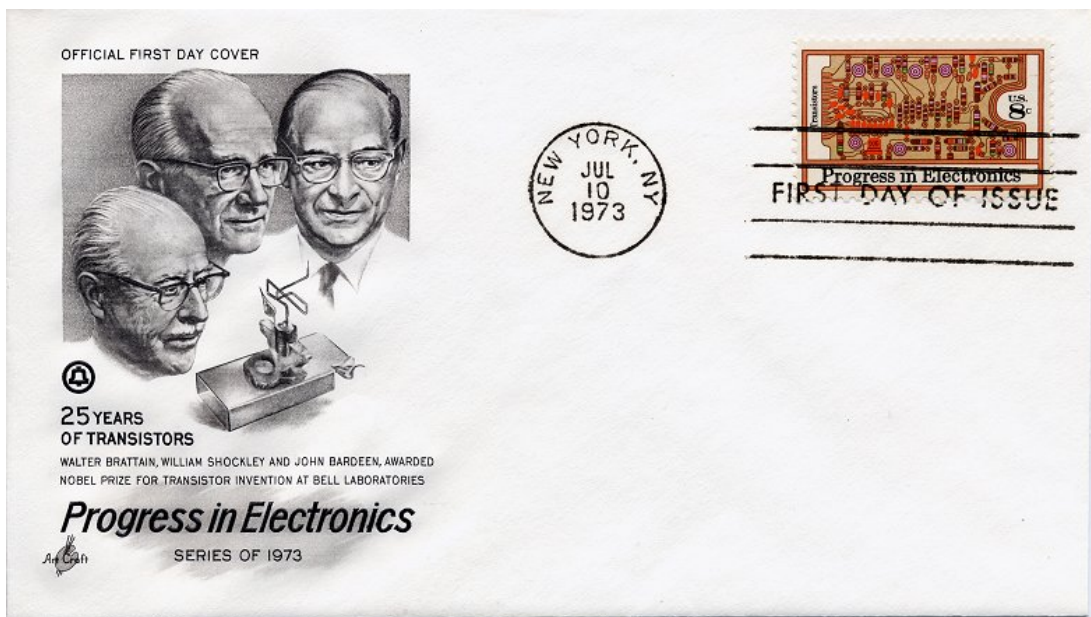




دانشگاه سمنان
دانشکده مهندسی

دستور کار آزمایشگاه

الکترونیک ۲



به نام یگانۀ ایزدبنی همتا

دستورکاری که پیش رو دارید به نحوی آماده شده است تا با امکانات آزمایشگاه هماهنگ بوده و به علاوه، امکان استفاده از قابلیت‌های فراوان نرم‌افزارهای تحلیل و شبیه‌سازی مدار را در کنار پیاده‌سازی عملی مدارات فراهم سازد. این قابلیت‌های نرم‌افزاری می‌تواند به عنوان یک آزمایشگاه مجازی به خدمت گرفته شود.

تقسیم‌بندی آزمایش‌ها به صورت موضوعی انجام شده است و ممکن است زمان مورد نیاز برای آزمایش‌های مختلف، متفاوت باشد. بنابراین لازم است در هنگام برنامه‌ریزی برای انجام آزمایش‌ها به این موضوع توجه شود.

در «پیوست الف» نحوه نامگذاری المان‌های نیمه‌هادی ارائه شده است. در «پیوست ب» و «پیوست پ» اطلاعات جامعی در مورد مقاومت‌ها و خازن‌ها آمده است.

علی مالکی

پاییز ۸۹

مقررات آزمایشگاه

۱. کلیه دانشجویان باید راس ساعت اعلام شده در برنامه درسی، در آزمایشگاه حضور یابند. به دانشجویانی که بیش از پانزده دقیقه تاخیر داشته باشند اجازه انجام آزمایش داده نخواهد شد. برای آزمایشهایی که دانشجو انجام نداده است نمره‌ای تعلق نمی‌گیرد.
۲. برای انجام آزمایشهای معوقه به علل موجه، یک جلسه جبرانی در پایان ترم برگزار خواهد شد.
۳. دانشجویان موظفند دستورکار مربوط به هر آزمایش را قبلاً مطالعه نموده و موارد تئوری آن را (که شامل تحلیل و طراحی می‌باشد) به همراه تحلیل کامپیوتری، به عنوان پیش‌گزارش، قبل از شروع آزمایش ارائه نمایند.
۴. پس از انجام آزمایش، نتایج به دست آمده باید در همان جلسه به تأیید استاد آزمایشگاه رسیده و تحویل گردد.
۵. هر گروه موظف است یک گزارش تهیه و تحویل نماید.
۶. گزارش کار بایستی حداکثر یک هفته پس از اتمام آزمایش تحویل شود. از گزارش‌کارهایی که با تأخیر تحویل داده شوند، به ازای هر روز تاخیر یک نمره کسر می‌گردد. بدیهی است حداکثر زمان تاخیر ۲۰ روز می‌باشد.
۷. گزارش کار شامل موارد زیر خواهد بود:

- هدف آزمایش
- نحوه طراحی، محاسبات و توضیحات مورد نیاز
- نتایج آزمایش (ترسیم منحنی‌ها توسط نرم‌افزار یا تصاویر ثبت شده در آزمایشگاه)
- نتایج شبیه‌سازی (به همراه توضیحات و نکات مورد نیاز)
- نتیجه‌گیری (ارائه نتایج تئوری، عملی و شبیه‌سازی به صورت یک جدول. در صورت اختلاف علت را بررسی کنید).
- مراجع

ارزیابی دانشجویان در درس آزمایشگاه بر اساس موارد زیر می‌باشد:

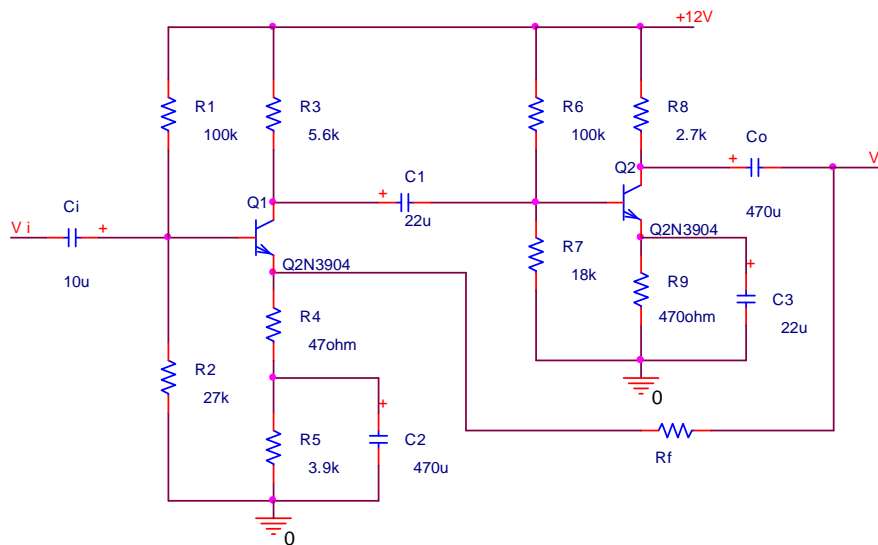
- گزارش کار
- امتحان تئوری
- امتحان عملی
- کیفیت کار در آزمایشگاه (ارائه پیش‌گزارش در ابتدای جلسه، تسلط کافی بر عملکرد مدار، تمیز بستن مدار و استقلال در عیب‌یابی).

آزمایش ۱: فیدبک در تقویت کننده‌ها

هدف از این آزمایش، بررسی خواص فیدبک منفی و مطالعه پایداری سیستم است.

فیدبک ولتاژ- سری

مدار شکل ۱ را در نظر بگیرید.



شکل ۱ مدار تقویت کننده‌ی دو طبقه با فیدبک ولتاژ- سری

با چشم‌پوشی از مقاومت R_f ، مدار به مدار بدون فیدبک تبدیل می‌شود. مدار بدون فیدبک را تحلیل کنید. برای این منظور لازم است نقاط کار ترانزیستورها، بهره‌ی ولتاژ تقویت کننده، بدون آزمایش: در تقویت-کننده شکل بالا، ابتدا نقاط کار ترانزیستورها و گین ولتاژی، مقاومت ورودی، مقاومت خروجی و فرکانس قطع پایین تقویت کننده بدون فیدبک را حساب کنید (برای هر دو ترانزیستور فرض کنید $\beta = h_{fe} = 170$).

- مقاومت R_f را طوری تعیین کنید که گین ولتاژی مدار با فیدبک برابر $A_{vf} = 200$ گردد. پس از تعیین مقدار R_f ، با تشکیل تقویت کننده A'_v گین ولتاژی، مقاومت ورودی، مقاومت خروجی و فرکانس قطع پایین تقویت کننده A'_v و تقویت کننده با فیدبک را حساب کنید.

- مدار را ابتدا بدون برقراری فیدبک مونتاژ کنید و با قرار دادن اثر بار فیدبک در ورودی و خروجی (تشکیل تقویت کننده A'_v)، پس از کنترل نقاط کار ترانزیستورها، گین ولتاژی، مقاومت ورودی، مقاومت خروجی و فرکانس قطع بالا و پایین تقویت کننده A'_v را اندازه‌گیری کرده و با مقادیر تئوری مقایسه کنید.

- اکنون فیدبک را برقرار کنید و مشخصات بالا را با وجود فیدبک اندازه‌گیری کرده و با مقادیر تئوری مقایسه کنید. به اختلاف مقادیر اندازه‌گیری شده کرده و با مقادیر تئوری در دو حالت اخیر توجه کنید. شبیه‌سازی: آزمایش فوق را در حالت تقویت‌کننده بدون فیدبک، با در نظر گرفتن اثر فیدبک و تقویت‌کننده با فیدبک شبیه‌سازی کنید. پس از اندازه‌گیری پارامترهای خواسته شده، نتایج شبیه‌سازی را با نتایج عملی و تئوری مقایسه نمایید.

سوال: آیا با تغییر ولتاژ تغذیه $V_{CC} +$ گین مدار تغییر می‌کند؟ چرا؟

- V_{CC} را از $12V$ به $10V$ برده و تغییرات نسبی A'_{v} و A_{vf} را بدست آورید و مقایسه کنید. شبیه‌سازی: این بخش از آزمایش را شبیه‌سازی کرده و نتایج شبیه‌سازی را با نتایج عملی و تئوری مقایسه نمایید.

- دامنه سیگنال ورودی را افزایش دهید تا خروجی تقویت‌کننده A'_{v} به نزدیک شکست (حالت قطع و اشباع) برسد (ایجاد اعوجاج در شکل موج خروجی). با برقراری فیدبک، اثر آن را بر روی اعوجاج شکل موج خروجی بررسی کنید.

- ماکزیمم سیگنال سینوسی بدون اعوجاج خروجی را در حالت بدون فیدبک و با فیدبک اندازه‌گیری و مقایسه کنید. شکل موج سیگنال خروجی طبقه اول را در این حالت بررسی کرده و کاهش اعوجاج به وسیله فیدبک را به طور فیزیکی تحلیل کنید.

- ترانزیستورهای مدار را با دو ترانزیستور دیگر که h_{fe} آنها با مقادیر قبلی تفاوت زیادی داشته باشد عوض کنید و تغییر گین ولتاژی و مقاومت ورودی را برای هر یک از تقویت‌کننده‌های A'_{v} و A_{vf} اندازه‌گیری و مقایسه کنید.

- با کاهش مقدار R_f مقدار فیدبک را افزایش دهید و ملاحظه کنید که ممکن است مدار ناپایدار شود (بروز نوسان‌های فرکانس بالا). ایجاد نوسان‌ها را تحلیل کنید.

شبیه‌سازی: این بخش از آزمایش را شبیه‌سازی کرده و نتایج شبیه‌سازی را با نتایج عملی و تئوری مقایسه نمایید.

- با ترمیم مشخصه فرکانسی تقویت‌کننده، سیستم را به حالت پایدار درآورید (قطع نوسان‌ها). پس از پایدار کردن مدار، بار دیگر فرکانس قطع بالای مدار را اندازه‌گیری کنید.

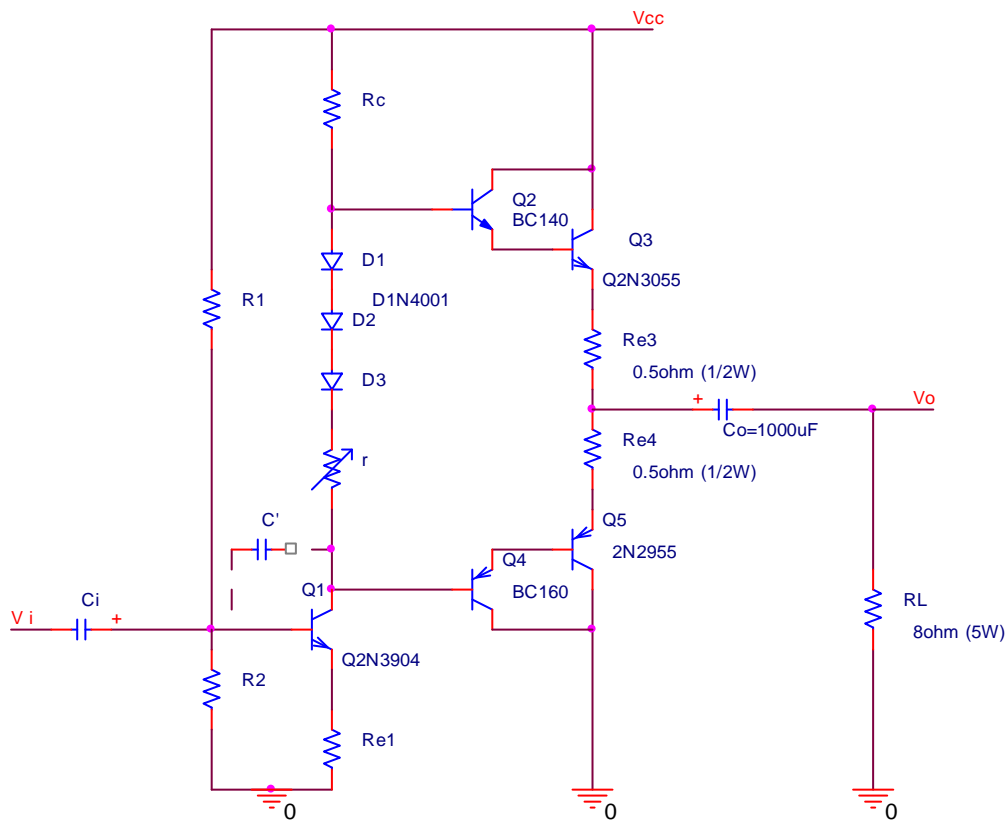
- به کمک سیگنال مربعی نیز می‌توان پایداری مدار را بررسی کرد. با اعمال یک سیگنال مربعی با فرکانس تقریبی ۵۰ KHz (یا فرکانس مناسب دیگری که خود می‌یابید)، پاسخ خروجی را با مقادیر مختلف فیدبک بررسی کرده و اثر جبران فرکانس را بر روی آن مشاهده کنید.

آزمایش ۲: تقویت کننده‌ی توان

هدف از این آزمایش، طراحی یک تقویت کننده‌ی توان پوش پول^۱ کلاس AB بدون ترانسفورماتور خروجی و مونتاژ و تنظیم آن است. سپس با قرار دادن یک طبقه پیش تقویت کننده^۲ و برقراری حلقه‌ی فیدبک، این تقویت کننده کامل می‌شود.

۱-۲ طراحی طبقه‌ی پوش پول و طبقه‌ی راه انداز^۳

می‌خواهیم تقویت کننده‌ای برای بار $R_L=8\Omega$ و توان خروجی $P_L=5W$ طراحی کنیم. این تقویت کننده با یک منبع تغذیه و در نتیجه با یک خازن خروجی کار می‌کند. برای آزمایش می‌توانید یکی از دو طرح ارائه شده در شکل‌های ۱ و ۲ را انتخاب نمایید.

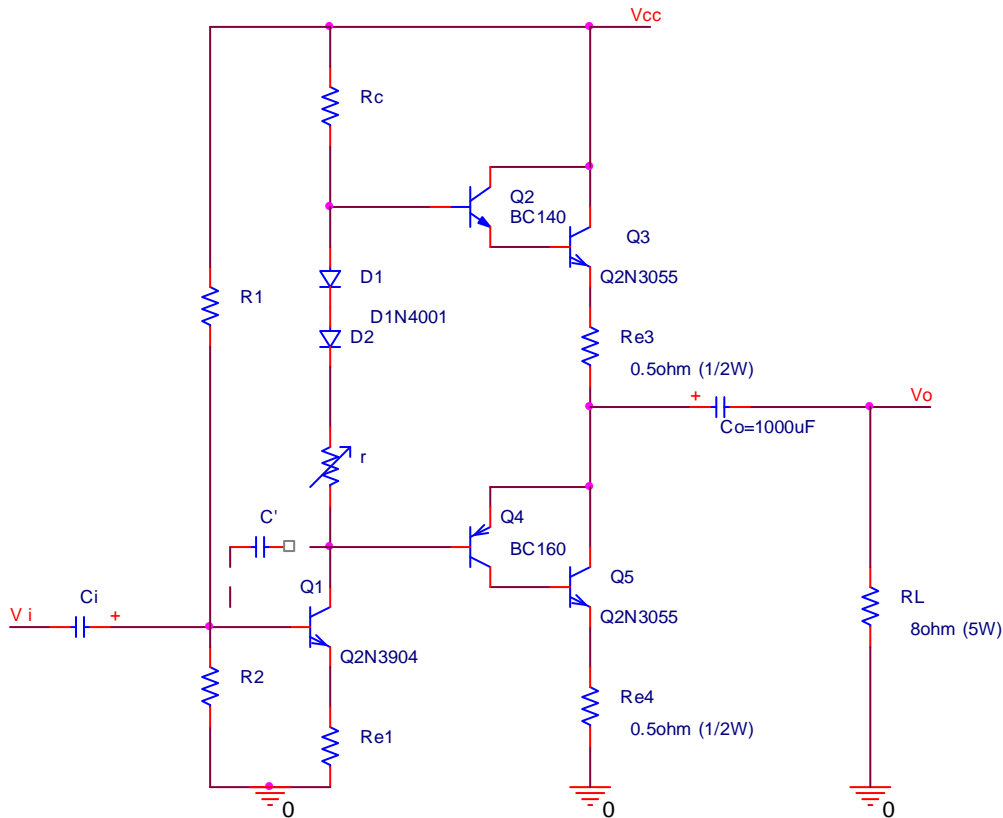


شکل ۱ طرح شماره‌ی ۱ که در آن، ترانزیستورهای توان از نوع مکمل (PNP و NPN) می‌باشند.

¹ Push-Pull power amplifier

² Pre-amplifier


³ driver



شکل ۲ طرح شماره ۲ که در آن، ترانزیستورهای توان هر دو از نوع NPN هستند.

سوال ۱: نقش مقاومت r و دیودهای سری با آن چیست؟ 


سوال ۲: نظر شما در مورد جایگزین کردن مقاومت r با یک دیود چیست؟ توضیح دهید. 

سوال ۳: نظر شما در مورد جایگزین کردن مقاومت r و دیودهای سری با آن با یک مقاومت مناسب چیست؟ توضیح دهید. 

سوال ۴: نقش مقاومت‌های 0.5 اهم در مدار چیست؟ 

سوال ۵: با بررسی دقیق دو طرح پیشنهادی، نقاط قوت و ضعف هر کدام را لیست کنید. 

یکی از دو طرح را انتخاب نمایید. با توجه به بیشینه توان خروجی، مقادیر بیشینه ولتاژ و جریان خروجی را محاسبه نموده و بر اساس آن، مقدار ولتاژ تغذیه و طبقه‌ی راه‌انداز را طراحی نمایید. به توان، جریان و ولتاژهای بیشینه‌ی قابل تحمل هر یک از ترانزیستورها توجه داشته باشید.

شبیه‌سازی ۱: مدار طراحی شده را شبیه‌سازی نمایید. نقاط کار، حداکثر توان خروجی، توان منبع تغذیه، راندمان، اعوجاج تقاطعی، بهره‌ی تقویت کننده، مقاومت ورودی، فرکانس قطع پایین و فرکانس قطع بالا از جمله مواردی است که لازم است در شبیه‌سازی بررسی گردد. 

مدار را مونتاژ کنید. برای تنظیم پتانسیومتر r ، آن را تغییر دهید تا جریان مصرفی منبع تغذیه در حالت بدون سیگنال به کمترین مقدار رسیده و در عین حال، اعوجاج تقاطعی^۴ در حالت سیگنال بیشینه دارای کمترین مقدار باشد.

ممکن است مدار ناپایدار شده و مولفه‌های فرکانس بالا مشاهده گردد. در این صورت با قرار دادن خازن جبران‌ساز C' (حدود چند صد پیکوفاراد)، مشخصه فرکانسی مدار را ترمیم کرده و مدار را پایدار کنید.

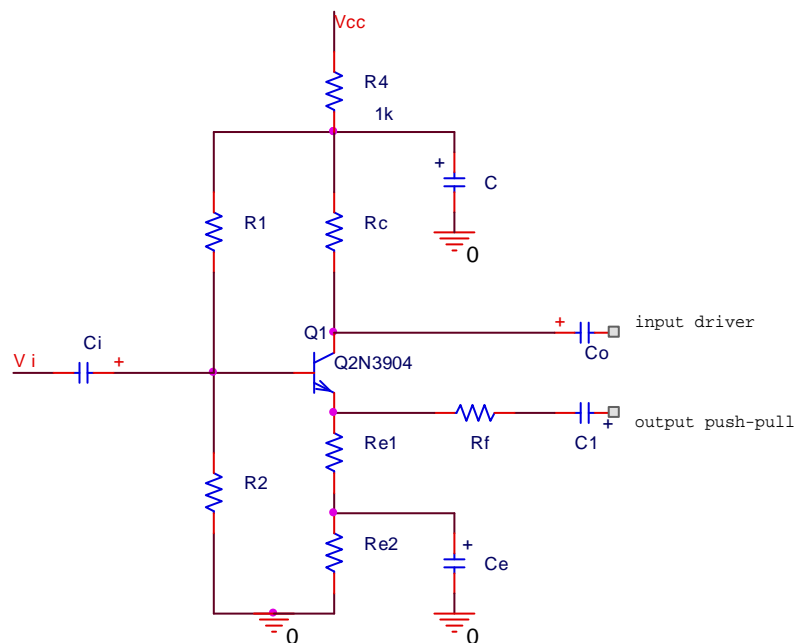
ماکزیمم توان را دو سر بار برقرار کنید و با اندازه‌گیری توان ماکزیمم و توان مصرفی منبع تغذیه، راندمان مدار را تعیین کنید.

با اندازه‌گیری دامنه‌ی ولتاژهای ورودی و خروجی، بهره‌ی ولتاژ مدار را تعیین کنید.

با اندازه‌گیری فرکانس قطع بالا و پایین، پهنای باند تقویت‌کننده را در شرایط $P_{L(max)} = 5W$ اندازه‌گیری کنید.

۲-۲ طراحی پیش تقویت کننده و برقراری فیدبک برای کاهش اعوجاج

می‌خواهیم یک پیش تقویت‌کننده‌ی ولتاژ به ورودی مدار اضافه نماییم. برای این منظور می‌توانید از طرح پیشنهادی شکل ۳ یا هر طرح مناسب دیگر استفاده کنید.




شکل ۳ طرح پیشنهادی برای مدار پیش تقویت کننده

⁴ Cross-over distortion

سوال ۶: مقاومت و خازن دکوپل^۵ (R و C) چه نقشی در طرح مدار شکل ۳ بر عهده دارند؟ 

پیش تقویت کننده را طراحی کنید. توجه داشته باشید که لازم است مقاومت R_{e1} را کوچک انتخاب کنید تا بهره‌ی ولتاژ تقویت کننده کاهش نیابد.

شبه‌سازی ۲:  با شبه‌سازی مدار طراحی شده، درستی عملکرد پیش تقویت کننده را بررسی نمایید.

شبه‌سازی ۳:  با شبه‌سازی مدار شامل پیش تقویت کننده، راه‌انداز و پوش پول، و برقراری فیدبک مناسب، اثر فیدبک را بر اعوجاج تقاطعی و اعوجاج سیگنال بیشینه‌ی خروجی بررسی کنید. در بررسی مورد اول، پیشنهاد می‌گردد با بای‌پس کردن مقاومت و یکی از دیودهای سری با آن، اعوجاج تقاطعی را افزایش دهید تا بررسی اثر فیدبک راحت‌تر قابل انجام باشد. در هر دو مورد، شکل موج ولتاژ کلکتور و امیتر ترانزیستور پیش تقویت کننده را ملاحظه و تحلیل نمایید.


با مونتاژ پیش تقویت کننده، مدار را کامل کنید. سپس مسیر فیدبک را از خروجی تقویت کننده‌ی پوش پول با مقدار β ی حدود چند هزارم برقرار کنید.

با بای‌پس کردن مقاومت I (و در صورت نیاز، به همراه یکی از دیودهای سری با آن)، کمی اعوجاج تقاطعی در خروجی ایجاد نمایید. سپس اثر برقراری فیدبک را در کاهش اعوجاج تقاطعی خروجی مورد ارزیابی قرار دهید. دقت کنید که برای مقایسه لازم است دامنه‌ی سیگنال‌ها در دو حالت یک اندازه باشد.

در این شرایط، شکل موج ولتاژهای امیتر و کلکتور ترانزیستور پیش تقویت کننده را مشاهده و ثبت کنید.

با برداشتن اتصال بای‌پس، مدار را به وضعیت قبلی خود بازگردانید. دامنه‌ی ورودی را افزایش دهید تا بیشینه سیگنال خروجی مشاهده گردد. در این شرایط، اثر فیدبک در کاهش اعوجاج سیگنال بیشینه را بررسی کنید.


در این شرایط نیز، شکل موج ولتاژهای امیتر و کلکتور ترانزیستور پیش تقویت کننده را مشاهده و ثبت کنید.

سوال ۷:  اثر فیدبک روی شکل موج ولتاژ کلکتور ترانزیستور پیش تقویت کننده را در دو حالت به طور کیفی تحلیل کنید.

⁵ decouple

۲-۳ کاهش اثر ریپل در خروجی به کمک اثر فیدبک

از خروجی یکسوساز زیر که دارای ریپل است به عنوان $V_{CC}+$ استفاده کرده و در حالت بدون فیدبک اثر ریپل را بر روی شکل موج سیگنال خروجی ماکزیمم مشاهده کنید. اکنون فیدبک را برقرار کرده و اثر ریپل را مشاهده و با حالت بدون فیدبک مقایسه کنید.

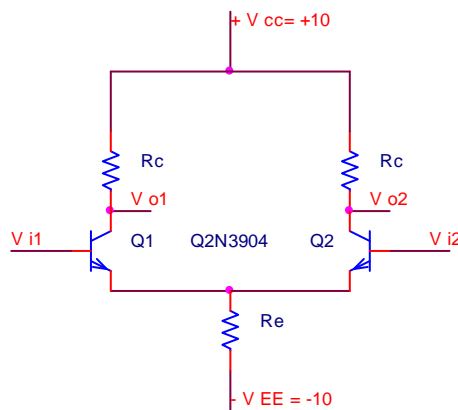
شبیه‌سازی:  آزمایش فوق را شبیه‌سازی کرده و نتایج شبیه‌سازی را با نتایج عملی و تئوری مقایسه نمایید.

آزمایش ۳: تقویت کننده‌ی اختلاف – تقویت کننده‌ی dc

هدف از این آزمایش، طراحی و مقایسه‌ی تقویت کننده‌های اختلاف و تبدیل آن به یک تقویت کننده‌ی dc است.

۳-۱ تقویت کننده‌ی اختلاف با مقاومت در امیتر

در مدار شکل ۱، با انتخاب دو ترانزیستور 2N3904 (تا حد امکان مشابه) یا یک ترانزیستور BCY87، با در نظر گرفتن $V_{i1}=V_{i2}=0$ ، مقاومت‌های مدار را برای $I_c=1\text{mA}$ و به دست آوردن بیشینه‌ی نوسان^۶ در خروجی تعیین کنید.



شکل ۱ تقویت کننده‌ی اختلاف با مقاومت در امیتر

بهره‌ی ولتاژ دیفرانسیلی (A_d)، بهره‌ی ولتاژ مشترک (A_c) و ضریب حذف سیگنال مشترک^۷ (CMRR) را برای مدار طراحی شده محاسبه کنید.

شبیه‌سازی ۱: مدار طراحی شده را شبیه‌سازی کرده و نقاط کار، بهره‌ی ولتاژ دیفرانسیلی، بهره‌ی ولتاژ مشترک و ضریب حذف سیگنال مشترک را اندازه‌گیری کنید.

مدار را بسته و با اعمال سیگنال‌های مناسب، بهره‌ی ولتاژ دیفرانسیلی و بهره‌ی ولتاژ مشترک را اندازه‌گیری نمایید. بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده، ضریب حذف سیگنال مشترک را محاسبه کنید.

در حالتی که $V_{i1}=V_{i2}=0$ است، در صورت وجود اختلاف بین V_{o1} و V_{o2} (وجود offset)، با قرار دادن یک پتانسیومتر با مقدار کم در محل اتصال امیترها و مقاومت R_e ، آفست را جبران کنید.

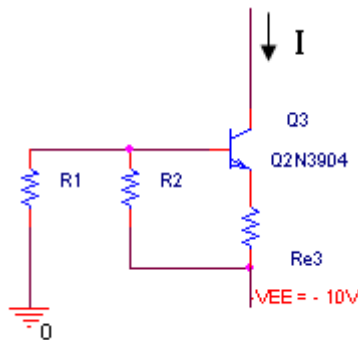
^۶ maximum swing

^۷ Common Mode Rejection Ratio (CMRR)

برای بخش بعدی آزمایش لازم است این پتانسیومتر از مدار خارج گردد. ☠

۲-۳ تقویت کننده با منبع جریان در امیتر

مدار منبع جریان شکل ۲ را برای $I=2\text{mA}$ طراحی کنید.



شکل ۲ شماتیک مدار منبع جریان جهت بهبود تقویت کننده با اختلاف شکل ۱-۳.

با جایگزین کردن مقاومت R_e در مدار شکل ۱ با مدار منبع جریان طراحی شده، مدار تقویت کننده با اختلاف را بهبود بخشید. برای مدار بهبود یافته، بهره ولتاژ دیفرانسیلی، بهره ولتاژ مشترک و ضریب حذف سیگنال مشترک را محاسبه کنید.

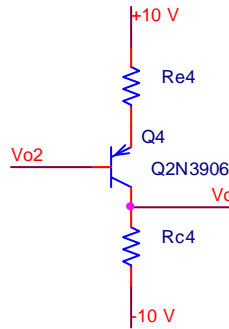
🖥 شبیه سازی ۲: مدار بهبود یافته را شبیه سازی کنید و پس از اطمینان از صحت عملکرد مدار منبع جریان، بهره ولتاژ دیفرانسیلی و بهره ولتاژ مشترک و ضریب حذف سیگنال مشترک را اندازه گیری کنید.

مدار منبع جریان طراحی شده را به جای مقاومت R_e ببندید. بهره ولتاژ دیفرانسیلی و بهره ولتاژ مشترک را اندازه گیری کنید. سپس $CMRR$ را محاسبه نمایید.

۳-۳ تغییر دهنده سطح dc

برای تبدیل تقویت کننده آزمایش ۲ به یک تقویت کننده dc ، می توان از مدار تغییر دهنده سطح dc شکل ۳ استفاده نمود. مدار را طوری طراحی کنید که به ازای $V_{i1}=V_{i2}=0$ ، ولتاژ خروجی (V_o) نیز برابر صفر شود.


⁸ Level shifter



شکل ۳ مدار تغییر دهنده‌ی سطح dc برای تقویت کننده‌ی اختلاف.

سوال ۱: تقویت کننده‌ی dc به چه تقویت کننده‌ای گفته می‌شود؟ 

سوال ۲: بهره‌ی ولتاژ مدار تکمیل شده با تغییر دهنده‌ی سطح dc را محاسبه نمایید. 


شبیه‌سازی ۳: مدار تقویت کننده‌ی اختلاف شکل ۲ که با مدار تغییر دهنده‌ی سطح dc شکل ۳ تکمیل شده است را شبیه‌سازی نمایید. نقاط کار ترانزیستورها، ولتاژ آفست^۹ خروجی^{۱۰} و بهره‌ی ولتاژ مدار را اندازه‌گیری نمایید. همچنین شکل موج ولتاژ خروجی به ازای ورودی‌های dc و ac را مشاهده و بررسی نمایید. 

مدار تغییر دهنده‌ی سطح dc را در تکمیل مدار قبل ببینید. ولتاژ آفست خروجی را اندازه‌گیری کرده و آن را جبران‌سازی نمایید. سپس بهره‌ی ولتاژ و مقاومت خروجی مدار را اندازه‌گیری نمایید.

۳-۴ تغییر دهنده‌ی سطح با استفاده از منبع جریان

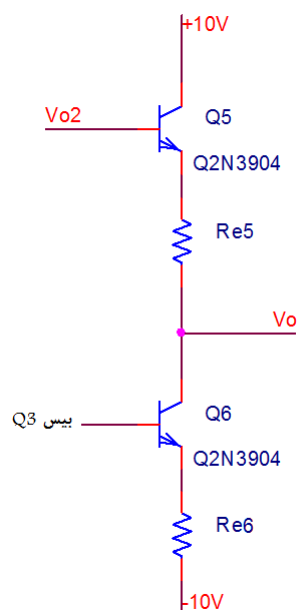
به جای مدار شکل ۳ می‌توان از مدار تغییردهنده‌ی سطح dc شکل ۴ استفاده نمود. بیس ترانزیستور Q6 (منبع جریان) را به بیس ترانزیستور Q3 متصل کنید و جریان Q6 را چند برابر جریان Q3 انتخاب کنید.

مدار را چنان طراحی کنید که وقتی $V_{i1}=V_{i2}=0$ است خروجی V_o نیز برابر صفر شود.

شبیه‌سازی ۴: مدار تقویت کننده‌ی اختلاف بخش ۲-۳ که با مدار تغییر دهنده‌ی سطح dc شکل ۴ تکمیل شده است را شبیه‌سازی نمایید. نقاط کار ترانزیستورها، ولتاژ آفست خروجی و بهره‌ی ولتاژ مدار را اندازه‌گیری نمایید. همچنین شکل موج ولتاژ خروجی به ازای ورودی‌های dc و ac را مشاهده و بررسی نمایید. 

⁹ offset

^{۱۰} ولتاژ آفست خروجی به ولتاژ خروجی به ازای ورودی صفر اطلاق می‌گردد.



شکل ۴: مدار تغییر دهنده‌ی سطح dc با استفاده از منبع جریان.

مدار تغییر دهنده‌ی سطح dc شکل ۴ را به جای مدار تغییر دهنده‌ی سطح dc قبلی ببینید. ولتاژ آفست خروجی را اندازه‌گیری کرده و آن را جبران‌سازی نمایید. سپس بهره‌ی ولتاژ و مقاومت خروجی مدار را اندازه‌گیری نمایید. با برقراری فیدبک منفی مقاومتی بین خروجی (V_o) و ورودی V_{i2} ، اثر آن را روی مقدار ولتاژ آفست و اعوجاج شکل موج خروجی در حالت بیشینه‌ی سیگنال بررسی کنید.

آزمایش ۴: اندازه‌گیری مشخصات اصلی تقویت‌کننده‌های عملیاتی

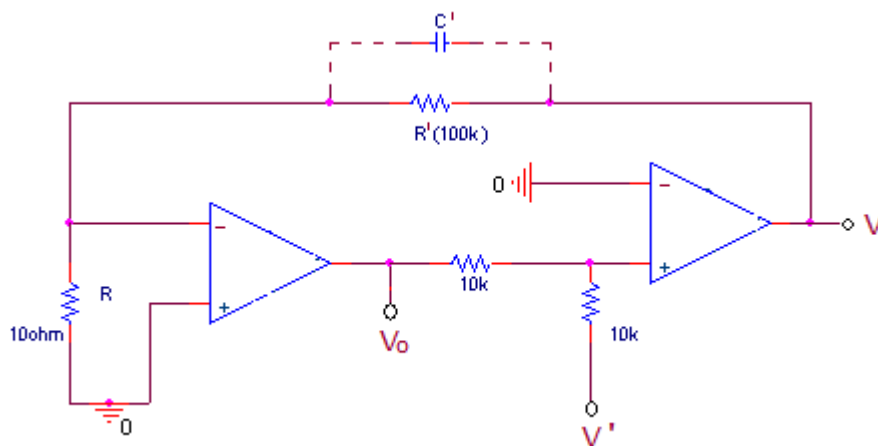
هدف از این آزمایش، اندازه‌گیری مشخصات اصلی یک تقویت‌کننده عملیاتی، نظیر بهره ولتاژ مدار باز، ولتاژ آفست، فرکانس قطع و ضریب slew rate می‌باشد.

تقویت‌کننده‌ی عملیاتی مورد بررسی از نوع ۷۴۱ (نظیر MC741، UA741، LM741) می‌باشد که اطلاعات فنی آن را می‌توانید از برگه‌ی اطلاعات سازنده به دست آورید.

برگه‌ی اطلاعات تقویت‌کننده‌ی عملیاتی ۷۴۱ را از اینترنت بردارید و مطالعه نمایید.

۴-۱ تعیین بهره‌ی ولتاژ مدار باز (G_0) و ولتاژ آفست (V_{offset})

همانطور که می‌دانید به علت بهره ولتاژ بسیار بالا، وجود ولتاژ آفست و تغییرات حرارتی آن، اندازه‌گیری مستقیم بهره ولتاژ مدار باز (G_0) عملی نیست. به منظور اندازه‌گیری G_0 ، می‌توان از مدار شکل ۱ استفاده نمود. در این مدار، تقویت‌کننده‌ی عملیاتی دوم، نقش بافر^{۱۱} را ایفا می‌کند. (این تقویت‌کننده‌ی عملیاتی می‌تواند از نوع ۷۴۱ و یا هر نوع دیگری باشد و لزومی به یکسان بودن OpAmp ها نیست).



شکل ۱ مدار مورد استفاده برای اندازه‌گیری بهره‌ی ولتاژ مدار باز و ولتاژ آفست تقویت‌کننده‌ی عملیاتی. تقویت‌کننده‌ی عملیاتی مورد بررسی در سمت چپ مشاهده می‌گردد و تقویت‌کننده‌ی عملیاتی سمت راست که نقش بافر را بازی می‌کند می‌تواند از هر نوعی باشد. در صورت بروز ناپایداری در مدار، می‌توانید با اضافه کردن خازن C' ، جبران‌سازی فرکانسی نمایید.

¹¹ buffer

⚠ هشدار: خطوط تغذیه‌ی تقویت‌کننده‌های عملیاتی در شکل ۱ مشخص نشده‌اند ولی برای عملکرد صحیح مدار لازم است تغذیه برقرار گردد.

⚠ هشدار: مقاومت‌ها را در حد امکان دقیق انتخاب کنید.

برای به دست آوردن ولتاژ آفست و بهره‌ی ولتاژ مدار باز لازم است مراحل دوگانه‌ی زیر انجام گردد. مرحله‌ی اول: ابتدا v' را به زمین (ولتاژ صفر) وصل می‌کنیم. به علت حلقه فیدبک منفی بین دو تقویت‌کننده و قابل صرف‌نظر بودن جریان پایه‌های ورودی OpAmp سمت راست، خواهیم داشت $V_o \approx 0$. در نتیجه ولتاژ روی مقاومت R نشانگر ولتاژ آفست ورودی خواهد بود ($V_R \approx V_{offset}$). برای اندازه‌گیری دقیق‌تر، مقدار ولتاژ V را اندازه‌گیری نموده (که در این حالت آن را V_1 می‌نامیم) و به کمک آن، ولتاژ V_R را محاسبه می‌کنیم.

$$V_{offset} = V_R = V_1 \frac{R}{R+R'} \approx \frac{V_1}{1000}$$

مرحله‌ی دوم: حال به v' مقدار $10V$ - را متصل می‌کنیم (بوسیله یک منبع تغذیه کمکی). در این شرایط $V_o \approx 10$ خواهد شد. ولتاژ V که در این حالت آن را V_2 می‌نامیم را اندازه‌گیری می‌کنیم. از آنجا که

$$V_R = V_2 \frac{R}{R+R'} \approx \frac{V_2}{1000}$$

و از طرف دیگر:

$$V_R = V_i + V_{offset} = \frac{V_o}{G_o} + V_{offset}$$

در نتیجه داریم:

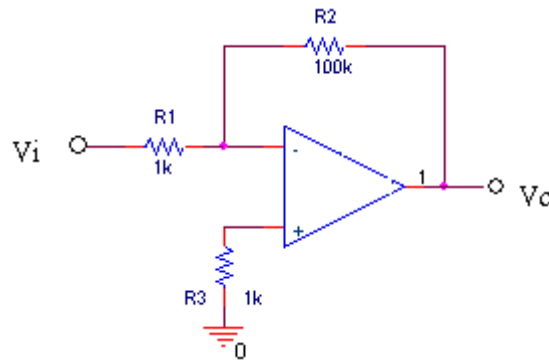
$$\frac{V_o}{G_o} = V_R - V_{offset} \approx \frac{V_2}{1000} - \frac{V_1}{1000} = \frac{V_2 - V_1}{1000} \Rightarrow G_o = \frac{1000V_o}{V_2 - V_1}$$

🖥 شبیه‌سازی ۱: با شبیه‌سازی مراحل دوگانه‌ی فوق، ولتاژ آفست ورودی و بهره‌ی ولتاژ مدار باز را به دست آورید.

مدار را ببندید. با انجام مرحله‌ی اول آزمایش، ولتاژ V_1 را اندازه‌گیری نمایید. سپس با انجام مرحله‌ی دوم آزمایش، ولتاژ V_2 را اندازه‌گیری کنید. با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده، ولتاژ آفست ورودی و بهره‌ی ولتاژ مدار باز را به دست آورید.

۲-۴ تعیین فرکانس قطع OpAmp در حالت مدار باز

شکل ۲ تقویت‌کننده‌ی غیرمعکوس‌کننده‌ای با بهره‌ی ۱۰۰- را نشان می‌دهد. در این قسمت از آزمایش، قصد داریم با اندازه‌گیری فرکانس قطع تقویت‌کننده‌ی غیرمعکوس‌کننده، تخمینی از فرکانس قطع بالای تقویت‌کننده‌ی عملیاتی به دست آوریم.



شکل ۲ تقویت‌کننده‌ی عملیاتی در آرایش تقویت‌کننده‌ی غیرمعکوس‌کننده به منظور اندازه‌گیری فرکانس قطع تقویت‌کننده‌ی عملیاتی.

سوال ۱: نشان دهید با داشتن فرکانس قطع تقویت‌کننده‌ی شکل ۲ $(f_c)_{Amp}$ و بهره‌ی ولتاژ حلقه باز تقویت‌کننده‌ی عملیاتی (G_0) می‌توان فرکانس قطع بالای تقویت‌کننده‌ی عملیاتی $(f_c)_{OpAmp}$ را به صورت زیر تعیین نمود.

$$(f_c)_{OpAmp} \approx \frac{100}{G_0} (f_c)_{Amp}$$


شبه‌سازی ۲: با شبیه‌سازی مدار شکل ۲، فرکانس قطع مدار را اندازه‌گیری نموده و به کمک آن، فرکانس قطع تقویت‌کننده‌ی عملیاتی را محاسبه نمایید.


مدار شکل ۲ را ببندید. فرکانس قطع بالای مدار را اندازه‌گیری نمایید. با استفاده از مقادیر به دست آمده برای فرکانس قطع بالای مدار و بهره‌ی ولتاژ حلقه باز تقویت‌کننده‌ی عملیاتی، فرکانس قطع تقویت‌کننده‌ی عملیاتی را محاسبه نمایید.

مدار را باز نکنید تا در بخش بعد نیز از آن استفاده نمایید. ☠️

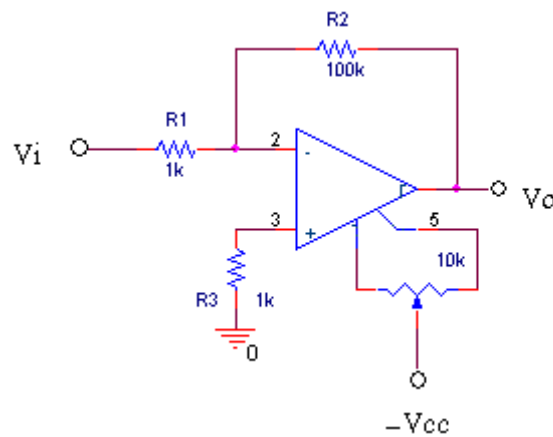
اندازه‌گیری ولتاژ آفست ورودی و جبران‌سازی آن

در مدار شکل ۲، اگر ولتاژ ورودی را صفر کنید (ورودی را به زمین کنید) می‌توانید در خروجی ولتاژ آفست را اندازه‌گیری نمایید.

سوال ۲: آیا ولتاژ آفست اندازه‌گیری شده در این بخش همان ولتاژ آفست اندازه‌گیری شده در بخش نخست این آزمایش است؟ 

شبه‌سازی ۳: با شبیه‌سازی مدار شکل ۲ با ورودی صفر، ولتاژ آفست خروجی را اندازه‌گیری نمایید. 
در مدار بخش قبل، با اتصال ورودی به زمین (صفر کردن ورودی) مقدار ولتاژ آفست خروجی را اندازه‌گیری نمایید.


در تقویت‌کننده‌ی عملیاتی ۷۴۱ می‌توان با تکمیل مدار به صورت نشان داده شده در شکل ۳، ولتاژ آفست (انحراف) خروجی را جبران نمود. مدار را تکمیل نمایید و با تنظیم پتانسیومتر، ولتاژ آفست خروجی را جبران نمایید.



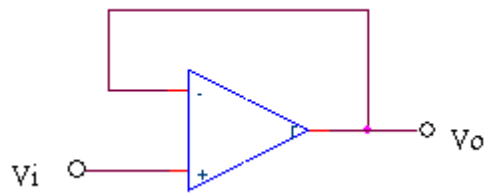
شکل ۳ تکمیل مدار شکل ۲ به منظور جبران‌سازی ولتاژ آفست خروجی.

۳-۴ تعیین ضریب Slew Rate (حد سرعت تغییرات در خروجی)

شکل ۴ تقویت‌کننده‌ی عملیاتی را در آرایش بهره واحد^{۱۲} نشان می‌دهد که قصد داریم از آن برای اندازه‌گیری ضریب Slew Rate تقویت‌کننده‌ی عملیاتی استفاده نماییم.

شبه‌سازی ۴: با شبیه‌سازی مدار شکل ۴ به ازای ورودی موج مربعی با دامنه‌ی ۵ ولت و فرکانس ۱۰ کیلوهرتز، شکل موج خروجی را به همراه شکل موج ورودی مشاهده کرده و ضریب Slew Rate را محاسبه نمایید. 

¹² Unity Gain



شکل ۴ تقویت‌کننده‌ی عملیاتی در آرایش بهره واحد به منظور اندازه‌گیری ضریب Slew Rate تقویت‌کننده‌ی عملیاتی.

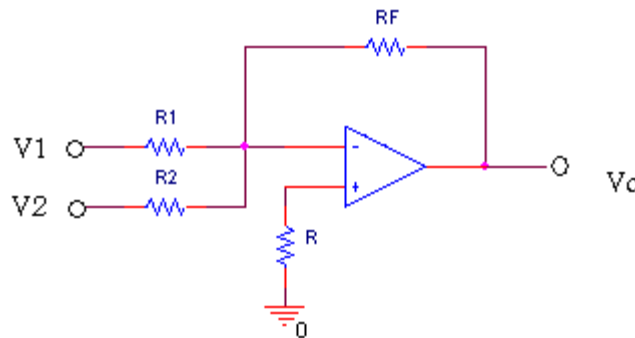
مدار شکل ۴ را ببندید. موجی مربعی با دامنه‌ی ۵ ولت و فرکانس ۱۰ کیلوهرتز به ورودی اعمال نمایید. با مشاهده و بررسی شکل موج خروجی، ضریب Slew Rate را برحسب $V/\mu S$ اندازه‌گیری نمایید. تقویت‌کننده‌ی عملیاتی ۷۴۱ را با تقویت‌کننده عملیاتی سریع‌تری مانند LH0024 یا LF356 جایگزین کنید. با بررسی مجدد شکل موج خروجی، ضریب Slew Rate را برای آن اندازه‌گیری نمایید. سپس، با اعمال ورودی سینوسی با دامنه‌ی ۵ ولت و فرکانس ۱۰۰ کیلوهرتز به بررسی شکل موج خروجی و عملکرد مدار بپردازید.

آزمایش ۵: کاربردهای خطی تقویت کننده‌های عملیاتی

هدف از این آزمایش، مطالعه‌ی برخی از کاربردهای خطی تقویت کننده‌های عملیاتی است.

۱-۵ مدار جمع کننده

مدار شکل ۱ مدار جمع کننده‌ای را نشان می‌دهد که با استفاده از تقویت کننده‌ی عملیاتی پیاده‌سازی شده است.



شکل ۱ مدار جمع کننده با استفاده از تقویت کننده‌ی عملیاتی

سوال ۱: رابطه‌ی خروجی بر حسب ورودی را برای مدار جمع کننده‌ی شکل ۱ به دست آورید.

مدار شکل ۱ را ببینید.

الف: ورودی V1 را به مولد سیگنال سینوسی و ورودی V2 را به منبع ولتاژ DC قابل تنظیم متصل نمایید. با تغییر مقدار ولتاژ DC ورودی و دامنه و فرکانس شکل موج سینوسی ورودی، اثر آن را در خروجی ملاحظه نمایید. برای شرایطی که سیگنال V1 سینوسی با دامنه‌ی ۲ ولت و فرکانس یک کیلوهرتز و سیگنال V2 ولتاژ DC ۳ ولت است خروجی را ثبت نمایید.

ب: ورودی V1 را به سیگنال موج مربعی و ورودی V2 را به سیگنالی سینوسی متصل نمایید. در هر یک از حالت‌های زیر، خروجی را مشاهده نموده و ثبت نمایید. تعبیر شما از عملکرد مدار چیست؟


$$f_1 \ll f_2$$


$$f_1 \gg f_2$$


$$f_1 \approx f_2$$

ج: هر دو ورودی V1 و V2 را از نوع سینوسی با دامنه‌ی یکسان انتخاب کنید. با نزدیک کردن فرکانس دو ورودی به هم، پدیده‌ی ضربان را مشاهده نمایید.

سوال ۲: چرا پدیده‌ی ضربان را این‌چنین نامگذاری کرده‌اند؟ 

سوال ۳: با نوشتن رابطه‌ی خروجی بر حسب روابط ورودی در این حالت خاص، علت بروز پدیده‌ی ضربان را توجیه نمایید. 

شبیه‌سازی ۱: مدار شکل ۱ را مطابق با بندهای سه‌گانه‌ی این بخش از آزمایش شبیه‌سازی نموده و نتایج را گزارش نمایید. 

سوال ۴: وقتی دو ورودی سینوسی با فرکانس‌های $f_1 \ll f_2$ به مدار اعمال گردد خروجی به مدولاسیون دامنه شباهت خواهد داشت (می‌توانید با شبیه‌سازی این حالت، خروجی را مشاهده نمایید). تفاوت مدولاسیون دامنه با عملکرد این مدار در چیست؟ 

بیشتر بدانید ۱: 

از ترکیب خطی دو ارتعاش هارمونیک ساده (تُن^۳) که فرکانس نزدیک به هم دارند پدیده‌ای به نام ضربان^۴ ایجاد می‌شود. به بیان ساده‌تر، اگر دو موج با دامنه یکسان و فرکانس‌های متفاوت داشته باشیم وقتی اختلاف فرکانسی اندک است، مجموع آنها موجی است که ضربان روی آن اتفاق می‌افتد و آنچه می‌شنویم، صدای زنش است؛ به این خاطر که دو فرکانس به اندازه‌ای نزدیک و مشابه یکدیگر هستند، هردو به یک نسبت پرده بازلیلر را تحریک کرده و لذا دارای یک ارتفاع هستند. وقتی دو تن پی‌درپی هم‌فاز و غیرهم‌فاز می‌شوند، ارتعاشاتی را در این پرده سبب می‌شوند که دامنه آن پی‌درپی کم و زیاد می‌شود. در نتیجه، صدایی که می‌شنویم، همانند تُن واحدی است که بلندی آن به نرمی و متناوب (با تناوبی به میزان اختلاف فرکانسی دو تن اولیه) تغییر می‌کند. استفاده از این پدیده برای هم فرکانس کردن دو موج یا در موسیقی برای دقیق کردن کوک سازهای موسیقی بسیار پراهمیت و کاربردی است.

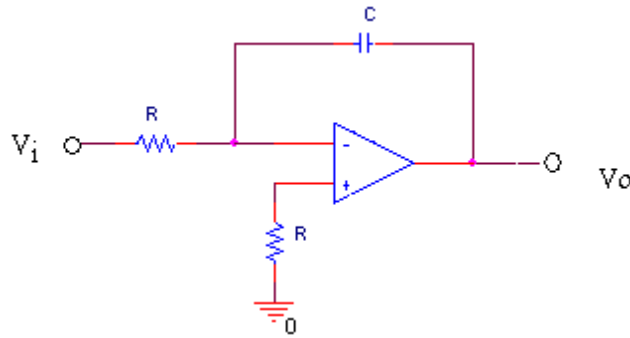
۲-۵ مدار انتگرال‌گیر

شکل ۲ شماتیک یک مدار انتگرال‌گیر را نشان می‌دهد.

سوال ۵: رابطه‌ی خروجی بر حسب ورودی را برای این مدار به دست آورید. 


¹³ tone


¹⁴ beat



شکل ۲ شماتیک مدار انتگرال گیر با استفاده از تقویت کننده‌ی عملیاتی

مدار شکل ۲ را ببینید و عملکرد مدار را به ازای ورودی‌های موج مربعی و سینوسی مورد مطالعه قرار دهید. در مدار شکل زیر اثر فرکانس را مطالعه نمایید (در دو حالت ورودی سینوسی و پله ای).

وجود آفست ممکن است عملکرد مدار را مختل نماید. در صورت نیاز، اثر آفست را جبران‌سازی کنید. 

شبیه‌سازی ۲: مدار شکل ۲ را به ازای ورودی‌های سینوسی و موج مربعی شبیه‌سازی نموده و نتایج را گزارش نمایید. 

۳-۵ مدارهای PI و PID

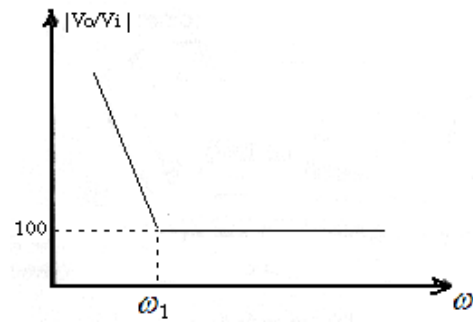
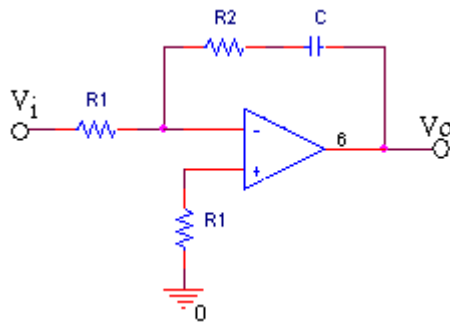
در کنترل سیستم‌ها اغلب لازم می‌گردد که از سیگنال خطا، علاوه بر تقویت معمولی، انتگرال نیز گرفته شود. بدین ترتیب اگر E سیگنال خطا (اختلاف بین وضعیت فعلی و وضعیت مطلوب سیستم) باشد سیگنال کنترل (خروجی مدار کنترل‌گر) شامل بخش‌های تناسبی^{۱۵} و انتگرالی^{۱۶} به صورت زیر خواهد بود:

$$V_o = K_p E + K_i \int E dt$$

شکل ۳ نمونه‌ای از یک مدار کنترل PI را به همراه مجانب‌های مشخصه‌ی فرکانسی آن نشان می‌دهد.

¹⁵ proportional

¹⁶ integral



شکل ۳ شماتیک مدار کنترل گر PI و مجانب‌های مشخصه‌ی فرکانسی آن.

سوال ۶: با تحلیل مدار، رابطه‌ی بین مقادیر کلیدی نمودار مجانب‌های مشخصه‌ی فرکانسی و عناصر مدار را به دست آورید.

مدار را برای $f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi} = 100\text{Hz}$ طراحی نمایید.

سوال ۷: اگر مدار درست طراحی شده باشد انتظار دارید بهره‌ی ولتاژ در فرکانس ۱۰۰ هرتز چقدر باشد؟

شبیه‌سازی ۳: با شبیه‌سازی مدار طراحی شده، پاسخ فرکانسی مدار را به دست آورده و گزارش کنید. مدار را ببندید و بهره‌ی ولتاژ را در فرکانس‌های مختلف (به طور مثال از ۲۰ هرتز تا ۳ کیلو هرتز به صورت لگاریتمی) اندازه‌گیری کنید.

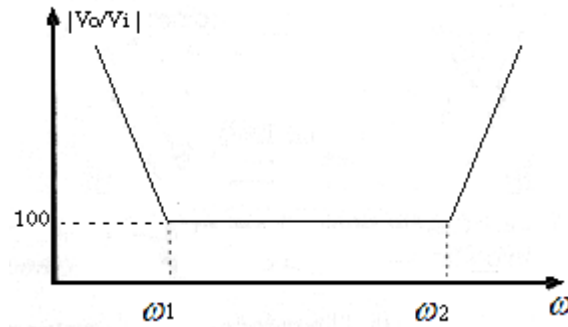
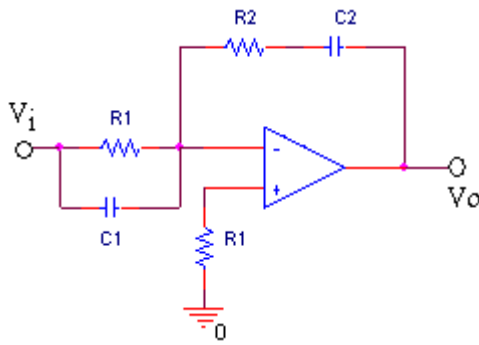
با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده، نمودار مشخصه‌ی فرکانسی مدار را رسم نمایید.

در مدار کنترل گر PID، سیگنال کنترل شامل بخش‌های تناسبی، انتگرالی و مشتقی^{۱۷} می‌باشد.

$$V_o = K_p E + K_i \int E dt + K_d \frac{dE}{dt}$$

شکل ۴ نمونه‌ای از یک مدار کنترل PID را به همراه مجانب‌های مشخصه‌ی فرکانسی آن نشان می‌دهد.

¹⁷ derivative



شکل ۴ شماتیک مدار کنترل گر PID و مجانب‌های مشخصه‌ی فرکانسی آن.

سوال ۶: با تحلیل مدار، رابطه‌ی بین مقادیر کلیدی نمودار مجانب‌های مشخصه‌ی فرکانسی و عناصر مدار را به دست آورید.

مدار را برای $f_1 = \frac{\omega_1}{2\pi} = 100\text{Hz}$ و $f_2 = \frac{\omega_1}{2\pi} = 1\text{kHz}$ طراحی نمایید.

سوال ۷: اگر مدار درست طراحی شده باشد انتظار دارید بهره‌ی ولتاژ در فرکانس‌های ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ هرتز چقدر باشد؟

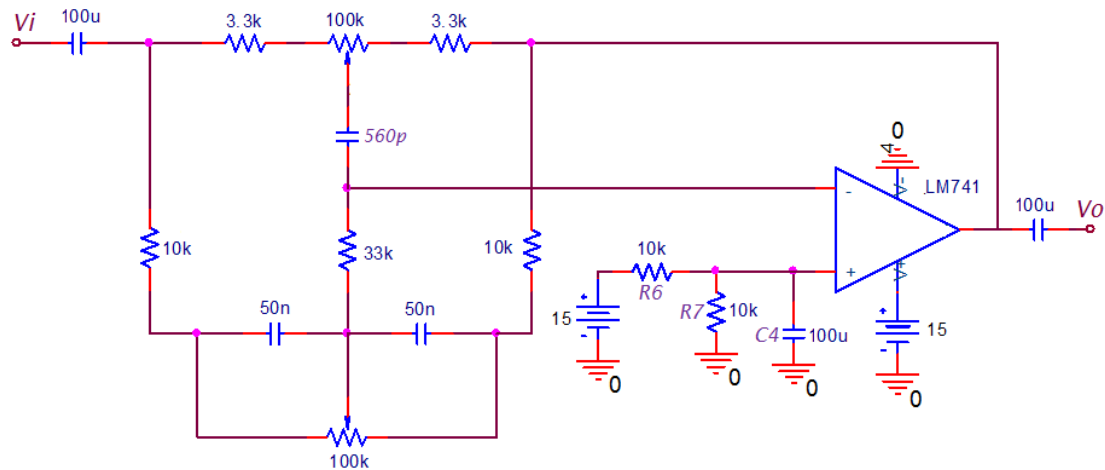
شبیه‌سازی ۴: با شبیه‌سازی مدار طراحی شده، پاسخ فرکانسی مدار را به دست آورده و گزارش کنید. مدار را ببندید و بهره‌ی ولتاژ را در فرکانس‌های مختلف (به طور مثال از ۲۰ هرتز تا ۵ کیلو هرتز به صورت لگاریتمی) اندازه‌گیری کنید.

با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده، نمودار مشخصه‌ی فرکانسی مدار را رسم نمایید.

۴-۵ تغذیه‌ی OpAmp با یک منبع در مدار کنترل تُن صدا^{۱۸}

شکل ۵ شماتیک یک مدار کنترل تُن صدا را نشان می‌دهد.

¹⁸ Tone control



شکل ۵ شماتیک مدار کنترل تُن صدا. دقت کنید که برای تغذیه‌ی تقویت‌کننده‌ی عملیاتی تنها از یک منبع تغذیه استفاده گردیده است.

شبیه‌سازی ۵: مدار شکل ۵ را در شرایطی که هر دو پتانسیومتر در موقعیت مرکزی خود هستند، تحلیل فرکانسی نموده و پاسخ فرکانسی آن را رسم کنید. سپس با شبیه‌سازی مدار به ازای شرایط کرانه‌ای موقعیت پتانسیومترها، اثر تغییر پتانسیومتر بر پاسخ فرکانسی را مورد بررسی قرار دهید. برای جمع‌بندی نتایج بهتر است: پاسخ فرکانسی مدار را در حالتی که هر دو پتانسیومتر در موقعیت مرکزی خود قرار دارند، پاسخ فرکانسی مدار را در حالتی که هر دو پتانسیومتر در موقعیت حداکثر خود قرار دارند، پاسخ فرکانسی مدار را در حالتی که هر دو پتانسیومتر در موقعیت حداقل خود قرار دارند را به طور همزمان ترسیم نمایید.

شبیه‌سازی ۶: مدار شکل ۵ را با ورودی موج مربعی با دامنه‌ی ۵ ولت و فرکانس یک کیلو هرتز و در شرایطی که هر دو پتانسیومتر در موقعیت مرکزی خود هستند تحلیل زمانی نمایید و خروجی را مشاهده کنید. سپس با تغییر مقدار پتانسیومترها (یکی یکی) و تکرار شبیه‌سازی، اثر تغییرات مقدار پتانسیومتر بر شکل موج خروجی را مشاهده نمایید. دیدن مولفه‌های فرکانسی خروجی در شرایط مختلف و یافتن ارتباط آن با شکل موج زمانی می‌تواند به درک موضوع کمک نماید. برای دیدن مولفه‌های فرکانسی شکل موج می‌توانید از امکان FFT (دکمه‌ی) در صفحه‌ی Probe نرم‌افزار استفاده کنید.

سوال ۸: در مدار شکل ۵ بر خلاف مدارهایی که تا کنون آزمایش نموده‌اید، تقویت‌کننده‌ی عملیاتی تنها با یک منبع، تغذیه شده است. این امکان به دلیل کدام ویژگی مدار فراهم شده است؟

سوال ۹: نقش مقاومت‌های R6 و R7 چیست؟

سوال ۱۰: نقش خازن C4 چیست؟

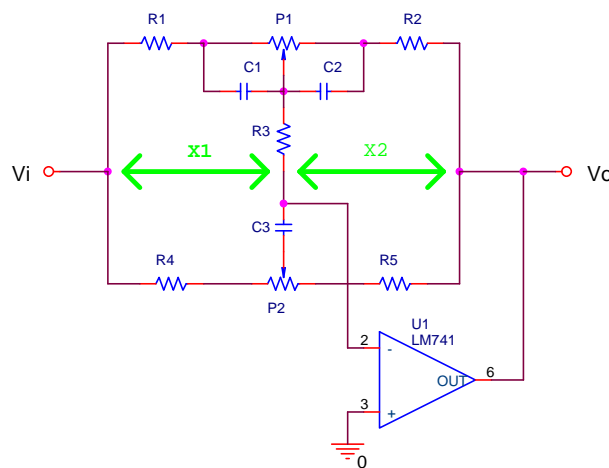
مدار را ببندید. ولتاژ DC را در ورودی و خروجی مدار و همچنین، پایه‌های معکوس‌کننده، غیر معکوس‌کننده و خروجی تقویت‌کننده عملیاتی اندازه‌گیری و ثبت کنید. در صورتی که مقادیر اندازه‌گیری شده با انتظارات شما تطابق ندارد لازم است مدار را عیب‌یابی نمایید.

با اعمال ورودی سینوسی با فرکانس‌های مختلف، عملکرد مدار را در فرکانس‌های پایین، میانی و بالا بررسی کنید.

یک موج مربعی با فرکانس حدود یک کیلوهرتز به ورودی اعمال کنید. هر دو پتانسیومتر را در وضعیت میانی خود قرار داده و خروجی را مشاهده نمایید. سپس با تغییر هر یک از پتانسیومترها، اثر این تغییرات را روی شکل موج خروجی مشاهده و بررسی نمایید. علت مشاهدات خود را توضیح دهید.

بیشتر بدانید 

مدارهای کنترل تُن صدا مثالی از کاربردهای تقویت‌کننده عملیاتی است که در سیستم‌های صوتی کاربرد دارند. با استفاده از مدارهای کنترل تُن صدا می‌توان برخی از مولفه‌های فرکانسی را تقویت و برخی دیگر را تضعیف نمود و با این کار، پاسخ فرکانسی را به نحوی تنظیم کرد که نتیجه مطلوب حاصل گردد. همچنین می‌توان از آن برای دستکاری عمده صدا استفاده نمود. شکل ۶ نمونه‌ای ساده‌ای از مدارهای کنترل تُن صدا را نمایش می‌دهد.

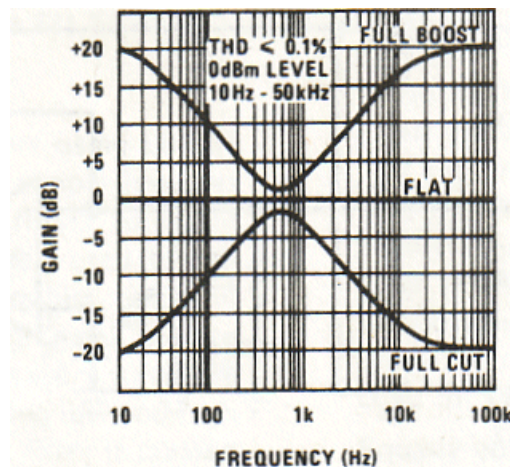


شکل ۶ شماتیک یک نمونه‌ی ساده از مدارهای کنترل تُن صدا

توجه کنید که ساختار مدار مشابه یک تقویت‌کننده‌ی معکوس‌کننده‌ی ساده است؛ با این تفاوت که مقاومت‌های شاخه‌ی فیدبک با مدارهای پیچیده‌تری شامل مقاومت و خازن جایگزین شده‌اند. در شکل ۶، امپدانس بین ورودی و پایه‌ی معکوس‌کننده‌ی تقویت‌کننده‌ی عملیاتی با X_1 و امپدانس بین خروجی و پایه‌ی معکوس‌کننده با X_2 نامگذاری شده است. بنابراین بهره ولتاژ مدار به صورت $A_V = -X_2/X_1$ می‌باشد که X_1 و X_2 مقادیری وابسته به فرکانس می‌باشند. اگر هر دو پتانسیومتر در

موقعیت مرکزی خود تنظیم گردند در تمامی فرکانسها $X1=X2$ و $AV=-1$ خواهد شد. در این شرایط پاسخ فرکانسی در حالت هموار خود قرار خواهد داشت. حال می‌خواهیم بدانیم تغییر دادن هر کدام از پتانسیومترها چه تاثیری در پاسخ فرکانسی دارد.

ابتدا پتانسیومتر P1 را در نظر بگیرید. در فرکانس‌های بالا، خازن‌های C1 و C2 اتصال کوتاه بوده و پتانسیومتر را بای‌پس^{۱۹} می‌کنند. بنابراین تغییر این پتانسیومتر تاثیری بر مولفه‌های فرکانس بالای سیگنال ندارد. در فرکانس‌های پایین، امپدانس این خازن‌ها افزایش یافته و پتانسیومتر تاثیرگذار می‌شود. بنابراین پتانسیومتر P1 به عنوان کنترل باس^{۲۰} عمل کرده و امکان تقویت یا تضعیف مولفه‌های فرکانس پایین سیگنال را فراهم می‌سازد. حال پتانسیومتر P2 را در نظر بگیرید. در فرکانس‌های پایین خازن C3 مدار باز بوده و اتصال سر وسط پتانسیومتر را از پایه‌ی معکوس‌کننده تقویت‌کننده‌ی عملیاتی قطع می‌کند. بنابراین تغییر پتانسیومتر P2 فقط بر مولفه‌های فرکانس بالای سیگنال موثر بوده و تاثیری بر مولفه‌های فرکانس پایین ندارد. از این رو این پتانسیومتر به عنوان کنترل تربل^{۲۱} عمل کرده و امکان تقویت و یا تضعیف مولفه‌های فرکانس بالای سیگنال را فراهم می‌سازد. شکل ۷ محدوده تغییرات پاسخ فرکانسی مدار کنترل تُن صدا را نشان می‌دهد.



شکل ۷ پاسخ فرکانسی‌های قابل دستیابی برای مدار کنترل تُن ساده‌ی شکل ۶.

۵-۵ مدار حل معادله دیفرانسیل خطی (اختیاری)

مدار حل یک معادله دیفرانسیل خطی (مثلاً مرتبه ۲) را به کمک تقویت‌کننده‌های عملیاتی طراحی کرده و نتیجه را گزارش کنید.

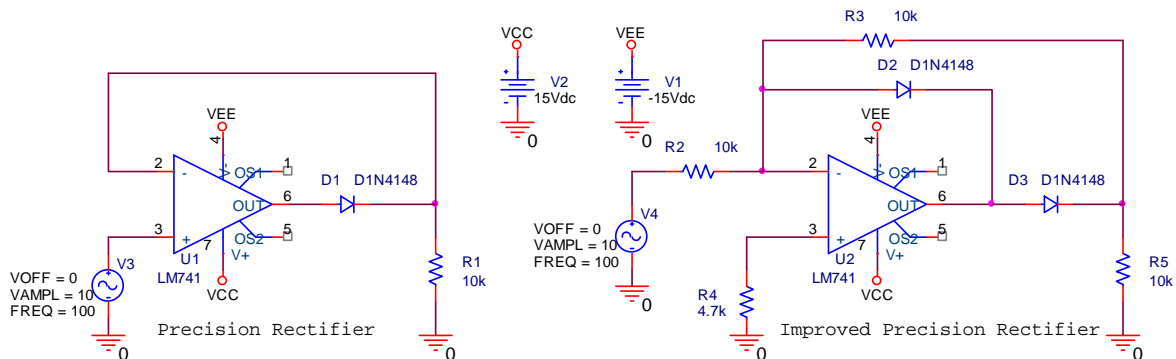
¹⁹ bypass

²⁰ bass control

²¹ treble control

امتیازی ۱:

مدارهای نشان داده شده در شکل زیر را در نظر بگیرید:



شکل ۶-۳ مدار یکسوساز دقیق^{۲۳} (چپ) و مدار یکسوساز دقیق بهبودیافته^{۲۴} (راست)

الف: با شبیه‌سازی این مدارها (با ورودی سینوسی ۱۰۰ هرتز و با دامنه‌ی ۱۰ ولت)، نحوه‌ی عملکرد هر یک از این مدارها را بررسی نموده و گزارش کنید.

ب: بر این اساس، آیا می‌توانید بگویید چرا برای این مدارها از عنوان «یکسوساز دقیق» استفاده می‌گردد؟

ج: با تغییر فرکانس موج سینوسی ورودی به یک کیلو هرتز، «مدار یکسوساز دقیق» را مجدداً شبیه‌سازی نمایید. با مشاهده‌ی شکل موج خروجی بررسی کنید که آیا شکل موج خروجی مدار مطابق انتظار است؟ با بررسی شکل موج خروجی OpAmp به سادگی می‌توانید عامل اشکال را بیابید.

د: با بررسی پاسخ مدار «یکسوساز دقیق بهبودیافته» به همین ورودی (یک کیلو هرتز)، عملکرد دو مدار را با هم مقایسه کنید.

ه: بر این اساس آیا می‌توانید بگویید چرا این مدار «یکسوساز دقیق بهبودیافته» نامیده می‌شود؟ عامل بهبود چیست؟

و: تقویت‌کننده‌ی عملیاتی LM741 را با LF351 جایگزین نموده و بند ج را تکرار کنید. نتایج به دست آمده را تحلیل نمایید.

²³ Precision rectifier

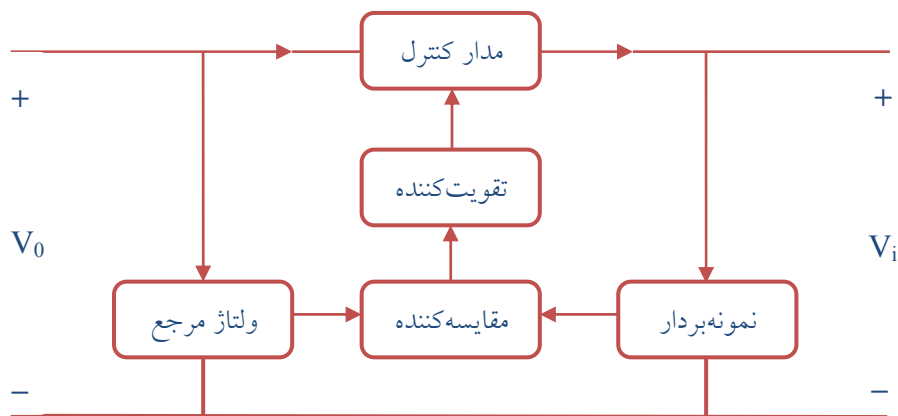
²⁴ Improved precision rectifier

آزمایش ۷: تثبیت کننده‌ی ولتاژ (رگولاتور ولتاژ)^{۲۵}

هدف از این آزمایش، آشنایی با منابع تغذیه تثبیت شده‌ای است که در آنها از تقویت کننده‌های عملیاتی در نقش مقایسه کننده استفاده شده است.

۷-۱ مقدمه

نمودار بلوکی و اجزای سازنده‌ی یک تثبیت کننده‌ی ولتاژ پیشرفته در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که این نمودار بلوکی نشان می‌دهد تثبیت کننده‌ی ولتاژ از نمونه بردار، مقایسه کننده، تقویت کننده، ولتاژ مرجع و مدار کنترل تشکیل شده است. در ادامه به طور مختصر به معرفی هر یک از این اجزا پرداخته شده است.



شکل ۱ نمودار بلوکی یک تثبیت کننده‌ی ولتاژ پیشرفته.

مدار نمونه بردار: این مدار می‌تواند به سادگی از یک تقسیم کننده ولتاژ تشکیل شده باشد که دو سر آن به ولتاژ خروجی متصل باشد و سر وسط جریان کشی نداشته باشد. ولتاژ نمونه برداری شده از سر وسط به یک مدار با امپدانس ورودی بزرگ داده می‌شود تا جریان این سر قابل صرف نظر باشد.

مدار ولتاژ مرجع: ساده ترین مدار ولتاژ مرجع با استفاده از یک دیود زنر ساخته می‌شود. با تغییر جریان این عنصر، ولتاژ دو سر آن تقریباً ثابت باقی می‌ماند.

مدار مقایسه کننده: این مدار می‌تواند یک تقویت کننده‌ی تفاضلی یا یک تقویت کننده‌ی عملیاتی باشد. انتخاب دوم به دلیل امپدانس ورودی زیاد آن، از نظر عملکرد بهتر مدار نمونه بردار و ولتاژ مرجع برتری دارد.

²⁵ Voltage regulator

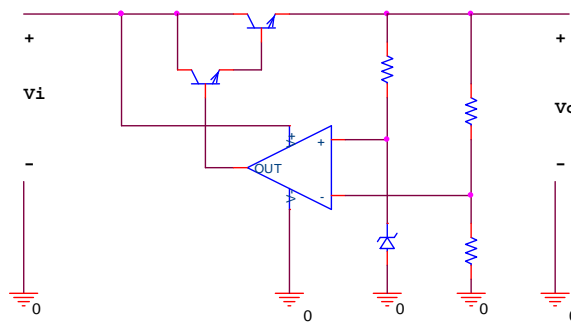
تقویت‌کننده DC: در صورتی که در بخش مقایسه‌کننده از یک تقویت‌کننده عملیاتی استفاده گردد، سیگنال تفاضل به اندازه‌ی کافی تقویت می‌شود و در نتیجه ضرورتی به تقویت‌کننده‌ی اضافی نیست. چنانچه مقایسه‌کننده یک تقویت‌کننده‌ی تفاضلی باشد، استفاده از یک مدار مناسب (معمولاً یک ترانزیستور در ترکیب امیتر مشترک) در بسیاری موارد الزامی است.

مدار کنترل: این بخش در اکثر مدارهای تنظیم ولتاژ از یک ترانزیستور و یا یک زوج دارلینگتون تشکیل شده است. مدار کنترل در حقیقت جریان خروجی را توسط ولتاژ خروجی تقویت‌کننده کنترل می‌کند. عنصر کنترل می‌تواند به صورت سری (در ولتاژهای خروجی زیاد و جریان‌های کم و متوسط) یا موازی (در جریان‌های زیاد و ولتاژهای خروجی کم و متوسط) با بار قرار گیرد.

مدار محدودکننده‌ی جریان: هر مدار تنظیم‌کننده‌ی ولتاژ فقط قادر است تا حد بیشینه‌ی جریان مجاز ترانزیستور کنترل خود، جریان بار را در خروجی تامین کند. جریان‌کشی بیشتر از مدار باعث سوختن این ترانزیستور و در نتیجه از کار افتادن مدار می‌شود. از این رو از مدار محدودکننده‌ی جریان استفاده می‌گردد.

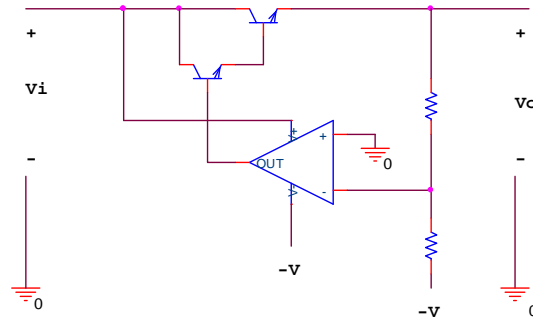
۲-۷ اصول کلی

مدار شکل ۲ را در نظر بگیرید. در این مدار، تقویت‌کننده‌ی عملیاتی نقش مقایسه‌کننده و تقویت‌کننده را بازی می‌کند که یکی از ورودی‌های آن به ولتاژ مرجع ثابت و ورودی دیگر به نمونه‌ای از ولتاژ خروجی متصل است. سیگنال خروجی تقویت‌کننده‌ی عملیاتی به یک ترانزیستور (زوج دارلینگتون) سری فرمان می‌دهد تا ولتاژ خروجی را کنترل نماید.



شکل ۲ شماتیک ساده‌ای از مدار تثبیت‌کننده‌ی ولتاژ.

به منظور فراهم شدن امکان تنظیم ولتاژ خروجی در محدوده‌ی صفر تا ولتاژ بیشینه مورد نظر، لازم است تقویت‌کننده‌ی عملیاتی با دو منبع مثبت و منفی تغذیه گردد. همچنین لازم است برای مدار نمونه بردار از ولتاژ منفی استفاده شود. شکل ۳ شماتیک مدار را پس از انجام این اصلاحات نشان می‌دهد.



شکل ۳ شماتیک مدار بهبود یافته‌ی تثبیت ولتاژ. در این طرح، امکان تنظیم ولتاژ خروجی از صفر تا بیشینه مقدار خروجی مطلوب فراهم شده است.

در عمل برای ایجاد ولتاژ مرجع $-V$ از یک ثانویه‌ی فرعی در ترانسفورماتور تغذیه استفاده می‌شود که پس از یکسوسازی، بوسیله‌ی یک دیود زنر و یا یک تقویت کننده‌ی عملیاتی تثبیت می‌شود. این ولتاژ مرجع باید از تثبیت حرارتی مطلوبی نیز برخوردار باشد.

به منظور محدود کردن جریان نیز یک مقاومت خیلی کوچک در مسیر جریان خروجی قرار داده می‌شود. از ولتاژ دو سر این مقاومت (که متناسب با جریان خروجی است) برای فرمان دادن به مدار ترانزیستوری محدود کننده‌ی جریان استفاده می‌گردد. برای دقت بیشتر می‌توان از یک تقویت کننده‌ی عملیاتی برای مقایسه‌ی این ولتاژ با ولتاژ مرجع و محدود کردن جریان خروجی استفاده نمود.

۳-۷ تثبیت کننده‌ی ولتاژ با استفاده از تقویت کننده‌ی عملیاتی

مدار شکل ۴ را در نظر بگیرید. طرز کار مدار را به دقت بررسی کنید.


سوال ۱: نقش مقاومت R_s چیست؟ 

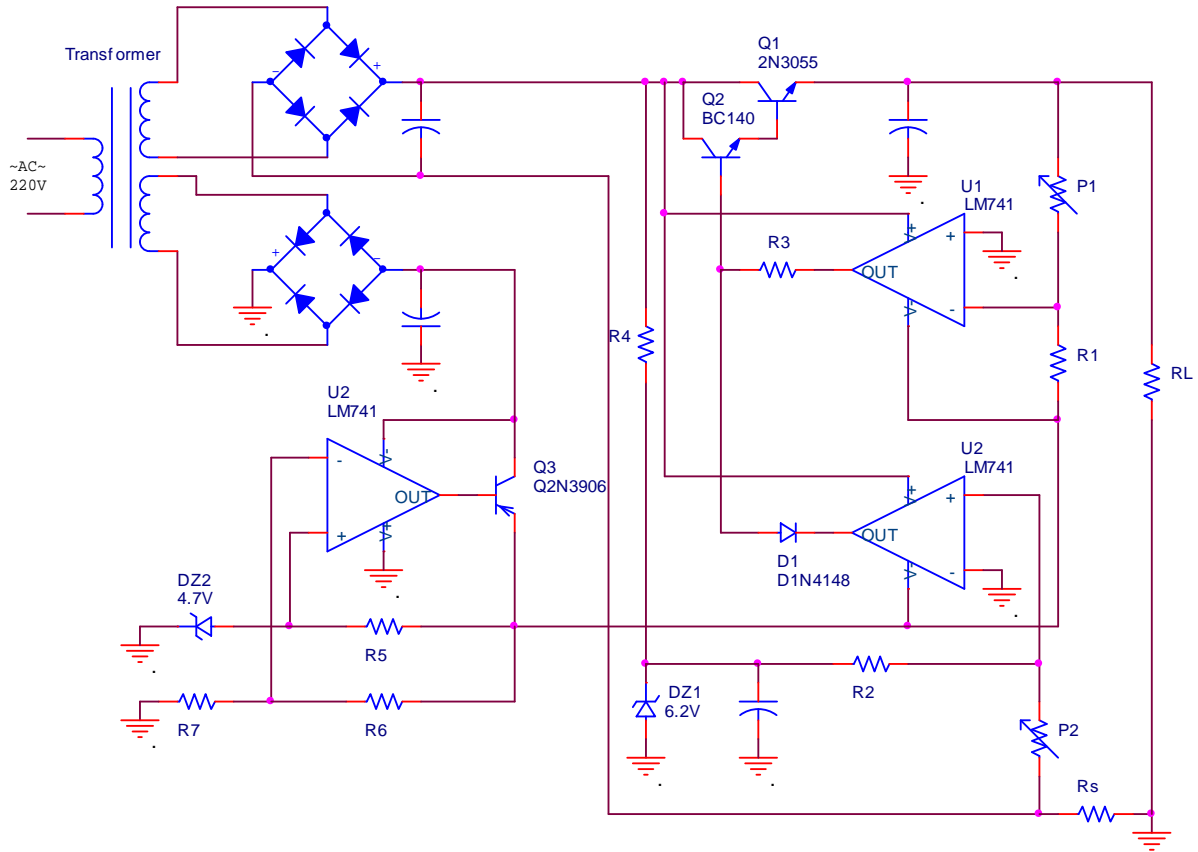
سوال ۲: نقش پتانسیومتر P_1 چیست؟ 

سوال ۳: نقش پتانسیومتر P_2 چیست؟ 

سوال ۴: نقش زنر Z_1 چیست؟ 

سوال ۵: ضرایب تثبیت مدار (S_V ، S_I و S_T) را تعیین نمایید. 

مدار را برای ولتاژ خروجی قابل تنظیم از صفر تا ۱۰ ولت، بیشینه جریان قابل تنظیم خروجی تا ۲ آمپر و ولتاژ مرجع $-V$ حدود -6 ولت طراحی نمایید. 



شکل ۴ شماتیک مدار تثبیت‌کننده ولتاژ با قابلیت تنظیم ولتاژ خروجی و میزان محدودیت جریان.


شبیه‌سازی ۱: با شبیه‌سازی مدار طراحی شده، صحت عملکرد طرح را ارزیابی کنید. 

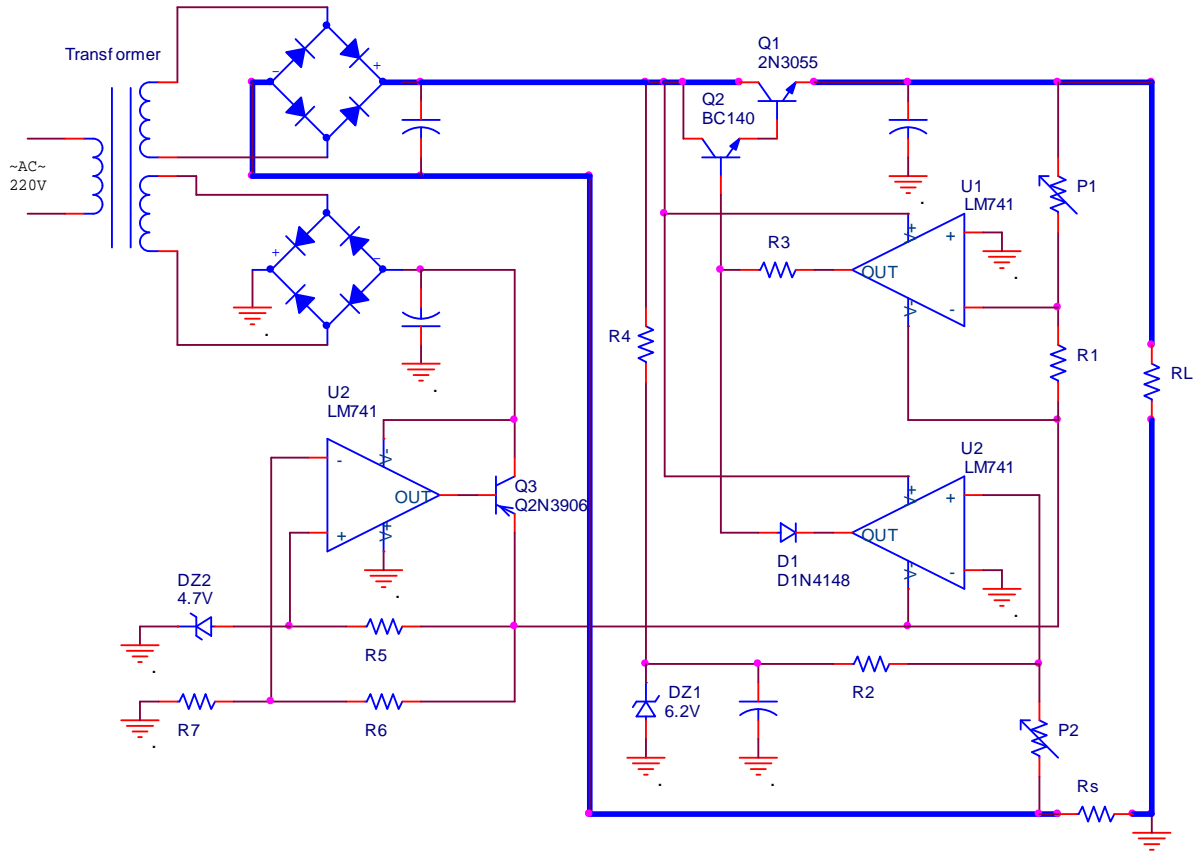
شبیه‌سازی ۲: با جاروب کردن ولتاژ ورودی، ضریب تثبیت ولتاژ را برای مدار طراحی شده تعیین کنید. 

شبیه‌سازی ۳: با جاروب کردن مقاومت بار، ضریب تثبیت جریان را به دست آورده و عملکرد محدود کنندگی جریان را بررسی کنید. 

شبیه‌سازی ۴: با انجام شبیه‌سازی، ضریب تثبیت دما را برای مدار تعیین نمایید. 

مدار را ببندید و صحت عملکرد مدار را بررسی نمایید.

هشدار ۱: سیم‌ها و اتصالاتی که جریان خروجی در آن جاری می‌گردد دارای افت ولتاژ قابل توجهی خواهد بود از این رو توصیه می‌گردد ولتاژ خروجی را با یک ولت متر دیجیتال دقیق و در مجاورت مقایسه‌کننده (تقویت‌کننده عملیاتی U1) اندازه‌گیری نمایید. 



شکل ۵ شماتیک مدار تثبیت‌کننده‌ی ولتاژ با قابلیت تنظیم ولتاژ خروجی و میزان محدودیت جریان. خطوط دارای جریان زیاد (برابر با جریان خروجی) که افت ولتاژ روی آنها می‌تواند قابل توجه باشد در این شماتیک با خطوط ضخیم مشخص گردیده است.

با تغییر ولتاژ ورودی و ثبت ولتاژ خروجی متناظر، ضریب تثبیت ولتاژ را به دست آورید.

با تغییر مقاومت بار و ثبت ولتاژ خروجی متناظر، ضریب تثبیت جریان را به دست آورید.

با مراجعه به برگه اطلاعات تثبیت‌کننده‌ی ولتاژ LM78XX، اطلاعات فنی آن را مطالعه نموده و گزارش کنید.

مدار ثبت کننده‌ی ولتاژ LM7810 را ببینید و ضرایب تثبیت ولتاژ و جریان را برای آن به دست آورید.

با مراجعه به برگه اطلاعات تثبیت‌کننده‌ی ولتاژ LM317، اطلاعات فنی آن را مطالعه نموده و گزارش کنید.

پیوست الف : نحوه نامگذاری المانهای نیمه‌هادی

به منظور استفاده از المانهای نیمه‌هادی لازم است که با نحوه نامگذاری این المانها آشنا باشیم. کارخانه‌های آمریکایی، ژاپنی و اروپایی هر کدام از روش خاص خود برای نامگذاری المانها استفاده می‌کنند که در ادامه به بررسی آنها می‌پردازیم.

روش نامگذاری کارخانه‌های آمریکایی

در این روش نامگذاری رقم اول بیانگر تعداد پیوندهای دیودی می‌باشد که پس از آن حرف N قرار می‌گیرد. پس از این علائم شماره المان ذکر می‌گردد.

| | |
|----|------------------------------|
| 1N | برای دیود |
| 2N | برای ترانزیستور |
| 3N | برای FET و ترانزیستورهای خاص |

به عنوان نمونه 1N4001 دیود، 2N3904 ترانزیستور و 3N140 یک MOSFET می‌باشد.

روش نامگذاری کارخانه‌های ژاپنی

در این روش نامگذاری رقم اول بیانگر تعداد پیوندهای دیودی می‌باشد که پس از آن حرف S قرار می‌گیرد. حرف دوم در این روش نامگذاری با معانی زیر به کار می‌رود.

| | | |
|---|----------------|--------------|
| A | ترانزیستور PNP | فرکانس بالا |
| B | ترانزیستور PNP | فرکانس پایین |
| C | ترانزیستور NPN | فرکانس بالا |
| D | ترانزیستور NPN | فرکانس پایین |

روش نامگذاری کارخانه‌های اروپایی

کارخانه‌های اروپایی از دو حرف برای توصیف المانهای نیمه‌هادی استفاده می‌کنند که مفهوم آنها در جدول‌های زیر ارائه شده است.

| مفهوم حرف اول | |
|---------------|--|
| A | نیمه‌هادی بکار رفته ژرمانیوم است. |
| B | نیمه‌هادی بکار رفته سیلیسیوم است. |
| C | نیمه‌هادی بکار رفته گالیم آرسناید است. |
| D | نیمه‌هادی بکار رفته اندیم آنتیموئید است. |

| | |
|---|---|
| R | نیمه‌هادی برای مصارف خاص مثل حساس به نور بودن و یا هال ژنراتور است. |
|---|---|

| مفهوم حرف دوم | |
|---------------|--|
| A | دیود (به استثنای دیود تونلی، دیود زئر، واراکتور و ...) |
| B | دیود با ظرفیت خازنی متغیر (varactor) |
| C | ترانزیستور کم‌قدرت، فرکانس پایین (AF, LF) |
| D | ترانزیستور قدرت، فرکانس پایین |
| E | دیود تونلی |
| F | ترانزیستور کم‌قدرت، فرکانس بالا (HF,RF) |
| M,K,H | هال ژنراتور برای مصارف مختلف |
| L | ترانزیستور توان بالا، فرکانس بالا |
| P | نیمه‌هادی حساس به اشعه (مثل المان‌های نوری) |
| Q | نیمه‌هادی ایجاد کننده اشعه (مثل دیودهای نورافشان LED) |
| R | یکسوکننده‌های کنترل شونده (مثل تریستور) |
| S | ترانزیستور سوئیچ |
| X | دیود برای چندبرابر کردن فرکانس |
| Y | دیود قدرت |
| Z | دیود زئر |
| T | تریستور (قدرت) |
| U | ترانزیستور سوئیچ |

بنابراین برای کاربرد موردنظر می‌توان دو حرف اول را حدس زد. نمونه‌های زیر را ببینید.

| نمونه‌هایی از نامگذاری المان‌های نیمه‌هادی | |
|--|-----------------------------|
| 2SA530 | ترانزیستور PNP, HF |
| BP101 | فتوترانزیستور |
| 2SB54 | ترانزیستور ژرمانیوم PNP, LF |
| AF239 | ترانزیستور ژرمانیوم HF |
| BA137 | دیود سیلیسیوم |
| AE100 | دیود تونلی |

پیوست ب : نحوه تعیین مقدار مقاومت‌ها

مقدار مقاومت‌ها را معمولاً به کمک حلقه‌های رنگی روی آنها مشخص می‌کنند. هر رنگ به عنوان یک کد و دارای شماره خاصی است.

مقاومت‌های دارای چهار حلقه رنگی

برای خواندن مقدار مقاومت از نزدیکترین رنگ به لبه مقاومت شروع کنید و اعداد مربوط به حلقه‌های رنگی اول و دوم را کنار هم بگذارید. عدد مربوط به رنگ سوم بیانگر تعداد صفرهایی است که باید جلوی دو رقم قبل قرار گیرد. عدد به دست آمده مقدار مقاومت بر حسب اهم می‌باشد. حلقه رنگی چهارم تعیین کننده درصد حداکثر خطای مقاومت می‌باشد که به آن تلورانس (tolerance) می‌گویند.

| نحوه تعیین مقاومت برای مقاومت‌های دارای چهار حلقه رنگی | | | | |
|--|----------|----------|------------|----------------------|
| رنگ | حلقه اول | حلقه دوم | حلقه سوم | حلقه چهارم (تلورانس) |
| سیاه | | 0 | $*10^0$ | |
| قهوه‌ای | 1 | 1 | $*10^1$ | |
| قرمز | 2 | 2 | $*10^2$ | %2 |
| نارنجی | 3 | 3 | $*10^3$ | |
| زرد | 4 | 4 | $*10^4$ | |
| سبز | 5 | 5 | $*10^5$ | |
| آبی | 6 | 6 | $*10^6$ | |
| بنفش | 7 | 7 | | |
| خاکستری | 8 | 8 | | |
| سفید | 9 | 9 | | |
| طلایی | | | $*10^{-1}$ | %5 |
| نقره‌ای | | | $*10^{-2}$ | %10 |

| مثالهایی برای محاسبه مقاومت‌های دارای چهار حلقه رنگی | | | | |
|--|------|---------|---------|---------------------|
| خاکستری | قرمز | قهوه‌ای | طلایی | $820\Omega \pm \%5$ |
| قهوه‌ای | سیاه | قرمز | نقره‌ای | $1k\Omega \pm \%10$ |
| قرمز | قرمز | طلایی | قرمز | $2.2\Omega \pm \%2$ |

معمولاً مقاومت‌های چهار رنگ با استاندارد E12 ساخته می‌شوند و دو رنگ اول آنها طوری است که حتماً یکی از اعداد زیر را نشان می‌دهد.

E12: 10 12 15 18 22 27 33 39 47 56 68 82

در ادامه جدول مقاومت استانداردهای E192، E96، E48 و E24 نیز ارائه شده است.

مقاومت‌های دارای پنج حلقه رنگی

نحوه محاسبه مقاومت‌های دارای پنج حلقه رنگی مشابه روش محاسبه مقاومت‌های دارای چهار حلقه رنگی است با این تفاوت که در اینجا سه حلقه رنگی اول تعیین کننده سه رقم، حلقه چهارم بیانگر تعداد صفرهای جلوی این ارقام و حلقه آخر تلورانس می‌باشد.

| نحوه تعیین مقاومت برای مقاومت‌های دارای چهار حلقه رنگی | | | | | |
|--|----------|----------|----------|------------|---------------------|
| رنگ | حلقه اول | حلقه دوم | حلقه سوم | حلقه چهارم | حلقه پنجم (تلورانس) |
| سیاه | | 0 | 0 | 10^0 | |
| قهوه‌ای | 1 | 1 | 1 | 10^1 | %1 |
| قرمز | 2 | 2 | 2 | 10^2 | %2 |
| نارنجی | 3 | 3 | 3 | 10^3 | |
| زرد | 4 | 4 | 4 | 10^4 | |
| سبز | 5 | 5 | 5 | 10^5 | |
| آبی | 6 | 6 | 6 | 10^6 | |
| بنفش | 7 | 7 | 7 | | |
| خاکستری | 8 | 8 | 8 | | |
| سفید | 9 | 9 | 9 | | |
| طلایی | | | | 10^{-1} | %5 |
| نقره‌ای | | | | 10^{-2} | %10 |

| مثالهایی برای محاسبه مقاومت‌های دارای پنج حلقه رنگی | | | | | |
|---|------|------|--------|---------|-----------------------|
| سبز | آبی | زرد | نارنجی | قهوه‌ای | $564k\Omega \pm \%1$ |
| خاکستری | قرمز | سبز | طلایی | قرمز | $82.5\Omega \pm \%2$ |
| زرد | بنفش | سیاه | زرد | نقره‌ای | $4.7M\Omega \pm \%10$ |

مقاومت‌های SMD

در مقاومت‌های SMD به جای استفاده از نوارهای رنگی، عدد رنگ‌ها را کنار هم می‌نویسند و محاسبه با همان روش انجام می‌شود. مثلاً به جای چاپ رنگ‌های "قهوه‌ای-سیاه-قهوه‌ای" که نشان‌دهنده مقاومت 100ohm می‌باشد، عدد 101 را می‌نویسند و 4.7kohm را با 472 مشخص می‌کنند.

نکته دیگر در انتخاب مقاومت توان مصرفی آن است؛ از این دیدگاه مقاومت‌ها بر حسب قطر آنها درجه‌بندی شده‌اند. مقاومت‌های با قطر بسیار کوچک ۰/۱۲۵ وات و مقاومت‌های با قطرهای بزرگتر به ترتیب دارای توان مصرفی ۰/۲۵ وات، ۰/۵ وات و ... می‌باشند. نمونه‌هایی از این مقاومتها و توان مصرفی متناظر آنها در شکل ج-۱ ارائه شده است.



شکل-ج-۱ شکل ظاهری چند نوع مقاومت. تقسیم‌بندی مقاومت‌ها براساس توان مصرفی آنها می‌باشد.

RESISTOR STANDARD DECADE VALUES

| E192 | E96 | E192 | E96 | E192 | E96 | E192 | E96 | E192 | E96 |
|-----------------|------|-----------------|------|-----------------|------|-----------------|------|-----------------|-------------|
| .1% .25% .5% | 1% | .1% .25% .5% | 1% | .1% .25% .5% | 1% | .1% .25% .5% | 1% | .1% .25% .5% | 1% |
| 10.0 | 10.0 | 16.9 | 16.9 | 28.7 | 28.7 | 48.1 | | 81.6 | |
| 10.1 | | 17.2 | | 29.1 | | 48.7 | 48.7 | 82.5 | 82.5 |
| 10.2 | 10.2 | 17.4 | 17.4 | 29.4 | 29.4 | 49.3 | | 83.5 | |
| 10.4 | | 17.6 | | 29.8 | | 49.9 | 49.9 | 84.5 | 84.5 |
| 10.5 | 10.5 | 17.8 | 17.8 | 30.1 | 30.1 | 50.5 | | 85.6 | |
| 10.6 | | 18.0 | | 30.5 | | 51.1 | 51.1 | 86.6 | 86.6 |
| 10.7 | 10.7 | 18.2 | 18.2 | 30.9 | 30.9 | 51.7 | | 87.6 | |
| 10.9 | | 18.4 | | 31.2 | | 52.3 | 52.3 | 88.7 | 88.7 |
| 11.0 | 11.0 | 18.7 | 18.7 | 31.6 | 31.6 | 53.0 | | 89.8 | |
| 11.1 | | 18.9 | | 32.0 | | 53.6 | 53.6 | 90.9 | 90.9 |
| 11.3 | 11.3 | 19.1 | 19.1 | 32.4 | 32.4 | 54.2 | | 92.0 | |
| 11.4 | | 19.3 | | 32.8 | | 54.9 | 54.9 | 93.1 | 93.1 |
| 11.5 | 11.5 | 19.6 | 19.6 | 33.2 | 33.2 | 55.6 | | 94.2 | |
| 11.7 | | 19.8 | | 33.6 | | 56.2 | 56.2 | 95.3 | 95.3 |
| 11.8 | 11.8 | 20.0 | 20.0 | 34.0 | 34.0 | 56.9 | | 96.5 | |
| 12.0 | | 20.3 | | 34.4 | | 57.6 | 57.6 | 97.6 | 97.6 |
| 12.1 | 12.1 | 20.5 | 20.5 | 34.8 | 34.8 | 58.3 | | 98.8 | |
| 12.3 | | 20.8 | | 35.2 | | 59.0 | 59.0 | | |
| 12.4 | 12.4 | 21.0 | 21.0 | 35.7 | 35.7 | 59.7 | | E24 | E12 |
| 12.6 | | 21.3 | | 36.1 | | 60.4 | 60.4 | 2%, 5% | 10.0 |
| 12.7 | 12.7 | 21.5 | 21.5 | 36.5 | 36.5 | 61.2 | | 10.0 | 10.0 |
| 12.9 | | 21.8 | | 37.0 | | 61.9 | 61.9 | 11.0 | |
| 13.0 | 13.0 | 22.1 | 22.1 | 37.4 | 37.4 | 62.6 | | 12.0 | 12.0 |
| 13.2 | | 22.3 | | 37.9 | | 63.4 | 63.4 | 13.0 | |
| 13.3 | 13.3 | 22.6 | 22.6 | 38.3 | 38.3 | 64.2 | | 15.0 | 15.0 |
| 13.5 | | 22.9 | | 38.8 | | 64.9 | 64.9 | 16.0 | |
| 13.7 | 13.7 | 23.2 | 23.2 | 39.2 | 39.2 | 65.7 | | 18.0 | 18.0 |
| 13.8 | | 23.4 | | 39.7 | | 66.5 | 66.5 | 20.0 | |
| 14.0 | 14.0 | 23.7 | 23.7 | 40.2 | 40.2 | 67.3 | | 22.0 | 22.0 |
| 14.2 | | 24.0 | | 40.7 | | 68.1 | 68.1 | 24.0 | |
| 14.3 | 14.3 | 24.3 | 24.3 | 41.2 | 41.2 | 69.0 | | 27.0 | 27.0 |
| 14.5 | | 24.5 | | 41.7 | | 69.8 | 69.8 | 30.0 | |
| 14.7 | 14.7 | 24.9 | 24.9 | 42.2 | 42.2 | 70.6 | | 33.0 | 33.0 |
| 14.9 | | 25.2 | | 42.7 | | 71.5 | 71.5 | 36.0 | |
| 15.0 | 15.0 | 25.5 | 25.5 | 43.2 | 43.2 | 72.3 | | 39.0 | 39.0 |
| 15.2 | | 25.8 | | 43.7 | | 73.2 | 73.2 | 43.0 | |
| 15.4 | 15.4 | 26.1 | 26.1 | 44.2 | 44.2 | 74.1 | | 47.0 | 47.0 |
| 15.6 | | 26.4 | | 44.8 | | 75.0 | 75.0 | 51.0 | |
| 15.8 | 15.8 | 26.7 | 26.7 | 45.3 | 45.3 | 75.9 | | 56.0 | 56.0 |
| 16.0 | | 27.1 | | 45.9 | | 76.8 | 76.8 | 62.0 | |
| 16.2 | 16.2 | 27.4 | 27.4 | 46.4 | 46.4 | 77.7 | | 68.0 | 68.0 |
| 16.4 | | 27.7 | | 47.0 | | 78.7 | 78.7 | 75.0 | |
| 16.5 | 16.5 | 28.0 | 28.0 | 47.5 | 47.5 | 79.6 | | 82.0 | 82.0 |
| 16.7 | | 28.4 | | | | 80.6 | 80.6 | 91.0 | |

Standard resistance values are obtained from the decade table by multiplying by powers of 10. As an example, 13.3 can be 13.3 Ohms, 133 Ohms, 1.33K, 133K, or 1.3 meg Ohms.

پیوست پ : انواع خازن‌ها و نحوه تعیین مقدار آنها

انواع خازن‌ها

خازن‌ها از دو صفحه رسانا تشکیل می‌شوند که توسط یک ماده دی‌الکتریک نظیر کاغذ، تلق، سرامیک، میکا، شیشه، تفلون، کاغذ آغشته به پارافین و یا حتی هوا از هم جدا شده‌اند. خازن‌ها را بر حسب نوع عایق به کار رفته بین صفحاتشان تقسیم‌بندی می‌کنند که در ادامه به بررسی آنها می‌پردازیم.

خازن‌های سرامیکی:

خازن‌های سرامیکی با ساندویچ کردن یک دیسک سرامیکی بین دو صفحه و پوشش‌دهی آن ایجاد می‌شوند. برخلاف آنچه بسیاری فکر می‌کنند، نامگذاری این نوع از خازن‌ها بر اساس جنس پوشش آنها نمی‌باشد. محدوده ظرفیت آنها از یک پیکوفاراد تا بیش از $2/2$ میکروفاراد و محدوده ولتاژشان تا ۶ کیلوولت می‌باشد.

ج-۱-۲ : خازن‌های الکتrolیت:

خازن‌های الکتrolیت دارای پلاریته می‌باشند بنابراین در هنگام قراردادن آنها در مدار باید سرمنفی به زمین یا ولتاژ پایین‌تر وصل شود. چنانچه خازن الکتrolیت به صورت معکوس در مدار قرار گیرد لایه اکسید آلومینیوم از بین رفته و خازن تبدیل به یک هادی می‌شود و پس از آن محلول الکتrolیت تجزیه شده و در اثر گاز ایجاد شده، خازن منفجر می‌شود. خازن‌های الکتrolیت در دو نوع موجود می‌باشند، آلومینیوم و تانتالیوم. (نوع تانتالیوم در قسمت بعد مورد بررسی قرار می‌گیرند.) در نوع آلومینیوم، دولایه از فویل آلومینیوم توسط یک تکه کاغذ یا گارس اشباع شده از الکتrolیت از هم جدا می‌شوند. حین تولید این خازن‌ها، در سطح داخلی صفحه مثبت اکسید آلومینیوم، که یک دی‌الکتریک است، تشکیل می‌شود. این نوع از خازن‌ها در مقایسه با نوع قبل دارای ظرفیتهای بالاتری می‌باشند (تا 2000000 میکروفاراد) ولی در ولتاژ بسیار پایین‌تری می‌شکنند (کمتر از ۳۵۰ ولت) و جریان نشتی بالاتری دارند.

خازن‌های تانتالیوم:

خازن‌های تانتالیوم خازن‌های الکتrolیتی هستند که صفحات آنها از فویل تانتالیوم ساخته شده است. اکسید تانتالیوم (رسوب ایجاد شده در سطح داخلی صفحه مثبت حین تولید) دارای ثابت دی‌الکتریک بالاتری نسبت به اکسید آلومینیوم می‌باشد. این نوع خازن‌ها، در مقایسه با خازن‌های الکتrolیت آلومینیوم، دارای محدوده ولتاژ و ظرفیت مشابهی هستند اما قادرند آن ظرفیت را در بسته‌بندی کوچکتری فراهم کنند؛ جریان

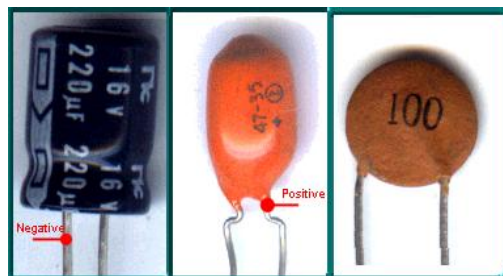
نشتی آنها بسیار کمتر و عمر آنها طولانی است؛ بسیار دقیق هستند و در عوض دارای قیمت بالاتری می‌باشند.

خازن‌های میکا

این نوع از خازن‌ها با روی هم قرار دادن صفحات فویل فلزی با یک لایه میکا تولید می‌شوند و سپس با ماده‌ای نظیر باکلیت پوشیده می‌شوند. محدوده ظرفیت آنها از ۱ پیکوفاراد تا ۰/۱ میکروفاراد و محدوده ولتاژشان ۱۰۰ تا ۲۵۰۰ ولت می‌باشد.

خازن‌های متغیر و خازن‌های تریمر:

در این نوع خازن‌ها ظرفیت قابل تنظیم می‌باشد.



شکل-ج-۲ شکل ظاهری چند نوع خازن. به ترتیب از چپ به راست، خازن الکترولیتی آلومینیوم، خازن الکترولیتی تانتالیوم و خازن سرامیکی.

نحوه تعیین ظرفیت خازن‌ها

در بعضی موارد مقدار ظرفیت و واحد آن عیناً بر روی بدنه خازن قید می‌شود که در این صورت ابهامی برای خواندن مقدار ظرفیت وجود ندارد. (خازن الکترولیتی آلومینیوم در شکل-ج-۲ را ببینید.) در اغلب موارد واحد ظرفیت بر روی بدنه خازن قید نمی‌شود. در این صورت چنانچه عدد مزبور از یک کوچکتر باشد ظرفیت بر حسب میکروفاراد و چنانچه عدد بزرگتر از یک باشد ظرفیت بر حسب پیکوفاراد است. در حالتی که عدد ظرفیت بزرگتر از واحد است بخصوص در مورد خازن‌های سرامیکی عدسی بالای صد پیکوفاراد، معمولاً عدد ظرفیت به صورت یک عدد سه رقمی مشخص می‌شود که رقم اول و دوم، دو رقم اول ظرفیت و رقم سوم تعداد صفرهای جلوی آنها می‌باشد؛ مثلاً در این روش عدد ۲۲۳ به معنی ۲۲۰۰۰ پیکوفاراد یا ۲۲ نانوفاراد است.

قواعد فوق در اکثر موارد رعایت می‌شود، اما باید توجه نمود که ممکن است این قواعد از طرف بعضی سازندگان رعایت نشود؛ مثلاً ممکن است بر روی بدنه یک خازن عدد ۴۷ بدون ذکر واحد قید شود و مقصود سازنده ۴۷ نانوفاراد باشد نه ۴۷ پیکوفاراد.

مقدار ظرفیت خازن گاهی توسط نوارها و یا نقطه‌های رنگی مشخص می‌شود. معانی رنگ‌ها برای ارقام و ضرایب همانند معانی رنگها در مورد مقاومت است اما از آنجا که در مورد خازن‌ها رنگهایی که تلورانس، ولتاژ قابل تحمل و ضرایب حرارتی خازن را مشخص می‌کنند بسته به جنس خازن ممکن است معانی مختلفی داشته باشند برای هر نوع خازن جدول بخصوصی وجود دارد که لازم است به آن مراجعه شود. نمونه‌ای از این جداول که مربوط به خازن‌های سرامیکی است در ادامه ارائه می‌شود.

| نحوه تعیین ظرفیت و ولتاژ قابل تحمل برای خازن‌های سرامیکی کد شده توسط نوارهای رنگی | | | | | | |
|---|---------|---------|-----------|---------|-----------------|-------------|
| رنگ | رقم اول | رقم دوم | رقم ضریب | تلورانس | ولتاژ قابل تحمل | ضریب حرارتی |
| سیاه | | 0 | 10^0 | %20 | | 0 PPM |
| قهوه‌ای | 1 | 1 | 10^1 | %1 | 100 | -33 |
| قرمز | 2 | 2 | 10^2 | %2 | 250 | -75 |
| نارنجی | 3 | 3 | 10^3 | %2.5 | | -150 |
| زرد | 4 | 4 | 10^4 | | 400 | -220 |
| سبز | 5 | 5 | 10^5 | %5 | | -330 |
| آبی | 6 | 6 | | | 630 | -470 |
| بنفش | 7 | 7 | | | | -750 |
| خاکستری | 8 | 8 | 10^{-2} | | | 30 |
| سفید | 9 | 9 | 10^{-1} | %10 | | 100 |

| مثالهایی برای محاسبه ظرفیت خازن توسط کدهای نوشته شده بر روی آن | | | | | | | | |
|--|-----|------|-------|------|------|-------|-------|-------|
| عدد روی خازن | 1n | 10u | 100 | 47 | 0.01 | 0.47 | 221 | 104 |
| ظرفیت خازن | 1nF | 10uF | 100pF | 47pF | 10nF | 470nF | 220pF | 100nF |