دانشگاه اصفهان

دانشکده مهندسی کامپیوتر

دستورکار آزمایشگاه مدارهای الکتریکی والکترونیکی

نسخه ۱

دکتر محمدرضا رشادی نژاد

مهندس حمیدرضا خیرمند

مهندس سیدعرفان فاطمیه

تابستان ۹۶

تاریخچه بازبینی‌ها

شماره نسخه	تاریخ	شرح تغییرات
۱.۰	۱۳۹۶/۶/۲۴	

پیشگفتار

در این بخش به معرفی آزمایشگاه پرداخته می‌شود و می‌تواند شامل بخشه‌ای زیر باشد:

ویژگی خاص این نسخه دستور کار نسبت به دستور کارهای قبلی،

روال کلی برگزاری آزمایشگاه در هر جلسه

برای هر یک از آزمایش‌ها مطالبی که اطلاع قبلی از آن‌ها برای انجام آن آزمایش ضروری بوده است، تحت عنوان "پیش‌آگاهی" تدوین و قبل از دستور کار آن آزمایش ارائه‌شده است. هر آزمایش شامل گام‌هایی است که با نظر مربی درس آزمایشگاه می‌تواند به تناسب کم یا زیاد شده و یا تغییر داده شود.

مقررات این آزمایشگاه نیز مطابق مقررات عمومی آزمایشگاههای دانشگاه است. جلسات آزمایشگاه بلافاصله بعد از حذف و اضافه شروع شده و به صورت هفتگی تا شروع امتحانات پایان ترم ادامه می یابد. دانشجویی که یک جلسه غیبت داشته باشد، مردود است.

روند کلی آزمایشگاه به این صورت است که هر یک از دانشجویان باید قبل از هر آزمایش، پیش‌آگاهی آن را از قبل مطالعه کرده، در ابتدای جلسه، در یک امتحان کوچک ۱۵-۱۰ دقیقه‌ای در مورد آن پیش‌آگاهی تسلط خود را نشان دهد (این کار به خاطر هدایت دانشجویان به مطالعهٔ قبلی مطالب و تقلیل احتمال تقلب در پیش گزارش‌ها در نظر گرفته شده است). پس از امتحان کوچک، دانشجویان هر آزمایش (که علی القاعده ۲ یا ۳ نفر هستند)، گامهای مشخص شده در دستور کار را دنبال کرده، نتایج را در کاربرگهای آن آزمایش (که توسط مربی در محل آزمایشگاه در اختیار دانشجو گذاشته می شود) ثبت می‌کنند. به این ترتیب کاربرگها به صورت یک سری برای هر گروه کامل می‌گردد.

در ارزیابی نهایی هر دانشجو، علاوه بر نمرهٔ امتحانات کوچک هر جلسه و نمرهٔ گزارش جلسات (که برای تمام اعضای هر گروه یکسان است)، نظر مربی در مورد آن دانشجو و نتیجهٔ امتحان پایان ترم دانشجو نیز دخالت دارد.

در انتها از تمام همکاران و دانشجویان درخواست می‌کنم با طرح پیشنهادات مشخص و مدون خود برای رفع معایب، ارتقای کیفی و پویایی به عنوان یک ویژگی ضروریِ آزمایشگاه.....، ادامه دهندهٔ راهی باشند که اولین گام آن برداشته شده است.

فهرست مطالب

دستورکار آزمایشگاه مدارهای الکتریکی والکترونیکی

پیشگفتار

آزمایش اول: آشنایی با قانون اهم، ترکیب مقاومت‌ها و قوانین کیرشهف

۱-۱- پیش‌آگاهی

۱-۱-۱- آشنایی با قانون اهم

۱-۱-۲- مقاومت‌ها و ترکیب آن‌ها

۱-۱-۳- مقاومت‌های سری و موازی

۱-۱-۴- آشنایی با قوانین کیرشهف

۱-۲- دستور کار

آزمایش دوم: آشنایی با روش‌های تحلیل مدارهای مقاومتی

۲-۱- پیش‌آگاهی

۲-۱-۱- روش تحلیل با استفاده از قاعده‌ی تقسیم جریان و تقسیم ولتاژ

۲-۱-۲- روش تحلیل گره

۲-۱-۳- روش تحلیل مش

۲-۱-۴- قاعده‌ی تبدیل منابع

۲-۱-۵- قضیه‌ی جمع آثار

۲-۲- دستور کار

آزمایش سوم: آشنایی با مدارهای معادل تونن و نورتون و محاسبه‌ی بیشترین توان مصرفی

۳-۱- پیش‌آگاهی

۳-۱-۱- مدار معادل تونن

۳-۱-۲- مدار معادل نورتون

۳-۱-۳- نحوه‌ی محاسبه‌ی ولتاژ تونن

۳-۱-۴- نحوه‌ی محاسبه‌ی مقاومت تونن

۳-۱-۵- نحوه‌ی محاسبه‌ی جریان نورتون

۳-۱-۶- محاسبه‌ی بیشترین توان مصرفی

۳-۲- دستور کار

آزمایش چهارم: آشنایی با تقویت‌کننده‌های عملیاتی

۴-۱- پیش‌آگاهی

۴-۱-۱- نماد و توضیحات اساسی

۴-۱-۲- مدل ایده آل تقویت‌کننده‌های عملیاتی

۴-۱-۳- تقویت‌کننده‌ی غیر معکوس کننده

۴-۱-۴- تقویت‌کننده‌ی معکوس‌کننده

۴-۱-۵- مدارهای جمع کننده با استفاده از تقویت‌کننده‌های عملیاتی

۴-۱-۶- تراشه‌ی 741

۴-۲- دستور کار

آزمایش پنجم: آشنایی با پاسخ مدارهای مرتبه اول RC و RL

۵-۱- پیش‌آگاهی

۵-۱-۱- بررسی مدار RC در حوزه‌ی زمان

۵-۱-۲- بررسی مدار RL در حوزه‌ی زمان

۵-۱-۳- پاسخ طبیعی مدار RL

۵-۱-۴- پاسخ طبیعی مدار RC

۵-۱-۵- پاسخ پله‌ی مدار RL

۵-۱-۶- پاسخ پله‌ی مدار RC

۵-۱-۷- پاسخ مدارهای RC و RL در حوزه‌ی فرکانس

۵-۱-۸- فیلتر پایین گذر

۵-۱-۹- فیلتر بالا گذر

۵-۱-۱۰- تعیین اختلاف فاز با استفاده از اسیلوسکوپ

۵-۱-۱۱- تعیین اختلاف فاز به کمک منحنی‌های لیساژوس

۵-۲- دستور کار

آزمایش ششم: مدارهای RLC

۶-۱- پیش‌آگاهی

۶-۱-۱- معادلات حاکم بر مدارهایRLC

۶-۱-۲- حالت میرایی شدید (over damped)

۶-۱-۳- حالت میرایی بحرانی (critical damped)

۶-۱-۴- حالت میرایی کم (under damped)

۶-۱-۵- امپدانس در مدارهای RLC سری

۶-۱-۶- امپدانس در مدارهای RLC موازی

۶-۱-۷- امپدانس در مدارهای RLC سری- موازی

۶-۱-۸- عرض باند در مدارهای RLC

۶-۱-۹- فیلتر باندگذر و فیلتر باندنگذر

۶-۲- دستورکار

آزمایش هفتم: دیودهای نیمه‌هادی

۷-۱- پیش‌آگاهی

۷-۱-۱- نیمه‌هادی‌ها

۷-۱-۲- بایاس پیشرو

۷-۱-۳- بایاس معکوس

۷-۱-۴- شکست

۷-۱-۵- مشخصه‌ی ولت- آمپر دیود

۷-۱-۶- مقاومت دیود

۷-۲- دستور کار

آزمایش هشتم: کاربرد دیودها و دیود زنر

۸-۱- پیش‌آگاهی

۸-۱-۱- یک‌سوسازها

۸-۱-۲- صافی‌ها

۳-۱-۸- دیود زنر

۴-۱-۸- رگولاتور ولتاژ

۸-۱-۵- برشگرها

۶-۱-۸- ضریب تموج

۲-۸- دستور کار

آزمایش نهم: آشنایی با ترانزیستورهای BJT

۱-۹- پیش‌آگاهی

۱-۱-۹- ساختار ترانزیستورهای BJT

۲-۱-۹- تقویت‌کننده‌ی امیتر مشترک

۳-۱-۹- تقویت‌کننده‌ی کلکتور مشترک

۴-۱-۹- تقویت‌کننده‌ی بیس مشترک

۲-۹- دستور کار

آزمایش دهم: آشنایی با MOSFET

۱-۱۰- پیش‌آگاهی

۲-۱۰- دستور کار

ضمیمه‌ی اول: دستورالعمل کار با عموم اسیلوسکوپ‌ها

ضمیمه‌ی دوم: آموزش کار با Proteus

ضمیمه‌ی سوم: وسایل موردنیاز هر آزمایش

منابع

آزمایش اول: آشنایی با قانون اهم، ترکیب مقاومت‌ها و قوانین کیرشهف

۱-۱- پیش‌آگاهی

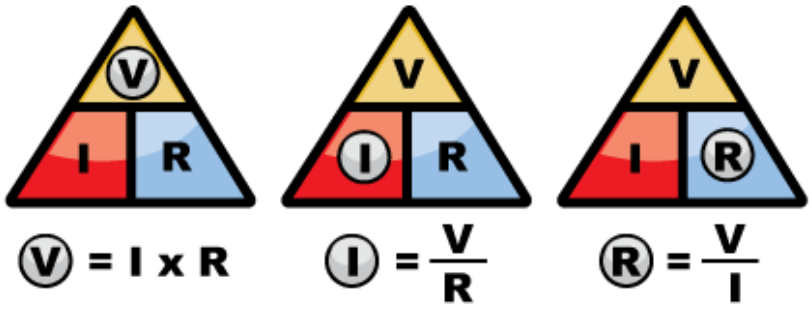
۱-۱-۱- آشنایی با قانون اهم

اگر یک منبع ولتاژ DC به یک مقاومت اعمال شود میزان جریانی که از مقاومت عبور می‌کند تابع قانون اهم است.

$$V = R \times I$$

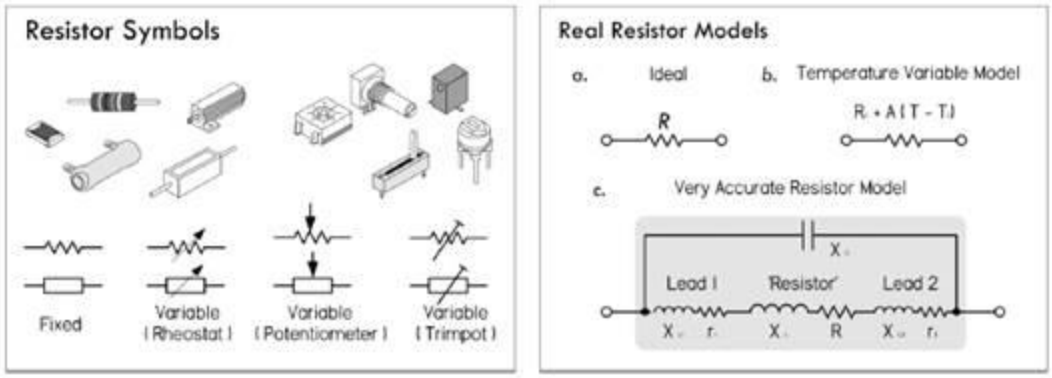
برای یافتن توان تلف‌شده توسط مقاومت از قانون توان اهم استفاده می‌شود:

$$P = IV = {V^2}/{R} = I^2 R$$



۱-۱-۲- مقاومت‌ها و ترکیب آن‌ها

مقاومت عنصری است که در مدارها استفاده می‌شود تا شدت جریان را محدود کند یا آستانه‌ی ولتاژ را در مدارها تنظیم کند.

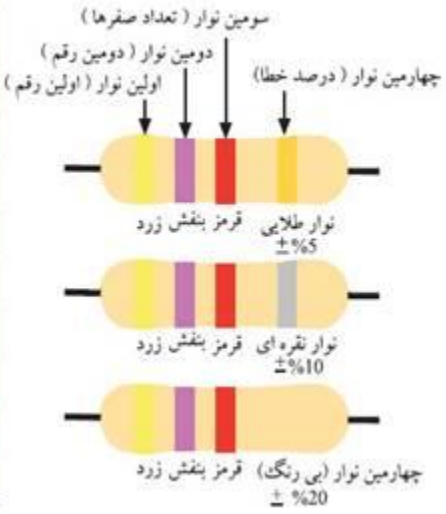


شکل ۱-۱: انواع مقاومت‌ها

شکل ۱-۱ نماد شماتیک مقاومت را نشان می‌دهد. این مقاومت‌ها به‌صورت ثابت و متغیر طراحی‌شده‌اند.

جدول زیر بیان‌گر رنگ‌های مقاومت‌های کربنی می‌باشد:

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



جدول۱-۱: رنگ‌بندی مقاومت‌ها

تمرین۱-۱: مقاومت به رنگ‌های -به ترتیب
از چپ- قهوه‌ای، سیاه، زرد، طلایی برابر چند اهم است؟

۱-۱-۳- مقاومت‌های سری و موازی

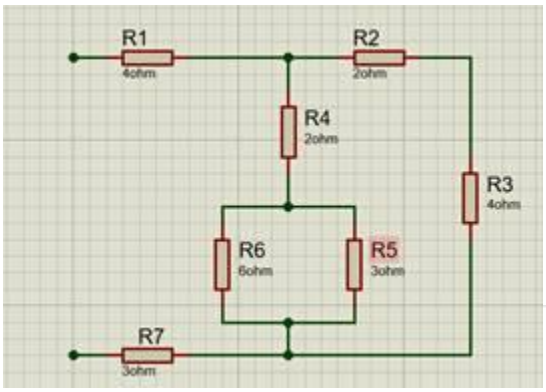
مقاومت‌ها را می‌توان به‌صورت سری و موازی به هم متصل کرد. اتصال سری مقاومت‌ها از رابطه‌ی زیر پیروی می‌کند:

$$R_{total} = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots$$

اتصال موازی مقاومت‌ها از رابطه‌ی زیر پیروی می‌کند:

$$\frac{1}{R_{total}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \cdots$$

تمرین ۱-۲: مقاومت معادل مدار شکل ۱-۲ چند اهم است؟



شکل ۱-۲

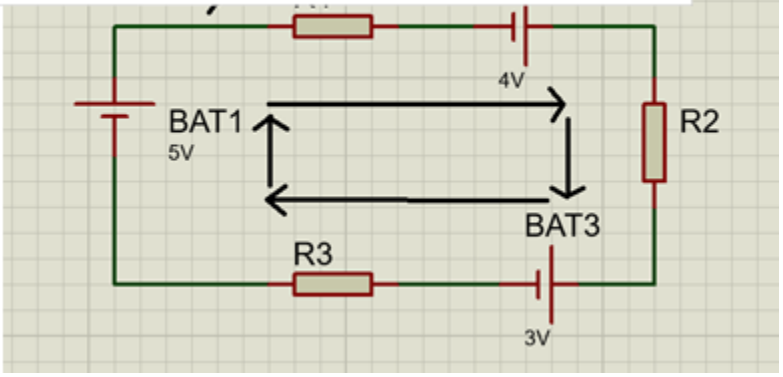
۴-۱-۱- آشنایی با قوانین کیرشهف

قانون ولتاژ کیرشهف (KVL):

جمع جبری ولتاژهای درون یک حلقه از مدار برابر صفر است.

$$\sum \Delta V = V_1 + V_2 + V_3 + \cdots$$

شکل۱-۳



KVL را برای هر مدار در جهت‌های مختلف و با شروع از نقاط مختلف می‌توان نوشت. اگر از طرف مثبت وارد آن عنصر شویم ولتاژ آن با علامت مثبت، و اگر از سمت منفی وارد عنصر شویم آن را با علامت منفی لحاظ می‌کنیم.

$$5V - IR_1 + 4V - IR_2 - 3V - IR_3 = 0$$

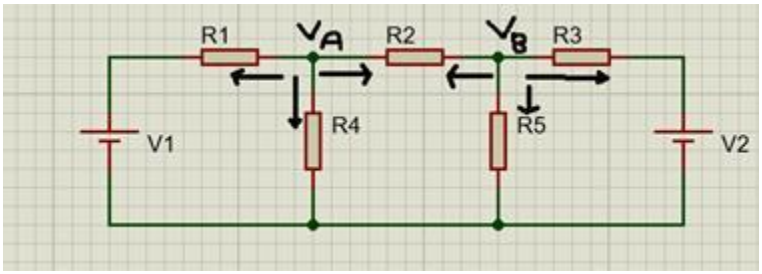
تذکر: قانون KVL برای تمامی مدارها قابل‌تعمیم است هم خطی و هم غیرخطی.

قانون جریان کیرشهف (KCL):

مجموع جریان‌هایی که وارد یک گره می‌شود با مجموع جریان‌هایی که از گره خارج می‌شود برابر است.

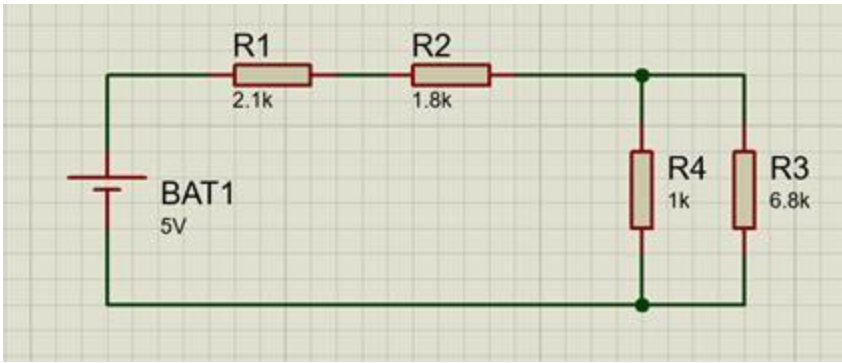
$$\sum I_{in} = \sum I_{out}$$

قانون KCL بیان می‌کند که جریان در یک مدار پایدار می‌ماند.



$$\frac{V_A - V_1}{R_1} + \frac{V_A}{R_2} + \frac{V_A - V_B}{R_3} = 0$$

۲-۱- دستور کار



۱- در شکل ۱-۵ قانون اهم را برای هر ۴ مقاومت تحقیق نمایید.

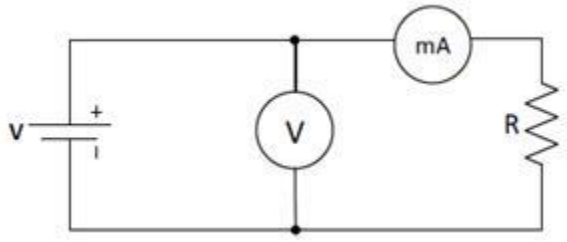
۲- مقدار نامی و درصد خطای ۳ عدد مقاومت را که در اختیارتان قرار می‌گیرد را به کمک نوار رنگ‌های آن‌ها به‌دست آورید و سپس به‌وسیله‌ی مولتی‌متر اعداد به‌دست آمده را با مقدار نامی مقایسه کنید.

	رنگ اول	رنگ دوم	رنگ سوم	رنگ چهارم	مقدار نامی	مقدار اندازه‌گیری شده با مولتی‌متر	درصدخطا
مقاومت شماره‌ی۱							
مقاومت شماره‌ی۲							
مقاومت شماره‌ی۳							

۳- دو پتانسیومتر به‌دلخواه انتخاب کرده و جدول زیر را تکمیل کنید.

پتانسیومتر	عدد نوشته‌شده بر روی پتانسیومتر	مقدار اندازه‌گیری شده توسط مولتی متر(دو سر ثابت)	اندازه‌گیری مقاومت (یک پایه‌ی متغیر و پایه‌ی ثابت)	اندازه‌گیری مقاومت (پایه‌ی متغیر دیگر و پایه‌ی ثابت)
Pt1				
Pt2				

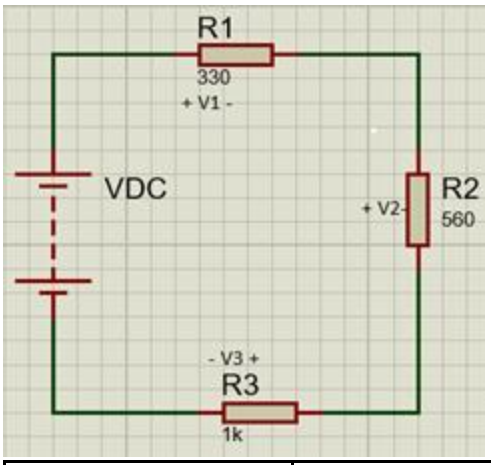
۴- جدول زیر را برای R=330 و R=1800 کامل کنید. با توجه به جدول برای هر مقاومت نمودار V برحسب I را رسم کنید.



V	0	1	2	3	4	5	6	7	8
I(R=330)									
I(R=1800)									

- از روی نمودار رسم شده چگونه می‌توان مقدار مقاومت را به‌دست آورد.

- با توجه به قانون اهم، مقاومت اتصال کوتاه و اتصال باز چقدر است؟

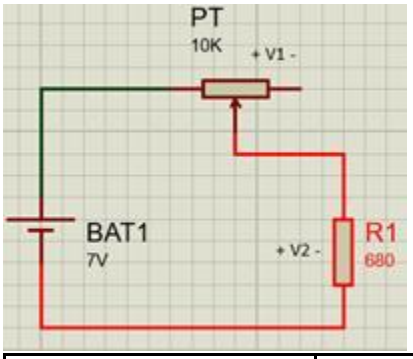


۵- جدول زیر را تکمیل کنید. سپس قانون KVL را تحقیق کنید.

Vdc	V1	V2	V3
4 V			
10 V			

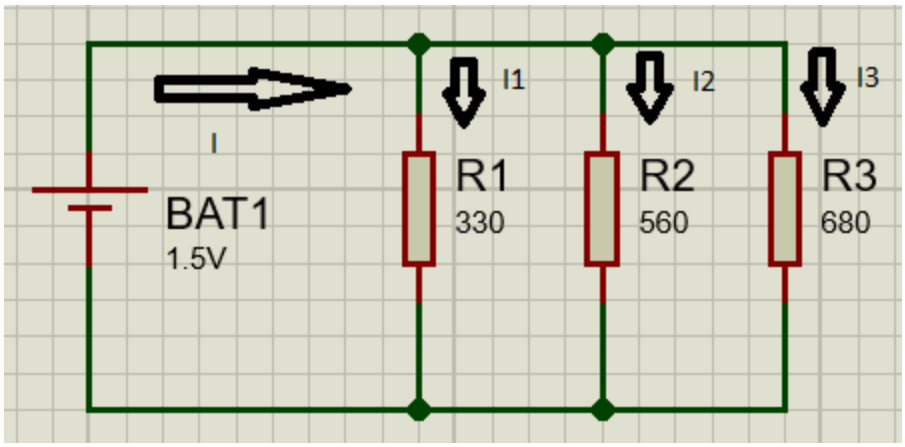
۶- مقدار V1 و V2 را به‌دست آورید. سپس این اعداد را استدلال کنید.

پتانسیومتر را روی کمترین، بیشترین و حالت متوسط قرار دهید و مقادیر جدول را تکمیل کنید.



V	Pt max	Pt min	Pt avg
V1			
V2			

۷- مدار زیررا روی بردبورد بسته، جدول را تکمیل کرده و درستی قانون KCl را بررسی کنید.



Vdc	I1	I2	I3	I	$\frac{V_{dc}}{R_1}$	$\frac{V_{dc}}{R_2}$	$\frac{V_{dc}}{R_3}$	R_{eq}	$\frac{V_{dc}}{R_{eq}}$
5V									
10V									

آزمایش دوم: آشنایی با روش‌های تحلیل مدارهای مقاومتی

۲-۱- پیش‌آگاهی

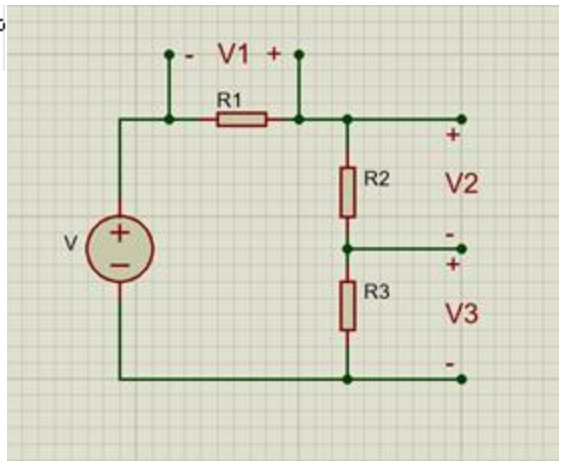
منظور از تحلیل یک مدار به دست آوردن ولتاژ و جریان تمام شاخه‌ها و یا دسته‌ی معینی از شاخه‌ها است. اساس کلیه روش‌های تحلیل مدار اعمال مناسب قوانین KCL و KVL می‌باشد.

نقطه شروع هر روش در تحلیل مدار نوشتن معادلات KCL و KVL و همچنین تمام معادلات شاخه‌ها است. اختلاف اصلی میان روش‌های مختلف تحلیل مدار، تعداد و نوع متغیرهایی است که نهایتاً به‌عنوان متغیرها در نظر گرفته می‌شوند. روش‌های تحلیل مدار را می‌توان به‌صورت زیر طبقه‌بندی کرد:

۱- روش تحلیل با استفاده از قاعده‌ی تقسیم ولتاژ و تقسیم جریان ۲- روش تحلیل گره ۳- روش تحلیل مش ۴- تبدیل منابع ۵- جمع آثار.

۱-۱-۲- روش تحلیل با استفاده از قاعده‌ی تقسیم جریان و تقسیم ولتاژ

شکل ۱-۲: مدار تقسیم کنندهی ولتاژ



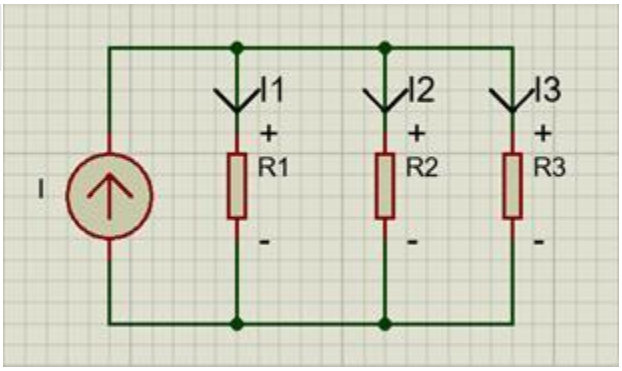
تقسیم‌کننده‌ی ولتاژ یک مدار است که ولتاژ خروجی آن به‌صورت کسری از ولتاژ ورودی است. تقسیم‌کننده‌ی ولتاژ به‌صورت زیر است:

$$V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} V$$

$$V_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3} V$$

$$V_3 = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} V$$

شکل ۲-۲: مدار تقسیم‌کنندهی جریان



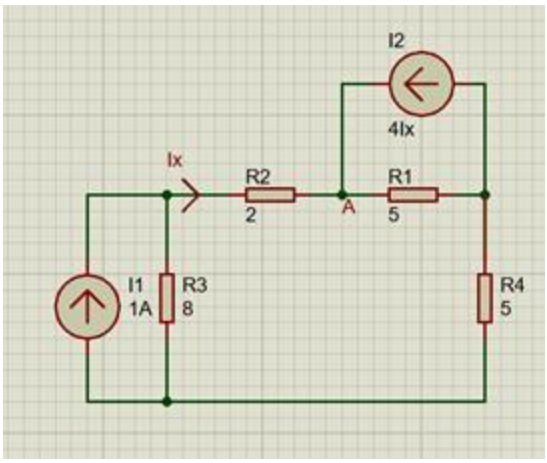
مدار و معادلات تقسیم‌کننده‌ی جریان نیز به‌صورت زیر است:

$$I_1 = \frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$

$$I_2 = \frac{R_1 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$$

$$I_3 = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + R_2 + R_3}$$

مثال: مقدار I_0 کدام است؟



پاسخ:

مقاومت‌های ۲ و ۸ اهمی باهم موازی هستند پس طبق فرمول تقسیم جریان I_xبه‌صورت زیر می‌باشد:

$$I_x = \frac{۸}{۸+۲} \times ۱۰ = ۸(A)$$

دو مقاومت ۵ اهمی نیز با همدیگر موازی هستند پس طبق فرمول تقسیم جریان، جریان هرکدام برابر $۲I_x$می‌گردد

پس با نوشتن KCL به معادله‌ی زیر می‌رسیم:

$$\text{KCL(A)}: I_x + ۴I_x = ۲I_x + I_. \Rightarrow I_. = ۲۴A$$

۲-۱-۲- روش تحلیل گره

همان‌طور که از نام روش تحلیل گره بر می‌آید، در این روش متغیرهای موردنظر ولتاژ گره‌ها هستند. ولتاژ گره‌ها نسبت به هم سنجیده می‌شوند. بنابراین ابتدا گره‌ای را به‌عنوان گره‌ی مبنا انتخاب می‌کنیم، سپس با به‌کارگیری روش تحلیل گره، ولتاژ گره‌های دیگر را نسبت به این گره‌ی مبنا به دست می‌آوریم. برای تحلیل گره می‌توان مراحل زیر را دنبال کرد:

ابتدا گره‌ای را به‌عنوان گره‌ی مبنا انتخاب کرده و ولتاژ آن را صفر در نظر بگیرید.

همه‌ی گره‌های مدار را شماره‌گذاری کنید و گره‌ی مبنا را با شماره‌ی صفر نشان دهید.

تذکر: برای گره‌ی بالای منبع چون ولتاژش نسبت به زمین معلوم است شماره‌گذاری صورت نمی‌گیرد مگر اینکه جریان منبع ولتاژ موردسوال باشد.

ولتاژ گره‌ها را نسبت به گره‌ی مبنا به‌عنوان متغیرهای مدار انتخاب کنید.

قانون KCL را در تمام گره‌های مدار به جز گره‌ی مبنا بنویسید و متغیرهای دیگر را برحسب ولتاژ گره‌های انتخاب‌شده بیان کنید.

منابع وابسته را از هر نوع که باشند مانند منابع مستقل در نظر بگیرید.

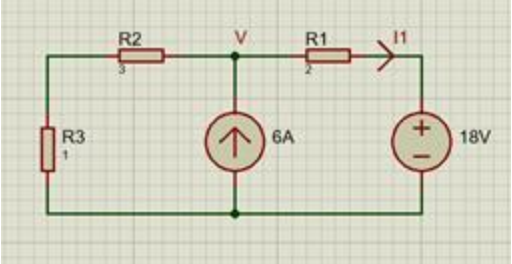
در حالت کلی، اعمال مراحل فوق در هر مدار مقاومتی به n معادله‌ی n مجهولی برحسب متغیرهای ولتاژ گره‌ها منجر می‌شود و با حل این معادلات ولتاژ گره‌ها به دست می‌آید.

ولتاژ هر شاخه برابر ولتاژ گره‌های دو سر آن شاخه است و جریان هر شاخه با استفاده از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$I_1 = \frac{V_A - V_B}{R} \qquad ، \qquad I_2 = \frac{V_B - V_A}{R}$$

در رابطه‌ی فوق R امپدانس شاخه‌ی بین A و B است.

در اعمال روش تحلیل گره اگر منبع ولتاژی به دو گره‌ی زمین نشده وصل شده باشد راحت‌تر است که KCL را در گره‌ی مرکب متشکل از این دو گره بنویسیم تا نیازی به متغیر اضافی دیگری به‌عنوان جریان منبع ولتاژ نباشد. (ابرگره)



مثال: در مدار زیر I_1چه مقداری دارد؟

پاسخ: این مدار دارای ۳ گره است. (که یکی از آن‌ها زمین می‌باشد) که نتیجتاً دو ولتاژ باید مشخص شود که ولتاژ گره‌ی سمت راست معلوم است و لذا با تعیین ولتاژ V جریان کل شاخه‌ها تعیین می‌شود. با نوشتن KCL در گره‌ی وسطی داریم: (شاخه‌ای که جریان آن مشخص نشده است خارج شونده فرض می‌شود.)

$$۶ = \frac{V}{۱+۳} + \frac{V-۱۸}{۲} \Longrightarrow ۲۴ = V + (V-۱۸) \Longrightarrow ۴V = ۶۰ \Longrightarrow V = ۲۰V$$

از طرفی داریم:

$$I_۱ = \frac{V-۱۸}{۲} \Longrightarrow I_۱ = \frac{۲۰-۱۸}{۲} = ۱۸$$

۳-۱-۲- روش تحلیل مش

در روش تحلیل مش متغیرهای موردنظر جریان حلقه‌ها می‌باشد. اساس روش تحلیل مش، نوشتن معادلات KVL در تمام حلقه‌ها است که از حل این معادلات جریان حلقه‌ها به دست می‌آید با معلوم بودن جریان حلقه‌ها می‌توان جریان شاخه‌ها و درنتیجه ولتاژ شاخه‌ها را به دست آورد. بنابراین برای تحلیل مش مراحل زیر را باید دنبال کرد:

حلقه‌ها راشماره‌گذاری کرده و جریان آن‌ها را در جهت عقربه‌های ساعت به‌عنوان متغیرهای مدار انتخاب کنید.

جریان شاخه‌ای که فقط در یک حلقه قرار دارد برابر جریان آن حلقه و جریان شاخه‌ای که در دو حلقه مشترک است برابر تفاضل جریان‌های آن دو حلقه است.

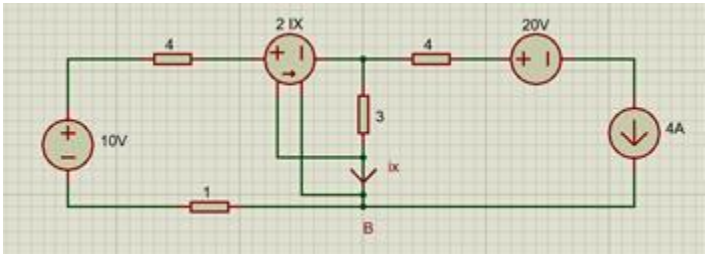
قانون KVL را در کلیه‌ی حلقه‌های مدار بنویسید و متغیرهای دیگر را برحسب جریان حلقه‌های انتخاب‌شده بیان کنید.

منابع وابسته را مانند منابع مستقل در نظر بگیرید.

در حالت کلی، اعمال مراحل فوق در هر مدار مقاومتی به n معادله‌ی n مجهولی برحسب متغیرهای جریان مش‌ها منجر می‌شود که با حل این معادلات، جریان مش‌ها به دست می‌آید.

جریان شاخه‌ها از روی جریان مش‌ها و ولتاژ شاخه‌ها از روی جریان شاخه‌ها به دست می‌آیند.

در روش تحلیل مش اگر دو مش داشته باشیم که در هر کدام یک منبع جریان وجود داشته باشد به‌جای نوشتن KVL در هر دو مش راحت‌تر است که KVL را در حلقه‌ی متشکل از آن دو مش بنویسیم. (ابرمش)



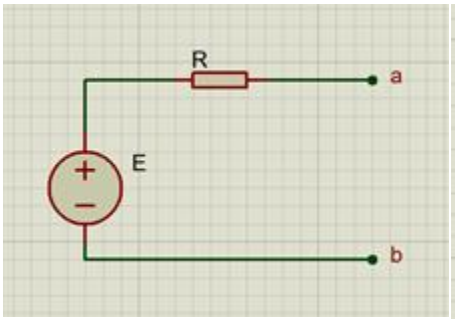
مثال: در مدار زیر i_xرا به دست آورید.

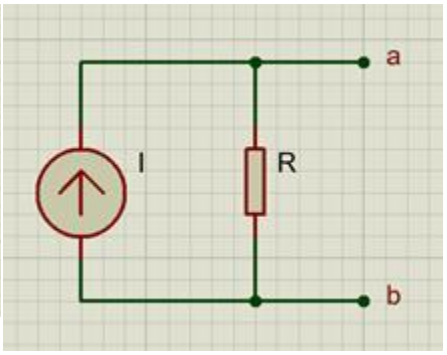
پاسخ: با اعمال KCL در گره‌ی B جریان عبوری از مقاومت ۱ اهمی به‌صورت $i_x + ۴$می‌باشد با اعمال KVL در حلقه‌ی سمت چپ داریم:

$$۱(i_x + ۴) - ۱۰ + ۴(i_x + ۴) - ۲i_x + ۳i_x = ۰ \implies i_x = -\frac{۵}{۴}$$

۴-۱-۲- قاعده‌ی تبدیل منابع

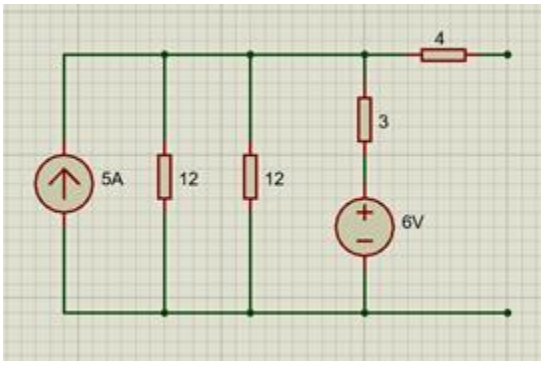
می‌توان مقاومت سری با منبع ولتاژ را به یک مقاومت موازی با منبع جریان مطابق شکل زیر تبدیل نمود:



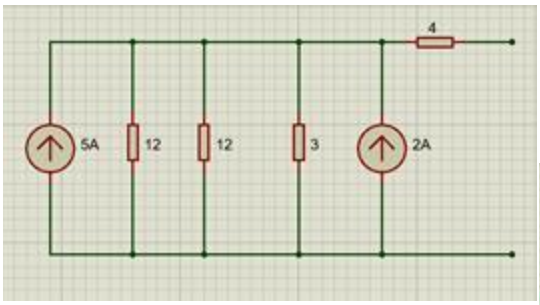


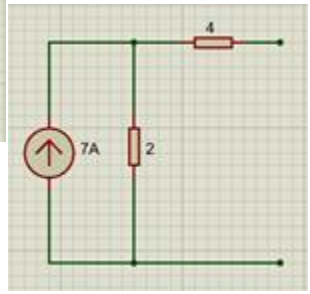
$$\Rightarrow I = \frac{E}{R} \; , E = RI \equiv$$

مثال: در مدار مقابل V_{AB} را به دست آورید.



پاسخ: با تبدیل منبع ولتاژ به جریان داریم:

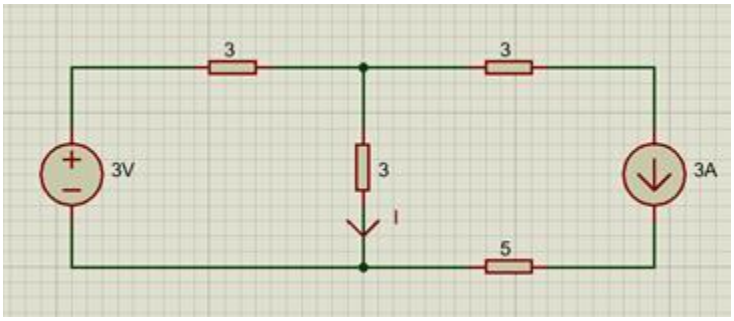




$$V_{AB} = ۲ \times ۷ = ۱۴V$$

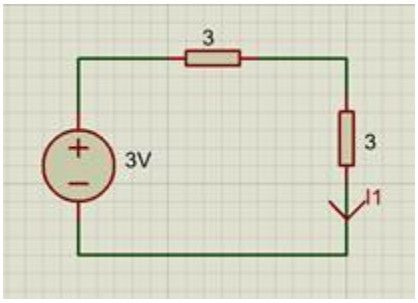
۲-۱-۵- قضیه‌ی جمع آثار

در هر مداری که شامل چندین منبع مستقل ولتاژ یا جریان باشد می‌توان از این قضیه استفاده کرد. این قضیه بیان می‌کند که مجهول مدار را می‌توان با جمع جبری اثرات ناشی از تک‌تک منابع مستقل وقتی به‌تنهایی کار می‌کنند (بقیه‌ی منابع مستقل خاموش هستند) به دست آورد بدین‌صورت که برای به دست آوردن مجهول، ابتدا وقتی که یک منبع در مدار وجود دارد محاسبه می‌کنیم و سپس از جمع جبری این ولتاژها و جریان‌ها مقدار مجهول را تعیین می‌کنیم.



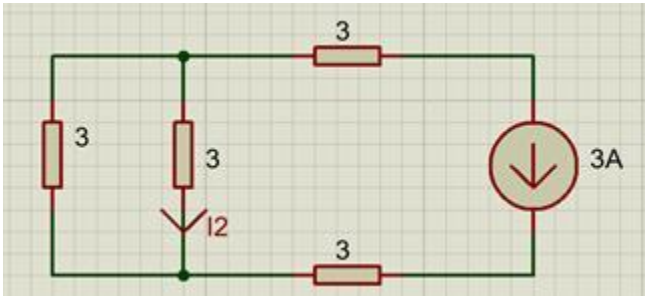
مثال: در مدار زیر I چه مقداری دارد؟

پاسخ: با استفاده از قضیه‌ی جمع آثار ابتدا منبع ولتاژ را اعمال کرده و منبع جریان را خاموش می‌کنیم پس داریم:



$$I_1 = \frac{۳}{۶} = ۰.۵A$$

حال منبع جریان را اعمال کرده و منبع ولتاژ را خاموش می‌کنیم پس داریم:



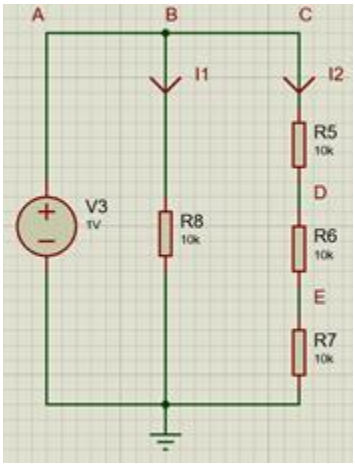
$$I_2 = -\frac{۳}{۲} = -۱.۵A$$

بنابراین داریم:

$$I = I_1 + I_2 = ۰.۵ + (-۱.۵) = -۱A$$

۲-۲- دستور کار

۱- تحلیل تقسیم جریان و تقسیم ولتاژ:



با توجه به مدار زیر به سؤالات پاسخ دهید.

الف- در گزارش کار خود پلاریته‌ی عناصر مدار را مشخص کنید.

ب- ولتاژ نقاط A ، B ، C ، D و E و مقدار جریان‌های I_1 و I_2 را محاسبه کنید.

پ- مدار را در نرم‌افزار Proteus شبیه‌سازی کنید و مقادیر ولتاژ نقاط A ، B ، C ، D و E و جریان‌های I_1 و I_2 را نمایش دهید. از نتیجه شبیه‌سازی عکس بگیرید.

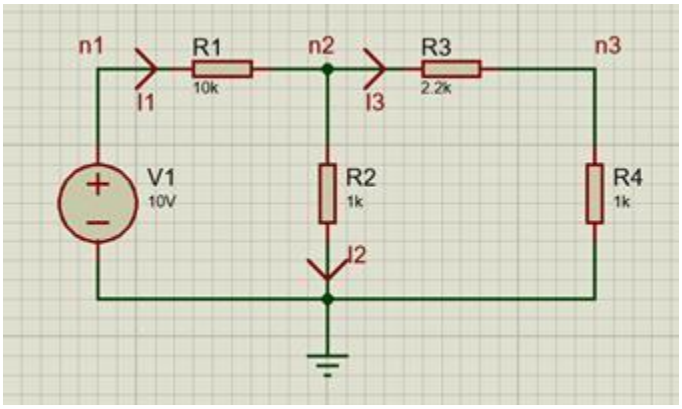
ت- مدار بالا را روی بردبورد ببندید.

ث- با استفاده از مولتی‌متر دیجیتالی ولتاژ نقاط A ، B ، C ، D و E و مقدار جریان‌های I_1 و I_2 را اندازه‌گیری کنید.

د- مقادیر اندازه‌گیری شده را با مقادیری که به‌صورت تئوری حساب کردید مقایسه کنید و نظر خود را بنویسید.

۲- تحلیل گره:

با توجه به مدار زیر به سؤالات پاسخ دهید.



الف- اگر ولتاژ دو سر مقاومت R_2، V_2ولت باشد ولتاژ دو سر مقاومت R_4را حساب کنید.

ب- در گزارش کار خود پلاریته‌ی عناصر مدار را مشخص کنید.

پ- ولتاژ گره‌های n_1، n_2و n_3و مقادیر جریان‌های I_1، I_2و I_3را حساب کنید و معادله‌های مربوط به آن‌ها را نیز بنویسید.

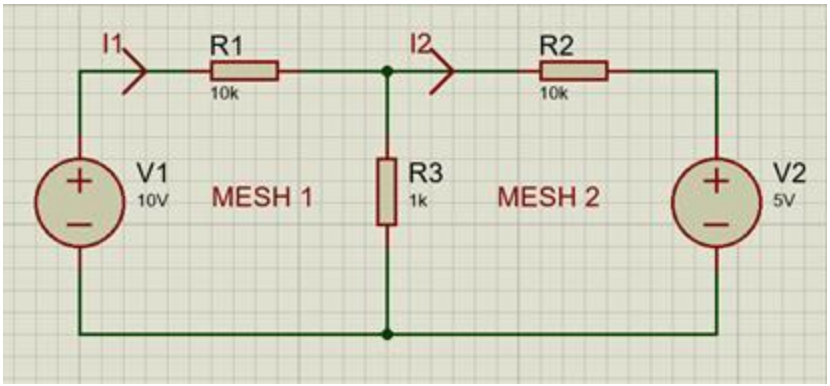
ت- مدار را در نرم‌افزار Proteus شبیه‌سازی کنید و ولتاژ گره‌ها و جریان شاخه‌ها را به دست آورید. از نتیجه شبیه‌سازی عکس بگیرید

ث- مدار بالا را روی بردبورد ببندید.

د- با استفاده از مولتی‌متر دیجیتالی ولتاژ گره‌های n_1، n_2و n_3و جریان‌های I_1، I_2و I_3را اندازه بگیرید.

ذ- مقادیر اندازه‌گیری شده را با مقادیری که به‌صورت تئوری حساب کردید مقایسه کنید و نظر خود را بنویسید.

۳- تحلیل مش:



با توجه به مدار زیر به سؤالات پاسخ دهید.

الف- در گزارش کار خود عناصر مدار را با پلاریته‌های صحیح نشان دهید.

ب- مقدار جریان‌های عبوری از مقاومت‌های R_1، R_2 و R_3 را محاسبه کنید.

پ-مدار را در نرم‌افزار Proteus شبیه‌سازی کنید. از نتیجه شبیه‌سازی عکس بگیرید.

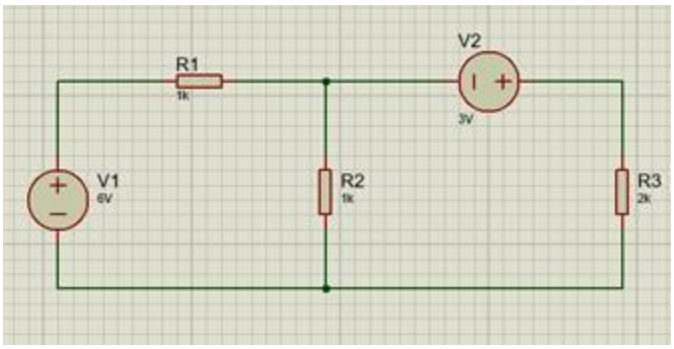
ت- مدار را روی بردبورد ببندید.

ث- جریان‌های I_1 و I_2 را با مولتی‌متر دیجیتالی اندازه بگیرید.

د- مقادیر اندازه‌گیری شده را با مقادیر تئوری مقایسه کنید. صحت روش تحلیل مش را بررسی کنید.

ذ- در یک پاراگراف توضیح دهید که تحلیل مدار چه موقع از تحلیل گره و چه موقع از تحلیل مش استفاده می‌کنید.

۳- قاعده‌ی تبدیل منابع:



با توجه به مدار زیر به سؤالات پاسخ دهید.

الف- مدار بالا را به مداری با یک منبع ولتاژ تبدیل کنید سپس ولتاژ دو سر مقاومت $R_۲$و جریان عبوری از آن را تعیین کنید. در هر مرحله از تبدیل مدار را رسم کنید.

ب- مدار بالا را در نرم‌افزار Proteus شبیه‌سازی کنید و ولتاژ و جریان مقاومت $R_۲$را نمایش دهید. از نتیجه شبیه‌سازی عکس بگیرید.

پ- مدار را روی بردبورد ببندید.

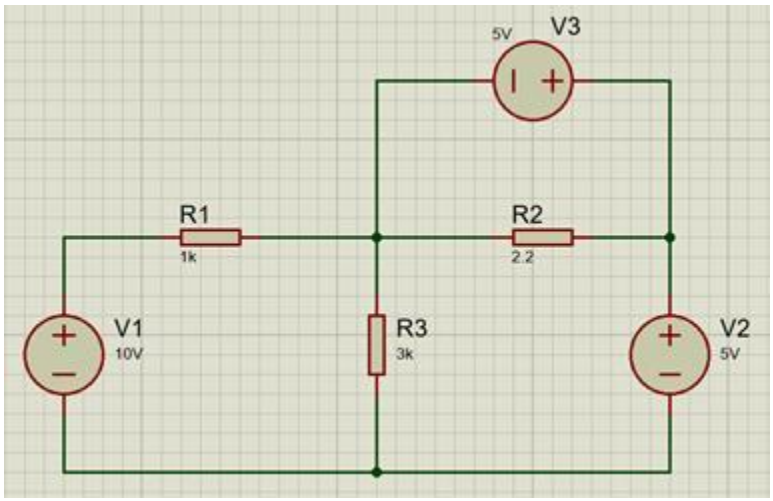
ت- با استفاده از مولتی‌متر دیجیتالی ولتاژ دو سر مقاومت $R_۲$و جریان عبوری از آن را اندازه‌گیری کنید. جهت ولتاژ را تعیین کنید و با تعویض پروب‌های قرمز و سیاه مولتی‌متر تغییر علامت ولتاژ را مشاهده کنید.

ث- چه تفاوتی بین مدار شما و مداری که شبیه‌سازی کردید وجود دارد؟ آیا سطح تحمل (tolerance) مقاومت روی پاسخ مدار تأثیر دارد؟

د- اگر سطح تحمل مقاومت‌ها ٪۱۰ باشد چگونه یک مداری طراحی می‌کنید که مانند مدار بالا بی‌نقص باشد و پاسخ درست بدهد؟ به فارسی توضیح دهید.

۳- قانون جمع آثار:

با توجه به مدار زیر به سؤالات پاسخ دهید.



الف- همه‌ی منابع ولتاژ به جز منبع V_1را اتصال کوتاه کنید و جریان عبوری از مقاومت R_3را محاسبه کنید.

ب- همان‌طور که از قانون جمع آثار می‌دانید سؤال قبل را با منابع V_2و V_3نیز تکرار کنید.

پ- ولتاژ دو سر مقاومت R_3را محاسبه کنید.

ت- مدار بالا را در نرم‌افزار Proteus شبیه‌سازی کنید و ولتاژ دو سر مقاومت R_3و جریان عبوری از آن را نمایش دهید. از نتیجه شبیه‌سازی عکس بگیرید.

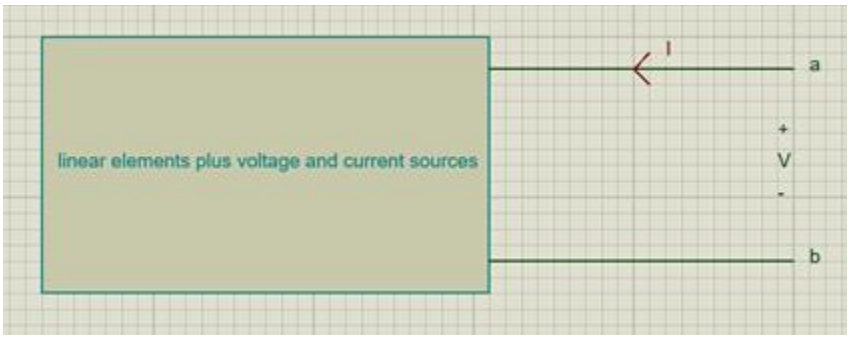
ث- مدار را روی بردبورد ببندید.

د- با استفاده از مولتی‌متر دیجیتالی ولتاژ دو سر مقاومت R_3را اندازه‌گیری کنید.

ذ- با مقایسه‌ی مقادیر اندازه‌گیری شده و مقادیر تئوری آیا صحت تئوری جمع آثار را تائید می‌کنید؟ چگونه؟

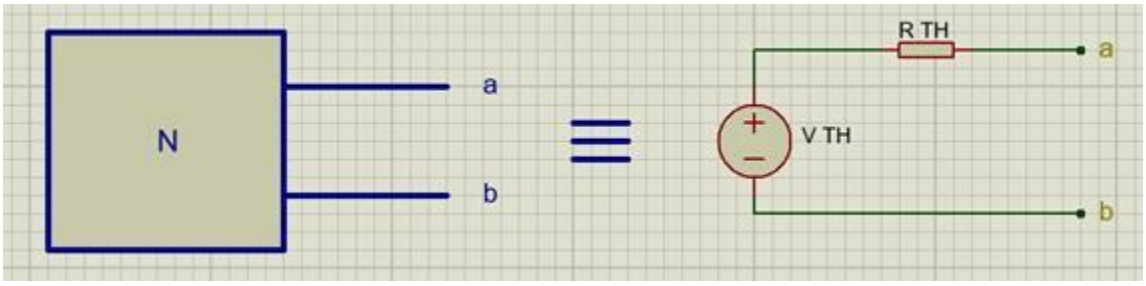
آزمایش سوم: آشنایی با مدارهای معادل تونن و نورتون و محاسبه‌ی بیشترین توان مصرفی

۱-۳- پیش‌آگاهی



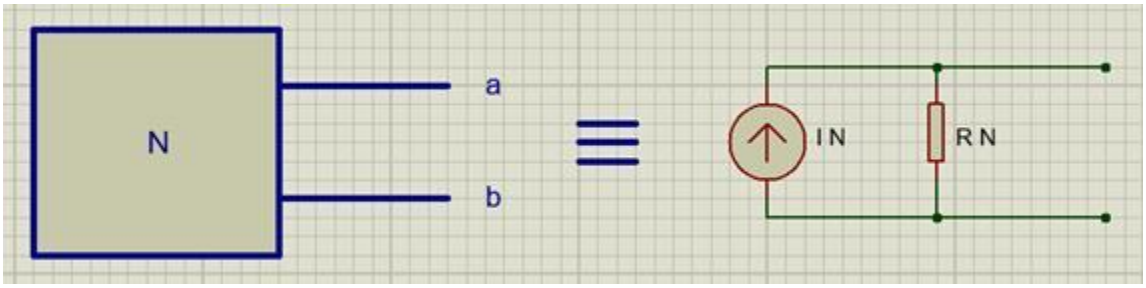
مدارهای معادل: دو مدار در صورتی معادل‌اند که رابطه‌ای که بین V (ولتاژ) و I (جریان) برقرار می‌کنند یکسان باشد. پس می‌توان شکل زیر را با هر مداری که رابطه‌ی بین V و I آن مانند رابطه‌ی بین V و I این مدار باشد جایگزین کرد. برای سادگی، از دو نوع مدل بسیار استفاده می‌شود؛ یکی معادل تونن و یکی معادل نورتون که در ادامه به آن‌ها می‌پردازیم.

۱-۱-۳- مدار معادل تونن



تئوری تونن بیان می‌دارد که هر شبکه‌ی خطی را می‌توان با یک منبع ولتاژ (V_{Th}) و یک امپدانس سری با آن (R_{Th}) جانشین ساخت.

۲-۱-۳- مدار معادل نورتون



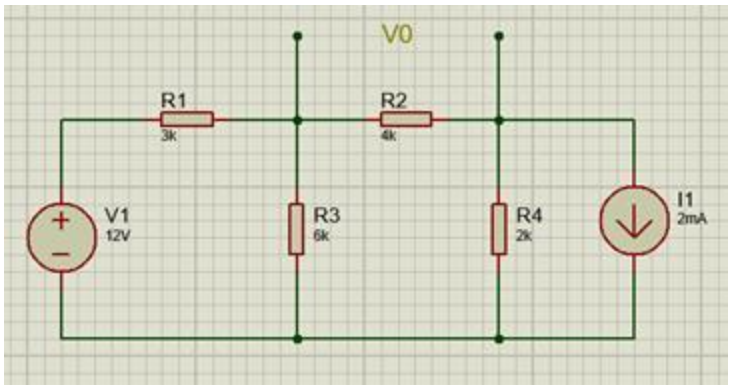
تئوری نورتون بیان می‌دارد که هر شبکه‌ی خطی را می‌توان با یک منبع جریان (I_N) و یک امپدانس موازی با آن (R_N) جانشین ساخت.

۳-۱-۳- نحوه‌ی محاسبه‌ی ولتاژ تونن

برای محاسبه‌ی ولتاژ تونن، بار متصل شده به دو سر a و b را جدا می‌کنیم؛ سپس اختلاف ولتاژ مدار باز بین دو نقطه‌ی a و b محاسبه می‌شود. این ولتاژ همان V_{Th} یا V_{oc} یعنی ولتاژ مدار باز (open circuit) است.

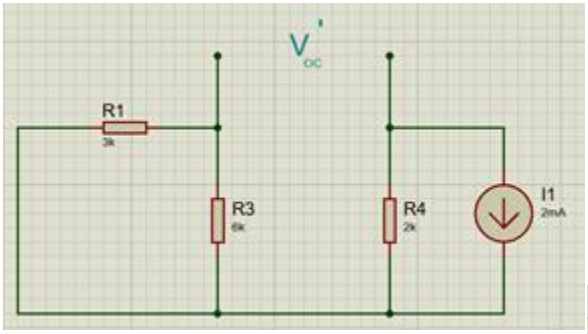
۴-۱-۳- نحوه‌ی محاسبه‌ی مقاومت تونن

برای محاسبه‌ی مقاومت تونن از دو سر a و b، کافی است منابع مستقل را خاموش کنیم، آنگاه مقاومت دیده‌شده از دو سر a و b را مقاومت تونن می نامیم.

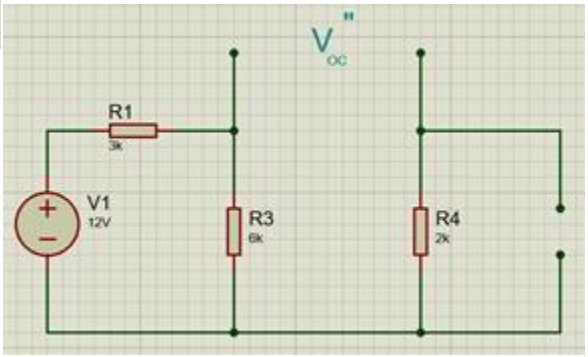


مثال: با استفاده از قانون تونن V_0 را در مدار زیر محاسبه کنید.

پاسخ: طبق قانون تونن ابتدا R_2 را حذف می‌کنیم، سپس با استفاده از قانون جمع آثار که در آزمایش قبل گفته شد ولتاژ V_0 را حساب می‌کنیم:



$$V'_{oc} = 2m(2k) = 4V$$

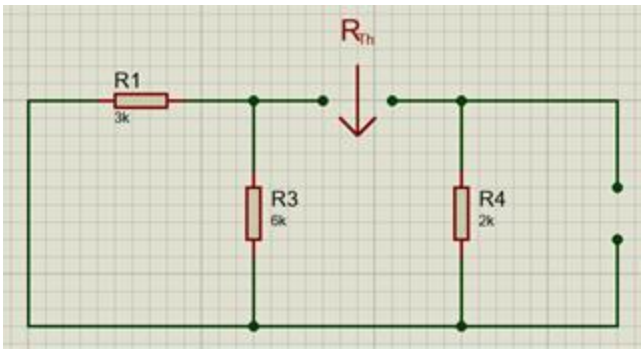


$$V''_{oc} = \left(\frac{6k}{3k+6k}\right)(12) = 8V$$

$$V_{oc} = 4 + 8 = 12V$$

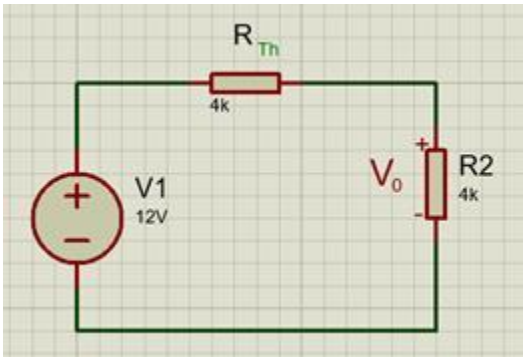
$$\Rightarrow V_{Th} = V_{oc} = 12V$$

حال مقاومت تونن را حساب می‌کنیم:



$$R_{Th} = (۳k||۶k) + ۲k = \frac{۳k(۶k)}{۳k + ۶k} + ۲k = ۴$$

اکنون مقاومت $R_۲$ را به مدار بازگردانده و به‌جای بقیه عناصر مدار صورت سؤال معادل تونن آن را قرار می‌دهیم:

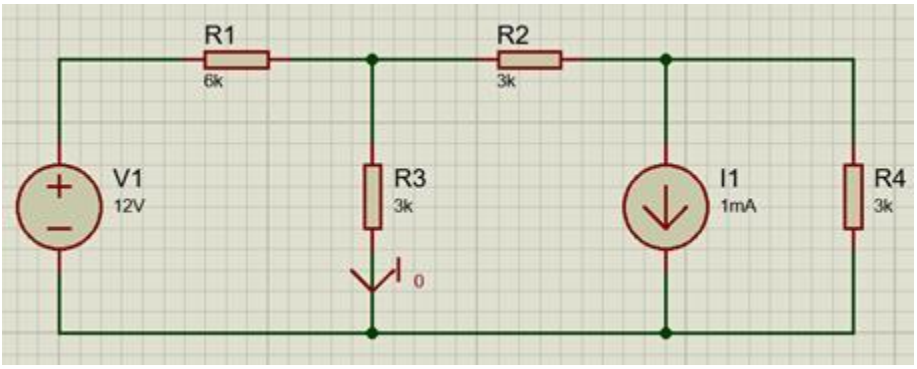


$$V_0 = \left(\frac{۴k}{۴k + ۴k}\right)(۱۲) = ۶V$$

۵-۱-۳- نحوه‌ی محاسبه‌ی جریان نورتون

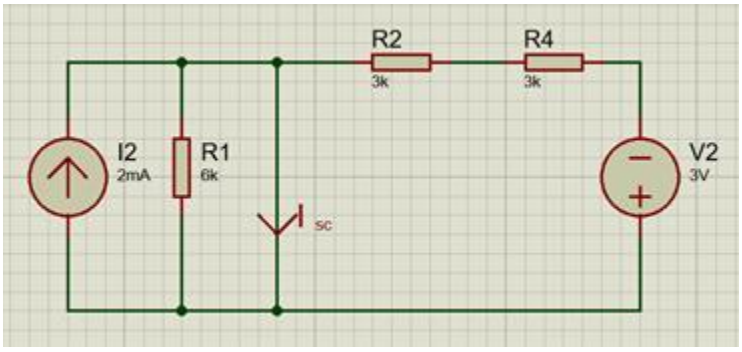
برای محاسبه‌ی جریان نورتون از دوسر a و b دو نقطه‌ی مذکور را اتصال کوتاه کرده، جریان عبوری از a به سمت b را I_N یا I_{sc}(short circuit) می‌نامیم.

تذکر: مقاومت نورتون همانند مقاومت تونن محاسبه می‌شود.



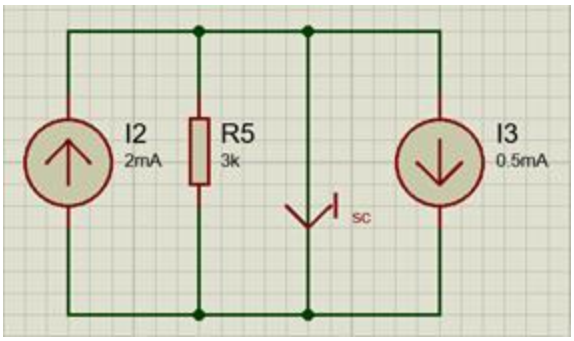
مثال: با استفاده از قانون نورتون I_0 را در مدار زیر محاسبه کنید.

پاسخ: طبق قانون نورتون ابتدا مقاومت R_3 را اتصال کوتاه می‌کنیم سپس با استفاده از قاعده‌ی تبدیل منابع، منبع ولتاژ را به منبع جریان و منبع جریان را به منبع ولتاژ تبدیل می‌کنیم.



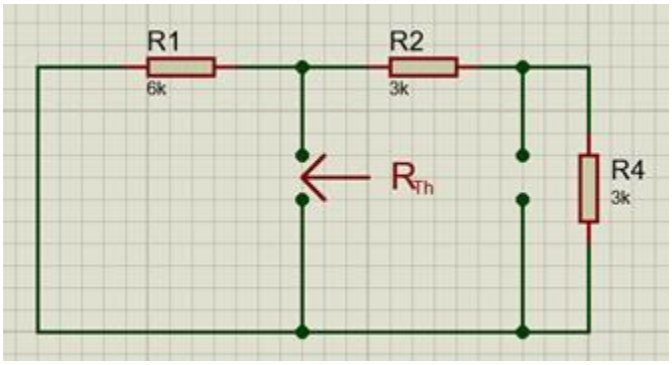
$$R' = 6k||6k = 3k\Omega$$

با تبدیل کردن دوباره‌ی منبع ولتاژ به جریان داریم:



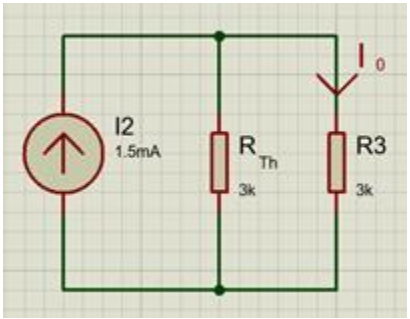
$$I_{sc} = ۲mA - ۰.۵mA = ۱.۵mA$$

حال مقاومت نورتون (تونن) را محاسبه می‌کنیم:



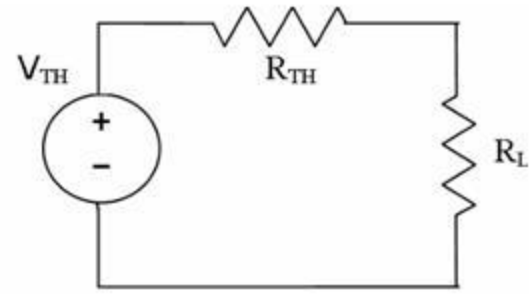
$$R_{Th} = ۶k||۶k = ۳k$$

اکنون مقاومت $R_۲$ را به مدار اضافه می‌کنیم و به‌جای بقیه‌ی عناصر مدار صورت مسئله معادل تونن آن را قرار می‌دهیم.



$$I_0 = \left(\frac{۳k}{۳k + ۳k}\right)(۱.۵m) = ۰.۷۵mA$$

۳-۱-۶- محاسبه‌ی بیشترین توان مصرفی



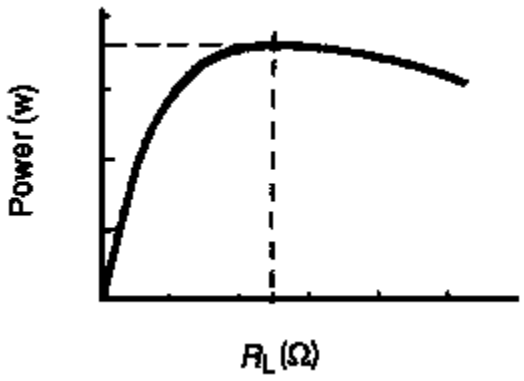
این قضیه بیان می‌کند که توان انتقال داده شده از منبع به یک مقاومت بار بیشینه است هرگاه مقدار مقاومت بار برابر با مقاومت داخلی منبع باشد. به عبارت دیگر یک مقاومت بار موقعی بیشترین توان را از منبع مصرف می‌کند که مقدار مقاومت بار برابر با مقدار مقاومت مدار معادل (تونن) شبکه باشد. بنابراین در مدار زیر که یک مدار معادل تونن است به هنگام مصرف بیشترین توان در بار داریم:

$$R_L = R_{th}$$

$$I_L = \frac{V_{th}}{(R_{Th} + R_L)} = \frac{V_{th}}{(R_{Th} + R_{th})} = \frac{V_{th}}{۲R_{Th}}$$

درنتیجه توان ماکزیمم به صورت زیر به دست می‌آید:

$$P_{max} = I_L^۲ R_L = V_{th}^۲ = ۴R_{th}$$

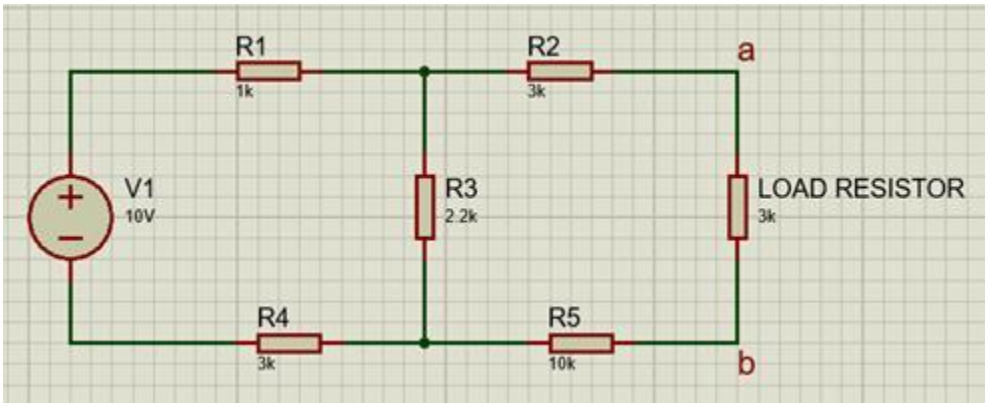


نمودار توان (P) برحسب مقاومت بار (R_L) در ادامه می‌آید. همانطور که مشخص است بیشترین مقدار توان موقعی

رخ می‌دهد که
$R_L = R_{th}$باشد.

۲-۳- دستور کار

۱- مدار معادل تونن:



با توجه به مدار زیر به سؤالات زیر پاسخ دهید:

الف- مقدار تئوری ولتاژ تونن (V_{Th}) را با پیدا کردن ولتاژ مدار باز بین دو نقطه‌ی a و b محاسبه کنید.

ب- سپس مقدار تئوری مقاومت تونن (R_{Th}) را با حذف مقاومت بار به دست آورید. منبع ولتاژ V_1را اتصال کوتاه کنید.

پ- مدار معادل تونن را به کمک V_{Th} و R_{Th} رسم نمایید.

ت- مدار بالا و مدار معادل تونن آن را در نرم‌افزار Proteus شبیه‌سازی کنید. آیا ولتاژ مقاومت بار در هردو شبیه‌سازی یک مقدار است؟ از نتیجه‌ی شبیه‌سازی عکس بگیرید.

ث- مدار بالا و معادل تونن آن را روی بردبورد ببندید.

د- با استفاده از مولتی‌متر دیجیتالی ولتاژ مقاومت بار را در هردو مدار حساب کنید. آیا تئوری تونن را تایید می‌کنید؟

ذ- درصد خطای ولتاژ مقاومت بار را نسبت به حالت تئوری اندازه‌گیری کنید.

۲- مدار معادل نورتون:

الف- مقاومت نورتون (N_R) را برای مدار سوال قبل محاسبه کنید. رابطه‌ی آن با مقاومت تونن چگونه است؟

ب- همچنین جریان نورتون را (N_I) را برای مدار سوال قبل محاسبه کنید.

پ- مدار معادل نورتون را برای مدار سؤال قبل رسم نمایید.

ت- مدار بالا و مدار معادل نورتون آن را در نرم‌افزار Proteus شبیه‌سازی کنید. آیا ولتاژ مقاومت بار در هردو شبیه‌سازی یک مقدار است؟ از نتیجه‌ی شبیه‌سازی عکس بگیرید.

ث- مدار بالا و معادل نورتون آن را روی بردبورد ببندید.

د- با استفاده از مولتی‌متر دیجیتالی ولتاژ مقاومت بار را در هردو مدار حساب کنید. آیا تئوری نورتون را تائید می‌کنید؟

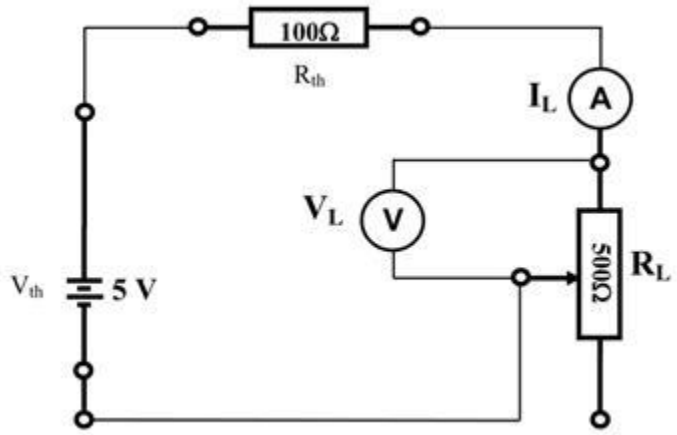
ذ- درصد خطای ولتاژ مقاومت بار را نسبت به حالت تئوری اندازه‌گیری کنید.

ر- رابطه‌ی بین ولتاژی که اندازه‌گیری کردید با ولتاژ تونن چگونه است؟

۲- بیشترین توان مصرفی:

مدار شکل زیر را ببندید. در این مدار ولتاژ و مقاومت تونن به صورت زیر هستند:

$$R_{th} = ۱۰۰\Omega . V_{th} = ۵V$$



الف- مقدار مقاومت بار را در مراحلی که در جدول زیر آمده است تغییر دهید.

ب- مقدار ولتاژ و مقاومت بار و توان مصرفی آن را اندازه‌گیری کرده و در جدول یادداشت کنید.

پ- این مراحل را برای زمانی که $R_{th} = ۱۵۰\Omega$ باشد تکرار کنید.

$R(\Omega)$	20	40	60	80	100	120	150	180	220	300
$I_L(mA)$										
$V_L(volt)$										
Power										

ت- نمودار توان بر حسب مقاومت بار را رسم کنید و ماکزیمم توان را مشخص کنید.

ث- مقادیر تئوری و اندازه‌گیری شده را با یکدیگر مقایسه و درصد خطای خود را محاسبه کنید.

آزمایش چهارم: آشنایی با تقویت‌کننده‌های عملیاتی

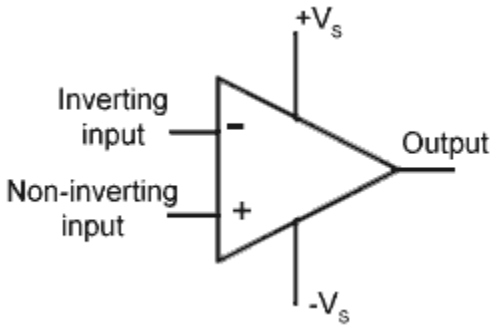
۱-۴- پیش‌آگاهی

هدف از انجام این آزمایش آشنایی با یکی از کاربردی‌ترین بلوک‌های اصلی سازنده‌ی مدارهای آنالوگ و دیجیتال می‌باشد. در ابتدا با شکل و ساختار اصلی تقویت‌کننده‌های عملیاتی آشنا می‌شویم و سپس نمودارها و رابطه‌های مهم آن‌ها را بررسی می‌کنیم و در پایان بعضی از مهم‌ترین دسته‌های مدارهای ساخته‌شده با تقویت‌کننده‌ی عملیاتی را بررسی می‌کنیم.

۱-۱-۴- نماد و توضیحات اساسی

تقویت‌کننده‌های عملیاتی به‌طور گسترده‌ای در کامپیوترها مورداستفاده قرار می‌گیرند. آن‌ها می‌توانند عملیات‌های محاسباتی مانند جمع‌کردن، تفریق کردن، انتگرال گرفتن، مشتق گرفتن و... را انجام دهند. توسعه‌ی تکنیک‌های ساخت IC باعث شده است تا هزینه‌ی ساخت این المان‌های اساسی بسیار پایین بیاید. ما در این آزمایش از IC 741 استفاده می‌کنیم.

نماد ساده‌ی یک تقویت‌کننده‌ی عملیاتی در شکل۴-۱ نمایش داده‌شده است.



شکل ۴-۱: نماد ساده‌ی تقویت‌کننده‌ی عملیاتی

تقویت‌کننده‌های عملیاتی دارای یک پایه‌ی ورودی مستقیم و یک پایه‌ی ورودی معکوس و یک پایه‌ی خروجی می‌باشد. در حالتی که ورودی به پایه‌ی معکوس داده شود سیگنال خروجی ۱۸۰ درجه تغییر فاز پیدا می‌کند. سیگنالی که به پایه‌ی مستقیم وارد شود دچار تغییر فاز نشده و فاز خروجی به مقدار همان فاز ورودی می‌باشد.

در حالت تقویت خطی، رابطه‌ی زیر برقرار است:

$$Output\ signal = A \times Input\ signal$$

A برابر با مقدار بهره‌ی تقویت‌کننده‌ی عملیاتی است. به‌طورکلی ۴ نوع تقویت‌کنندگی داریم:

۱- تقویت‌کنندگی ولتاژی

۲- تقویت‌کنندگی جریانی

۳- تقویت‌کنندگی اهمی

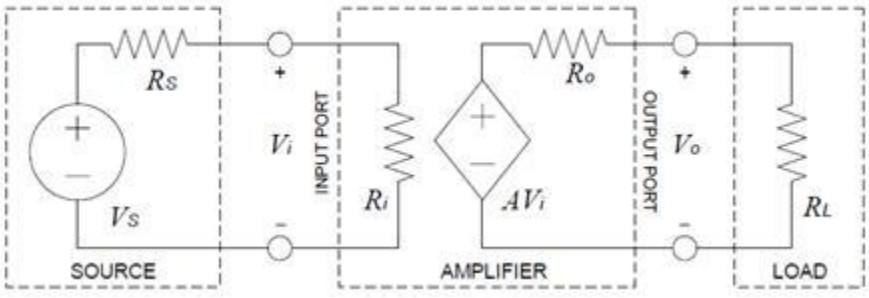
۴- تقویت‌کنندگی هدایتی

بحث در این آزمایش را به تقویت‌کنندگی ولتاژی محدود می‌کنیم.

بهره‌ی ولتاژی مدار تقویت‌کننده‌های عملیاتی معمولاً بسیار زیاد است (حدود ۱۰۰۰۰۰) که در مقابل بهره‌ی کل سیستم بسیار بزرگ است. به همین دلیل معمولاً بهره‌ی ولتاژی آن را بی‌نهایت در نظر می‌گیرند.

شکل ۴-۲: مدار کامل تقویت‌کنندگی

شکل ۴-۲ مدل اصلی تقویت‌کنندگی در این مدارها را نشان می‌دهد.



پورت ورودی نقش یک موجود غیرفعال را بازی می‌کند و از خود هیچ ولتاژی تولید نمی‌کند و به مقاومت R_i به‌عنوان مقاومت داخلی متصل است. پورت خروجی هم توسط مقاومت R_o و با منبع ولتاژ AV_i که سری با آن قرار دارد مدل‌سازی شده است.

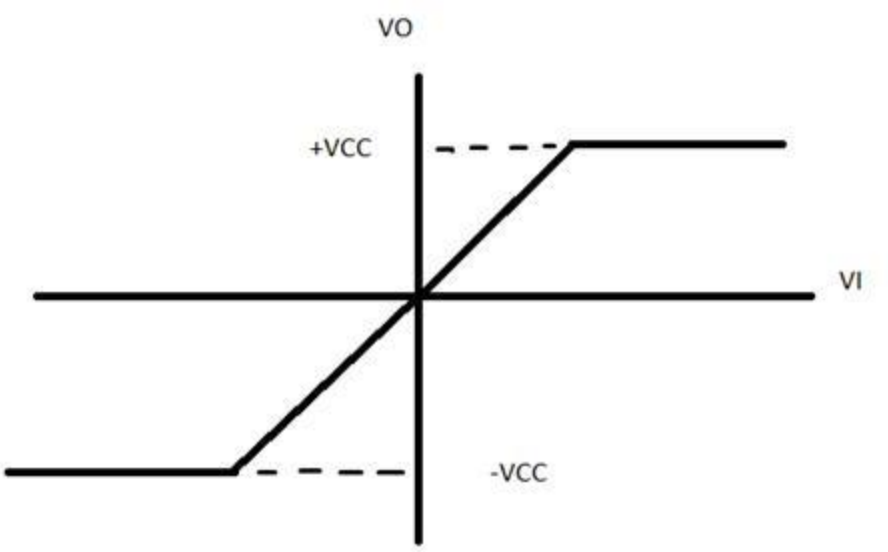
در اینجا V_i به‌عنوان تفاوت دو سر ورودی یا همان ولتاژ دو سر ورودی است. شکل ۴-۲ مدار کامل تقویت‌کنندگی را با نمایش منبع و بار خروجی نمایش می‌دهد.

می‌توان مشاهده کرد که هم در ورودی تقویت‌کننده و هم در خروجی آن از تقسیم ولتاژ استفاده شده است. مقدار V_i, V_o به شرح زیر است:

$$V_i = \left(\frac{R_i}{R_i + R_s}\right) \times V_s$$

$$V_o = \left(\frac{R_l}{R_l + R_o}\right) \times AV_i$$

شکل ۴-۳ نمودار مربوط ورودی- خروجی مدار تقویت‌کننده‌های عملیاتی را نشان می‌دهد.

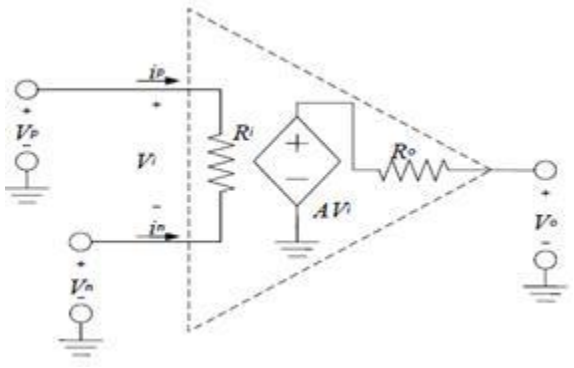


شکل ۴-۳: نمودار ورودی- خروجی تقویت‌کننده‌های عملیاتی

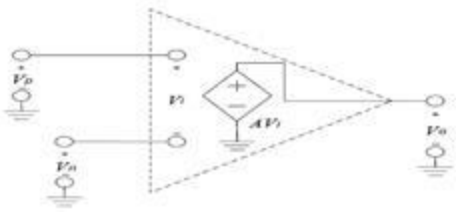
۴-۱-۲- مدل ایده آل تقویت‌کننده‌های عملیاتی

نماد اصلی تقویت‌کننده‌های عملیاتی با ساختار داخلی که در شکل ۴-۲ رسم شده بود در شکل ۴-۴ نمایش داده‌شده است.

این وسیله تفاوت ولتاژ بین دو پایه‌ی ورودی ($V_p - V_n = V_i$)را تقویت کرده و ولتاژ V_oرا در خروجی تولید می‌کند.



شکل ۴-۴: تقویت‌کننده‌ی عملیاتی استاندارد



از مدل ایده‌آل تقویت‌کننده‌های عملیاتی به دلیل راحت‌تر شدن تحلیل مدار استفاده می‌کنیم. در مدل ایده آل ۳ فرض اساسی را در نظر می‌گیریم:

۱- بهره‌ی تقویت‌کننده‌های عملیاتی بی‌نهایت است.

۲- مقاومت ورودی بی‌نهایت است.

۳- مقاومت خروجی صفر است.

شکل ۴-۵ حاصل اعمال این فرض‌ها است.

به دلیل این‌که مقاومت ورودی بی‌نهایت است و V_i بی‌نهایت است، جریان‌های ورودی برای تقویت‌کننده‌ی عملیاتی ایده آل برابر صفر است: $i_n = i_p = 0$

و هم‌چنین در تقویت‌کننده‌ی عملیاتی ایده آل رابطه‌ی روبه‌رو برقرار است: $V_i = V_s$

و هم‌چنین چون $R_o = 0$، اثر بار بر روی پورت خروجی ظاهر نمی‌شود و داریم: $V_o = V_i \times A$

و چون $A = \infty$ است رابطه‌ی روبه‌رو برقرار است: $V_p = V_n$

مثال: با استفاده از قانون KCL بهره‌ی مدار بسته‌ی شکل ۴-۶ را بیابید.

طبق فرض‌های تقویت‌کننده‌های عملیاتی ایده آل دو سر ورودی ولتاژ برابر دارند. با استفاده از KCL داریم:

$$\frac{0 - vs}{R1} + \frac{0 - vo}{R2} = 0 \rightarrow vo = -\frac{R2}{R1} \times vs \rightarrow AV = \frac{vo}{vs} = -\frac{R2}{R1}$$

۳-۱-۴- تقویت‌کننده‌ی غیر معکوس کننده

تقویت‌کننده‌ی عملیاتی ایده‌آل به‌تنهایی وسیله‌ی کاربردی نیست. به این دلیل که یک ورودی متناهی را به یک خروجی نامتناهی و بی‌نهایت بزرگ تبدیل می‌کند، اما با اضافه کردن بعضی از قطعات خارجی به آن می‌توان مدارهای تقویت‌کننده‌ی مهم و اساسی ایجاد کرد.

شکل ۴-۷ یک مدار ساده‌ی با استفاده از تقویت‌کننده‌ی عملیاتی را نشان می‌دهد که به آن تقویت‌کننده‌ی غیر معکوس کننده می‌گوییم.

برای درک نحوه‌ی کارکرد این مدار باید یک رابطه ببین ورودی و خروجی آن به‌دست آوریم. $V_p = V_i$

از آنجا که جریانی که به پایه‌ی منفی وارد می‌شود برابر با صفر است، جریانی که به R_1 وارد می‌شود برابر است با جریانی که به R_2 وارد می‌شود. (چرا؟)

حال می‌توان از رابطه‌ی تقسیم ولتاژ استفاده کرد و V_n را به‌دست آورد:

$$V_n = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right) \times V_{out}$$

هم‌چنین می‌دانیم که $V_p = V_{in} = V_n$ بنابراین داریم:

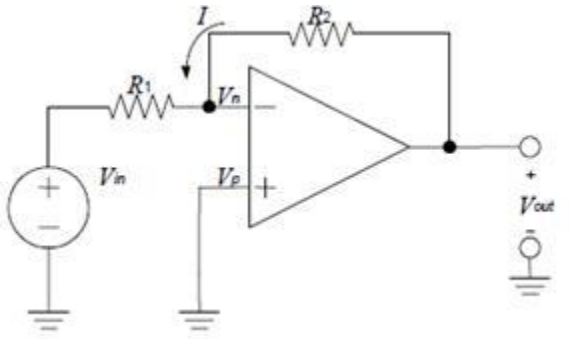
$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \times V_{in}$$

نکته‌ی قابل‌توجه این است که بهره‌ی این مدار همواره بزرگ‌تر یا مساوی با یک است.

سؤال: شرایط مختلف بهره‌ی این مدار را بررسی کرده و در پیش گزارش آن‌ها را توضیح دهید.

۴-۱-۴- تقویت‌کننده‌ی معکوس‌کننده

شکل ۴-۸ یک مدار تقویت‌کننده‌ی مهم و اساسی دیگر را نشان می‌دهد. به‌مانند مدار بالا است فقط با این تفاوت که ورودی آن به پایه‌ی معکوس‌کننده‌ی آن از طریق R_1 وارد می‌شود و پایه‌ی دیگر زمین می‌شود.



شکل ۴-۸: تقویت‌کننده‌ی معکوس‌کننده

برای درک نحوه‌ی کارکرد این مدار باید یک رابطه ببین ورودی و خروجی آن به‌دست آوریم.

در ابتدا توجه داریم که ولتاژ پایه‌ی منفی با ولتاژ پایه‌ی مثبت برابر است و چون پایه‌ی مثبت به زمین متصل است پس ولتاژ این دو پایه برابر صفر است. چون جریانی که به پایه‌ی معکوس کننده وارد می‌شود برابر صفر است (چرا؟)، جریانی که به R_1 وارد می‌شود با جریانی که به R_2 وارد می‌شود برابر است، اما جهت معکوس آن دارد.

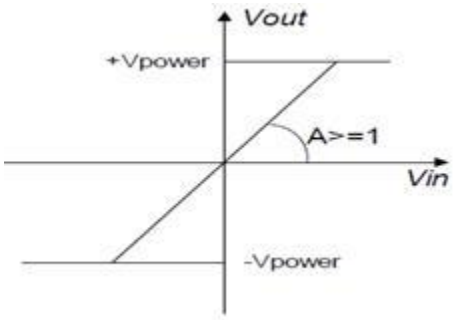
بر اساس KCL داریم:

$$\frac{V_{in} - V_n}{R_1} = \frac{V_{out} - V_n}{R_2}$$

از آنجایی که $V_n = 0$ داریم:

$$V_{out} = \left(-\frac{R_2}{R_1}\right) \times V_{in}$$

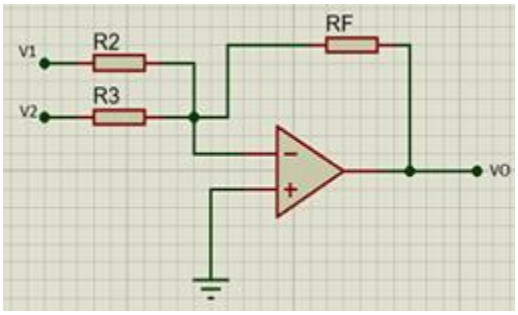
در شکل ۴-۹ مقایسه‌ی بهره‌ی این دو مدار است.



شکل ۴-۹

۵-۱-۴- مدارهای جمع کننده با استفاده از تقویت‌کننده‌های عملیاتی

مدار شکل ۴-۱۰ یک مدار جمع کننده‌ی جبری می‌باشد. خروجی آن حاصل جمع دو ورودی است فقط علامت حاصل، علامت معکوس این حاصل جمع است.



شکل ۴-۱۰

روش محاسبه‌ی خروجی در این مدار به‌صورت زیر می‌باشد:

$$V_o = -\left(\frac{R_F}{R_1} \times V_1 + \frac{R_F}{R_2} \times V_2\right)$$

مثال: مداری طراحی کنید که رابطه‌ی زیر را بتوان به‌وسیله‌ی آن محاسبه نمود.

$$V_o = ۱۰ \times V_۱ - ۱۵ \times V_۲ - ۲۰ \times V_۳ + ۴ \times V_۴$$

۶-۱-۴- تراشه‌ی 741

ساختار داخلی ic 741 به‌مانند شکل ۴-۱۱ می‌باشد.

نکته‌ی مهم راه‌اندازی آن می‌باشد که برای این کار لازم است مقدار vcc به پایه‌ی ۷ آن داده شود تا چیپ شروع به کار بکند و پایه‌ی ۴ را نیز باید به vee متصل کنیم.

برای این کار لازم است تا معمولاً ولتاژ +۹ ولت به پایه‌ی ۷ و مقدار -۹ به پایه‌ی ۴ آن داده شود.

شکل ۴-۱۱: IC ۷۴۱

۲-۴- دستور کار

۱- با توجه به مدار زیر جدول را تکمیل کنید.

RF	R1	Output	Input	Gain	Phase
5600	2200				
5600	5600				
5600	33000				

۲- یک مدار غیر معکوس کننده ببندید و جدول زیر را تکمیل کنید.

RF	R1	Output	Input	Gain	Phase
5600	2200				
5600	5600				
5600	33000				

۳- مداری طراحی کنید که معادله‌ی روبه‌رو را پیاده‌سازی کند. $V_o = ۲ \times V_۱ - ۳ \times V_۲$

سپس با ولتاژهای ورودی مختلف(۳ مورد کافی است) آن را تحقیق کنید.

۴- یک مدار یک‌سوساز و یک مدار انتگرال گیر با استفاده از تقویت‌کننده‌ی عملیاتی پیاده‌سازی کرده و شکل موج خروجی و ورودی را ثبت کنید. (به‌طور کامل در پیش گزارش شرح داده شود.)

۵- مداری طراحی کنید که معادله‌ی روبه‌رو را پیاده‌سازی کند. $V_o = ۴ \times V_۱ + ۵ \times V_۲$

سپس با ولتاژهای ورودی مختلف(۳ مورد کافی است) آن را تحقیق کنید.

آزمایش پنجم: آشنایی با پاسخ مدارهای مرتبه اول RC و RL

۱-۵- پیش‌آگاهی

خازن‌ها و سلف‌ها توانایی ذخیره کردن انرژی را دارند. در مداری که از مقاومت‌ها و از سلف یا خازن تشکیل شده است، یک تغییر ناگهانی در ولتاژ DC و یا جریان مدار منجر به جذب و یا رهاسازی انرژی توسط سلف یا خازن می‌شود. ولتاژها و جریان‌ها در این نوع از مدارها به‌وسیله‌ی معادلات دیفرانسیل درجه اول توصیف می‌شوند.

این مدارها از دو دیدگاه قابل‌بررسی هستند: حوزه‌ی زمان و حوزه‌ی فرکانس. در حوزه‌ی زمان پاسخ گذرایی را بررسی می‌کنیم که دراثر تغییرات ناگهانی در ولتاژ ایجاد می‌شوند (برای مثال موقع بستن کلید یا ایجاد ولتاژ ورودی به‌صورت تابع پله). در حوزه‌ی فرکانس پاسخ به ورودی سینوسی را به‌عنوان تابعی از فرکانس بررسی می‌کنیم.

۱-۱-۵- بررسی مدار RC در حوزه‌ی زمان

در مدار زیر ولتاژ $v(t)$ از مجموع ولتاژهای $v_C(t)$ و $v_R(t)$ به دست می‌آید. اگر ولتاژها را برحسب تابعی از زمان بنویسیم (برخلاف وقتی‌که آن‌ها را بر اساس تابعی از فرکانس زاویه‌ای (ω) می‌نویسیم) آنگاه از حوزه‌ی زمان برای حل مسئله استفاده کرده‌ایم.

برای یک مدار RC معادله‌ی زیر را می‌توان نوشت:

$$v(t) = v_C(t) + v_R(t) \quad (۱)$$

می‌توان این معادله را با استفاده از رابطه‌های $v_C = Q/C$ و $v_R = i(t)R$ بازنویسی کرد:

$$v(t) = {Q(t)}/{C} + i(t)R \quad (۲)$$

$Q(t)$در خازن و $i(t)$در حلقه‌ی مدار با معادله‌ی زیر با هم رابطه دارند:

$$Q(t) = \int_{0}^{t} i(t')dt' \quad (۳)$$

با فرض $Q(0) = 0$یا

$$i(t) = \frac{dQ}{dt}$$

با مشتق گرفتن از معادله‌ی (۲) و استفاده از معادله‌ی قبل داریم:

$$\frac{dv}{dt} = {}^{i}/_{C} + R\frac{di}{dt}$$

$$= v_R \frac{1}{RC} + \frac{dv_R}{dt}$$

با توجه به معادله‌ی (۳) اگر ولتاژ دوسر مقاومت، به مقدار کافی آرام تغییر کند، می‌توانیم از عبارت دوم سمت راست تساوی صرف‌نظر کنیم. به‌عبارت‌دیگر:

$$\frac{dv_R}{dt} \ll \frac{v_R}{RC}$$

بنابراین ولتاژ R باید کوچک باشد و بیشتر $v(t)$دو سر C ظاهر می‌شود. درنهایت به معادله‌ی زیر می‌رسیم:

$$v_R(t) = RC\frac{dv}{dt}$$

نکته: برای سیگنال‌هایی که به‌آرامی تغییر می‌کنند ولتاژ دو سر مقاومت متناسب با مشتق ولتاژ ورودی است.

با انتگرال‌گیری از معادله‌ی (۳) می‌توان به معادله‌ی زیر رسید:

$$\int_{0}^{t} v(t')dt' = \frac{1}{C}\int_{0}^{t} Q(t')dt' + Q(t)R$$

با توجه به معادله‌ی (۳) تا وقتی ولتاژ دو سر C کوچک باشد می‌توان از عبارت اول در سمت تساوی صرف‌نظر کرد. به‌عبارت‌دیگر:

$$\frac{dv_R}{dt} \ll \frac{v_R}{RC} \text{ یا } \frac{1}{v_R}\frac{dv_R}{dt} \ll \frac{1}{RC}$$

سیگنال باید به‌سرعت تغییر کند. با تقسیم معادله‌ی بالا بر RC داریم:

$$v_C(t) = \frac{1}{RC}\int_{.}^{t} v(t')dt'$$

نکته: برای سیگنال‌های ورودی‌ای که به‌سرعت تغییر می‌کنند، ولتاژ دو سر خازن برابر یا انتگرال ولتاژ ورودی است.

۲-۱-۵- بررسی مدار RL در حوزه‌ی زمان

در مدار زیر $v(t)$ با معادله‌ی زیر حساب می‌شود:

$$v(t) = v_L + v_R = L\frac{di}{dt} + iR$$

تحلیل مدار RL نیز مانند تحلیل مدار RC مدار انتگرال‌گیر و مشتق‌گیر را نتیجه می‌دهد:

برای ورودی‌هایی که به‌آرامی تغییر می‌کنند، قسمت عمده‌ی ولتاژ دوسر مقاومت می‌افتد و باقیمانده‌ی ولتاژ نیز که دو سر سلف می‌افتد از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$v_L(t) = \frac{L}{R}\frac{dv}{dt}$$

برای ورودی‌هایی که به‌سرعت تغییر می‌کنند، قسمت عمده‌ی ولتاژ دوسر سلف می‌افتد و ولتاژ دو سر مقاومت عبارت است از:

$$v_R(t) = \frac{R}{L}\int_{.}^{t} v(t')dt'$$

۳-۱-۵- پاسخ طبیعی مدار RL

به جریان‌ها و ولتاژهایی که به هنگام ذخیره شدن انرژی در سلف و خازن، به‌صورت ناگهانی در مدار ایجاد می‌شوند، پاسخ طبیعی مدار گفته می‌شود.

در یک مدار RL پاسخ طبیعی به‌وسیله‌ی ولتاژ و جریان در پایانه‌های مقاومت به هنگام خاموش شدن منبع خارجی توصیف می‌شود. رابطه‌های ولتاژ و جریان مقاومت در این وضعیت به‌صورت زیر هستند:

$$i(t) = I_0 e^{-t/\tau} \quad .t \geq 0$$

$$v(t) = I_0 R e^{-t/\tau} \quad .t \geq 0$$

در رابطه‌های بالا I_0 جریان اولیه‌ای است که قبل از خاموش شدن منبع و دشارژ سلف در آن وجود داشته است. نماد τ نمایش‌دهنده‌ی ثابت زمانی مدار است:

$$\tau = L/R$$

ثابت زمانی مدار تعیین می‌کند که ولتاژ و جریان با چه نرخی به صفر نزدیک می‌شوند.

در مدار زیر V_S یک سیگنال مربعی همراه با یک ولتاژ آفست DC فراهم می‌کند به صورتی که قسمت پایینی شکل موج بر روی سطح ولتاژ صفر قرار می‌گیرد. R_S مقاومت داخلی منبع ولتاژ است؛ بنابراین وقتی شکل موج مقدار صفر ولت را می‌گیرد (و می‌تواند به‌صورت اتصال کوتاه نشان داده شود) انرژی سلف L داخل ترکیب R_1 و R_S تخلیه می‌شود. برای دیدن پاسخ طبیعی مدار، دوره (پریود) T از موج مربعی باید به‌اندازه‌ی کافی بلند باشد تا به سلف اجازه دهد تا به‌طور کامل شارژ و دشارژ شود. معمولاً $T = 20\tau$ برای این منظور مناسب است.

به‌طور خلاصه پاسخ طبیعی مدار RL به‌وسیله‌ی (۱) پیدا کردن جریان اولیه‌ی I_0 داخل سلف، (۲) پیدا کردن ثابت زمانی مدار شکل بالا و (۳) معادله‌ی به دست آوردن $i(t)$ که ذکر شد به دست می‌آید.

۴-۱-۵- پاسخ طبیعی مدار RC

پاسخ طبیعی مدار RC نیز مانند پاسخ طبیعی مدار RL می‌باشد. رابطه‌های تعیین ولتاژ و جریان مقاومت به‌صورت زیر هستند:

$$v(t) = V_0 e^{-t/\tau} \, . \, t \geq 0$$

$$i(t) = \frac{V_0}{R} e^{-t/\tau} \, . \, t \geq 0$$

$$\tau = RC$$

در معادلات بالا V_0 ولتاژ اولیه‌ای است که دو سر خازن (به‌صورت کاملاً شارژ شده) وجود دارد قبل از آن‌که منبع خاموش شود و خازن شروع به دشارژ کند. مدار RC در زیر نمایش داده‌شده است. سایر مفاهیمی که در مورد مدار RL ذکر شد به‌طور مشابه در این‌جا صادق است.

به‌طور خلاصه پاسخ طبیعی مدار RC به‌وسیله‌ی (۱) پیدا کردن ولتاژ اولیه‌ی V_0 دو سر خازن، (۲) پیدا کردن ثابت زمانی مدار شکل بالا و (۳) معادله‌ی به دست آوردن $v(t)$ که برای این مدار ذکر شد به دست می‌آید.

۵-۱-۵- پاسخ پله‌ی مدار RL

پاسخ مدار به ولتاژ یا جریان ثابتی که به‌صورت ناگهانی توسط یک منبع به آن اعمال می‌شود را پاسخ پله‌ی آن مدار می‌گویند. این مورد شرایط مخالف پاسخ طبیعی را بیان می‌کند. اکنون در مدارهای RL یا RC، سلف یا خازن (که آن‌ها را به‌طور کامل تخلیه شده فرض می‌کنیم)، بعد از اعمال ولتاژ یا جریان ناگهانی شروع به جذب انرژی می‌کنند. در ادامه ولتاژ و جریانی که در این شرایط در مدار به وجود می‌آیند مورد بحث واقع می‌شوند.

در یک مدار RL شرایط اولیه برای پاسخ پله به‌صورت $I_0 = 0$ فرض می‌شوند. بعد از اعمال ولتاژ توسط منبع، جریان مدار و ولتاژ دو سر سلف توسط رابطه‌های زیر به دست می‌آیند:

$$i(t) = \frac{V_s}{R}(1 - e^{-t/\tau}) \,.\, t \geq 0$$

$$v(t) = V_s e^{-t/\tau} \,.\, t \geq 0$$

لازم به ذکر است که رابطه‌ی اول بیان می‌کند که جریان از مقدار صفر افزایش پیدا می‌کند تا به یک مقدار نهایی V_s/R برسد و نرخ این افزایش را ثابت زمانی ($\tau = L/R$) مشخص می‌کند.

شکل ۵-۳ می‌تواند برای مشخص کردن پاسخ پله استفاده شود. دوره‌ی موج مربعی باید به‌اندازه‌ی کافی بلند باشد تا اجازه‌ی شارژ و دشارژ کامل را در سیکل‌های بعدی به سلف بدهد. برای این مدار $R = R_s + R_1$ است.

۶-۱-۵- پاسخ پله‌ی مدار RC

در یک مدار RC مانند شکل زیر، ولتاژ اولیه برای خازن به‌صورت $V_0 = 0$ فرض می‌شود. بعد از اعمال منبع جریان، ولتاژ و جریان خازن از رابطه‌های زیر به دست می‌آیند:

$$v(t) = I_s R(1 - e^{-t/\tau}) \,.\, t \geq 0$$

$$i(t) = I_s e^{-t/\tau} \,.\, t \geq 0$$

لازم به ذکر است که رابطه‌ی اول بیان می‌کند که ولتاژ از مقدار صفر افزایش پیدا می‌کند تا به یک مقدار نهایی $I_s R$ برسد و نرخ این افزایش را ثابت زمانی ($\tau = RC$) مشخص می‌کند.

با اعمال قاعده‌ی تبدیل منابع در مدار بالا، شکل ۵-۴ می‌تواند برای تعیین پاسخ پله استفاده شود به‌طوری‌که $V_s = I_s R$ و $R = R_s + R_۲$ باشد. دوره‌ی موج مربعی باید به‌اندازه‌ی کافی بلند باشد تا اجازه‌ی شارژ و دشارژ کامل را در سیکل‌های بعدی به خازن بدهد.

۵-۱-۷- پاسخ مدارهای RC و RL در حوزه‌ی فرکانس

اکنون می‌خواهیم به‌جای موج‌های مربعی، موج‌های سینوسی به مدار اعمال کنیم و فاز و دامنه را (نسبت به منبع) محاسبه و اندازه‌گیری کنیم. این اندازه‌گیری‌ها باید نسبت با محاسبات گسسته‌ای که از مدار انتظار می‌رود مقایسه شود.

مدارهای RL و RC در این آزمایش می‌توانند به‌صورت تقسیم‌کننده‌های ولتاژ AC مدل شوند. شبکه‌ی تقسیم‌کننده‌ی ولتاژ شکل ۵-۵ را در نظر بگیرید. اگر ورودی سینوسی‌ای که به شبکه اعمال می‌شود به‌صورت زیر باشد:

$$v(t) = Re(V_{in} e^{j\omega t})$$

آنگاه خروجی به‌صورت زیر است:

$$v_{out}(t) = Re(V_{out} e^{j\omega t})$$

به طوری که:

$$V_{out} = \frac{Z_۲}{Z_۱ + Z_۲} V_{in}$$

۵-۱-۸- فیلتر پایین گذر

فیلتر پایین گذر فیلتری است که فرکانس‌های پایین را عبور
می‌دهد. شکل زیر دو فیلتر RC و RL پایین گذر را نشان می‌دهد:

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

$$V_i = \left(R + \frac{1}{j\omega C}\right) I$$

$$V_o = \left(\frac{1}{j\omega C}\right) I$$

$$\Longrightarrow A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 + j\omega RC} |A_v| \angle \varphi^\circ$$

که در آن:

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

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

رابطه‌ی نخست نشان می‌دهد که در فرکانس‌های پایین، وقتی که $\omega RC \ll 1$ است $|\frac{V_o}{V_i}| \approx 1$ خواهد بود.
هم‌چنین در فرکانس‌های بالا وقتی که $\omega RC \gg 1$ می‌باشد $|\frac{V_o}{V_i}| \approx 0$ است. بدین ترتیب مدار RC فوق ولتاژهایی با فرکانس پایین را از خود عبور می‌دهد و ولتاژهای با فرکانس‌های بالا را به شدت تضعیف می‌کند.

خاصیت دیگر این مدار اختلاف فازی است که بین ولتاژ خروجی و ولتاژ ورودی ایجاد می‌نماید به‌طوری‌که از رابطه‌ی دوم برمی‌آید در فرکانس‌های پایین $\Phi \approx 0$ بوده و در فرکانس‌های بالا $\Phi \approx -90$ خواهد بود.

فرکانس قطع یا فرکانس نصف قدرت که با f_c نمایش داده می‌شود، فرکانسی است که در آن فیلتر پایین گذر در آن فرکانس‌های بالاتر از آن را به‌شدت تضعیف می‌کند. در این فرکانس اندازه‌ی توان خروجی به نصف ماکزیمم

توان خروجی می‌رسد؛ از طرفی طبق رابطه‌ی $P = \frac{V^2}{R}$ توان با مجذور ولتاژ متناسب است. درنتیجه در این حالت ولتاژ خروجی به‌اندازه‌ی $\frac{1}{\sqrt{2}}$ ولتاژ ورودی در فرکانس عبور کاهش می‌یابد. بنابراین فرکانس قطع برابر است با:

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

۹-۱-۵- فیلتر بالا گذر

فیلتر بالا گذر فیلتری است که فرکانس‌های بالا را
عبور می‌دهد و از عبور فرکانس‌های پایین جلوگیری به عمل می‌آورد. اگر جای عناصر یک فیلتر پایین گذر را عوض کنیم فیلتر بالا گذر به دست می‌آید. شکل ۵-۸ دو فیلتر RC و RL بالا گذر را نشان می‌دهد:

اکنون مدار RC شکل بالا را در نظر می‌گیریم. تابع پاسخ
فرکانسی برای این مدار عبارت است از:

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

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

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

در فرکانس‌های بالا وقتی که $\omega RC \gg 1$ باشد $\Phi \approx 0$ و $\left|\frac{V_o}{V_i}\right| \approx 1$ است و وقتی که $\omega RC \ll 1$ باشد $\Phi \approx 90$ و $\left|\frac{V_o}{V_i}\right| \approx 0$ است. به‌این‌ترتیب مدار RC فوق ولتاژهای با فرکانس‌های بالا را از خود عبور می‌دهد و ولتاژهای با فرکانس پایین را به‌شدت تضعیف می‌نماید.

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

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

۱۰-۱-۵- تعیین اختلاف فاز با استفاده از اسیلوسکوپ

اگر بخواهیم اختلاف‌فاز بین $V_۱ = \mathbf{a}\sin(\omega t + \phi)$ و $V_۲ = b\sin(\omega t)$را به دست بیاوریم منبع $V_۱$را به کانال ۱ اسیلوسکوپ و $V_۲$را به کانال ۲ آن اعمال می‌کنیم و سلکتورهای time/div و volt/div را طوری تنظیم می‌کنیم که یک دوره تناوب از هر یک از موج‌ها روی اسیلوسکوپ نمایان باشد. سپس زمان تأخیر یا تقدمی که بین این دو موج وجود دارد را با استفاده از سلکتور time/div اندازه گرفته و آن را Δtمی‌نامیم (شکل ۵-۹) و به کمک رابطه‌ی زیر اختلاف فاز حساب می‌شود.

$$\phi = ۲\pi\frac{\Delta t}{t}$$

۱۱-۱-۵- تعیین اختلاف فاز به کمک منحنی‌های لیساژوس

در این روش برای تعیین اختلاف فاز بین $V_۱ = \mathbf{a}\sin(\omega t + \phi)$ و $V_۲ = b\sin(\omega t)$، سلکتور time/div را در وضعیت X/Y قرار می‌دهیم و کانال ۱ اسیلوسکوپ را به منبع $V_۱$و کانال ۲ را به $V_۲$وصل می‌کنیم. بدین ترتیب نقطه‌ی نورانی روی صفحه‌ی اسیلوسکوپ پدیدار می‌شود. اگر قبل از وارد ساختن سیگنال‌ها نقطه‌ی نورانی را در مرکز صفحه قرار دهیم بعد از اعمال ولتاژهای $V_۱$و $V_۲$مکان نقطه‌ی نورانی یک بیضی خواهد بود که مرکز آن در وسط صفحه است. حال اختلاف فاز یعنی Φبا توجه به شکل ۵-۱۰ از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$\phi = sin^{-1}\frac{X_{.}}{X_{max}}$$

منحنی‌های لیساژوس وقتی به دست می‌آیند که ولتاژهای اعمال‌شده به تقویت‌کننده‌های افقی و عمودی اسیلوسکوپ هردو سینوسی و رابطه‌ی هارمونیکی با یکدیگر داشته باشند. در شکل زیر منحنی‌های لیساژوس را با اختلاف فازهای مختلف مشاهده می‌کنید.

۲-۵- دستور کار

۱- پاسخ مدارهای RC در حوزه‌ی زمان

مدار شکل ۵-۱۲ را یک مدار RC بالا گذر می‌گویند. در این مدار $C = ۰۰۳۳\mu\text{F}$ ،$R = ۱k\Omega$و به‌عنوان منبع تغذیه از یک ولتاژ ۵ ولت DC استفاده کنید. برای سادگی مدار را به حالت شناور قرار دهید به این معنا که لازم نیست نقطه‌ای از مدار را زمین قرار دهید و برای تعیین ولتاژ هر عنصری از مدار، پروب‌های اسکوپ (که یکی از آن‌ها زمین است) را دو سر آن قرار دهید.

الف- مقدار عددی ثابت زمانی مدار را به دست آورید.

ب- پس از مشاهده‌ی پاسخ گذرای خروجی در اسیلوسکوپ، شکل موج خروجی را به حالت single shot تبدیل کنید. (برای انجام این کار باید اسیلوسکوپ را تریگر کنید بعد از آن خازن را با اتصال کوتاه دو سر آن دشارژ کنید.)

پ- فرم تابعی و ثابت زمانی مدار را روی اسیلوسکوپ راستی آزمایی کنید. نشان دهید که ولتاژ بعد از ثابت زمانی ٪۶۳/۲ ولتاژ ورودی است. برای ارزیابی فرم تابعی به‌گونه‌ای عمل کنید که شکل موج مورد انتظارتان به یک خط مستقیم تبدیل شود برای این کار اگر $v(t)$به‌صورت زیر باشد:

$$v = Ae^{-t/\tau}$$

آنگاه

$$\ln A = \ln A - t/\tau$$

معادله‌ی بالا داده‌ها را با استفاده از یک راه "طبیعی" بیان می‌کند. راهی برای نمایش داده‌ها پیدا کنید که داده‌ها با یک خط صاف با شیب $-1/\tau$ تغییر کنند.

ت- تابع ورودی مدار شما یک تابع پله است که با بستن کلید روشن می‌شود. هنگامی‌که به دنبال پیدا کردن پاسخ مدارهای RC هستیم در مورد زمان‌هایی صحبت می‌کنیم که در مقایسه با ثابت زمانی کوتاه یا بلند هستند.

مشتق تابع پله چگونه نمایش داده می‌شود؟

کدام قسمت(های) شکل موج خروجی از مشتق سیگنال ورودی تقلید می‌کند؟ آیا این موضوع با معادلات بالا مطابقت دارد؟

ولتاژ دو سر خازن

ث- در مدار بالا جای R و C را عوض کنید. به این مدار، مدار RC پایین گذر گفته می‌شود. پاسخ گذرای دو سر C را اندازه‌گیری کنید.

د- نمودار ولتاژ دو سر خازن برحسب تابعی از زمان را به‌طور مناسب رسم کنید. توجه کنید که نمودار ولتاژ دو سر خازن به‌طور کامل نمایی نیست. بنابراین گرفتن ln از داده‌ها یک شکل خطی از آن‌ها را به شما نمی‌دهد. به این موضوع فکر کنید که علاوه برگرفتن ln چه تغییر کوچکی در داده‌هایتان باید اعمال کنید.

ذ- مشابه قسمت بالا در زمان‌هایی که در مقایسه با ثابت زمانی کوتاه یا بلند هستند:

انتگرال تابع پله چگونه نمایش داده می‌شود؟

کدام قسمت(های) شکل موج خروجی از انتگرال سیگنال ورودی تقلید می‌کند؟ (راهنمایی: به τفکر کنید.)

۲- پاسخ مدارهای RL در حوزه‌ی زمان

مدار شکل ۵-۱۳ یک مدار RL پایین گذر است. سلف‌های واقعی یک پیچیدگی کوچک دارند: آن‌ها یک مقاومت داخلی R_Lدارند که به‌صورت کلی قابل چشم‌پوشی نیست. بنابراین معادله‌ی به دست آوردن $v(t)$ به‌صورت زیر می‌شود:

$$v(t) = \left[L\frac{di}{dt} + iR_L\right] + iR$$

مقاومت داخلی سلف‌ها معمولاً داخل شکل مدارها نشان داده نمی‌شود اما همیشه باید درنظرگرفته شود. برای مثال

شما نمی‌توانید مستقیماً ولتاژ دو سر سلف را به‌تنهایی اندازه‌گیری کنید. ولتاژ ظاهری‌ای که از دو سر سلف می‌خوانید ولتاژ L و R_L به‌صورت سری است. درواقع R_L مقاومت DC سیم‌های پیچیده شده‌ی سلف است.

الف- مقاومت ظاهری و اندوکتانس سلف را با استفاده از اهم‌متر و مولتی‌متر اندازه‌گیری کنید.

ب- مدار شکل ۵-۸ را ببندید. از یک مقاومت سری R در شکل ۵-۸) که مقدارش قابل مقایسه با مقدار R_L باشد استفاده کنید.

پ- فرم تابعی و ثابت زمانی ولتاژ دو سر R را مشابه با آنچه برای مدار RC انجام دادید اندازه‌گیری کنید. همچنین مقدار نهایی ولتاژ دو سر R را ذکر کنید.

مقدار اولیه و نهایی ولتاژ دو سر L چقدر است؟

ت- R_L چیست؟ برای پیدا کردن R_L به‌صورت تئوری حداقل دو راه وجود دارد: از طریق ثابت زمانی و از ولتاژ نهایی دو سر R. آیا این دو مقدار با یکدیگر مطابقت دارند؟ آیا این مقادیر با مقدار اندازه‌گیری‌شده با اهم متر مطابقت دارند؟

۳- پاسخ مدارهای RL و RC در حوزه‌ی فرکانس

فیلتر RC پایین گذر شکل ۵-۷ را با مشخصات $C = ۰.۰۰۰۸\mu\text{F}$ ، $R = ۲۲k\Omega$ و یک منبع تغذیه‌ی سینوسی با دامنه‌ی ۵ ولت ببندید.

الف- فرکانس قطع مدار را برحسب هرتز به دست آورید.

ب- برای هردو پیکربندی مشتق‌گیر و انتگرال‌گیر V_i و V_o را در محدوده‌ی فرکانسی $f_c \mp ۱۰Hz$ اندازه‌گیری کنید. در یک پیکربندی V_o ولتاژ دو سر R و در پیکربندی دیگر V_o ولتاژ دو سر C است.

پ- در فرکانس‌های ۵، ۲۰، ۵۰، ۱۵۰، ۳۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ هرتز ولتاژ خروجی را اندازه‌گیری کنید و اختلاف فاز بین موج ورودی و خروجی را به دو روشی که گفته شد از روی اسیلوسکوپ و رابطه‌ی تعیین اختلاف فاز و به کمک منحنی‌های لیساژوس بیابید. همچنین منحنی تغییرات V_o برحسب فرکانس را رسم کنید.

ت- آیا حتماً باید از حالت ورودی AC coupling اسکوپ برای اندازه‌گیری استفاده کنید؟

ث- فرکانسی که در آن $|V_C(f)| = |V_R(f)|$ می‌شود را به دست آورید. مقدار اندازه‌گیری شده را با مقدار محاسبه‌شده مقایسه کنید.

د- ۵ قسمت قبل را برای فیلتر RL پایین گذر شکل ۵-۷ تکرار کنید. برای R از یک مقاومت ۲/۲ اهمی استفاده کنید و L و R_L را اندازه‌گیری کنید.

ذ- کدام مدار، RL یا RC، عملکرد بهتری به‌عنوان فیلتر پایین گذر دارد؟ چرا؟

آزمایش ششم: مدارهای RLC

۱-۶- پیش‌آگاهی

۱-۱-۶- معادلات حاکم بر مدارهایRLC

در این آزمایش ادامه‌ی آزمایش‌های مربوط به عناصر ذخیره کننده‌ی انرژی را دنبال می‌کنیم.

پاسخ طبیعی مدارهای RLC به‌وسیله‌ی آزاد شدن انرژی از المان‌های خازن یا سلف یا هر دو می‌باشد.

این انرژی آزادشده درنتیجه‌ی تغییر ناگهانی میزان جریان یا ولتاژ در مدار می‌باشد.پاسخ پله‌ی مدارRLC زمانی ایجاد می‌شود که سلف یا خازن یا هردوی آن‌ها به‌طور ناگهانی ولتاژ یا جریان به آن‌ها اعمال شود. توصیف کردن این ولتاژها و جریان‌ها در مدارهایRLC توسط معادلات دیفرانسیل درجه‌ی ۲ انجام می‌شود. با اعمال قانون KVL به یک مدار RLC سری می‌توان معادله‌ی زیر را به‌دست آورد:

$$\frac{d_i^2}{d_t^2} + \frac{R}{L} \times \frac{d_i}{d_t} + \frac{i_t}{C \times L} = \frac{d_{Vi}}{dt}$$

هم‌چنین در مدار RLC موازی با اعمال قانون KCL نیز می‌توان فرمول زیر را به‌دست آورد:

$$\frac{d_{Vo}^2}{d_t^2} + \frac{R}{L} \times \frac{d_{Vo}}{d_t} + \frac{Vo_t}{C \times L} = \frac{d_{Vi}}{dt}$$

سؤال: نحوه‌ی به‌دست آوردن فرمول‌های بالا را به‌طور کامل در پیش گزارش خود بیان کنید.

در اینجا دو متغیر اساسی را بیان می‌کنیم:

در مدار موازی داریم:

$$\alpha = \frac{R}{۲ \times L}$$

در مدار سری داریم:

$$\alpha = \frac{۱}{۲ \times R \times C}$$

به α ضریب میرایی(damping) می‌گویند.

$$\omega_{۰} = \frac{۱}{\sqrt{L \times C}}$$

به $\omega_{۰}$فرکانس تشدید می‌گویند.

پاسخ مدار (معادله‌ی دیفرانسیل) به ورودی پله به‌صورت زیر می‌باشد:

$$s^{۲} + ۲ \times \alpha \times s + \omega_{۰}^{۲} = ۰$$

که ریشه‌های آن به‌صورت زیر می‌باشند:

$$s_{۱,۲} = \alpha \pm \sqrt{(\alpha^{۲} - \omega_{۰}^{۲})}$$

حال ۳ حالت over damped, critical damped, under damped را بررسی می‌کنیم:

۱- اگر عبارت زیر رادیکال مثبت شود حالت over damped رخ‌داده است.

۲- اگر عبارت زیر رادیکال صفر شود حالت critical damp رخ‌داده است.

۳- اگر عبارت زیر رادیکال منفی شود حالت under damped رخ‌داده است.

۲-۱-۶- حالت میرایی شدید (over damped)

در این حالت مقدار ضریب میرایی از فرکانس تشدید بزرگ‌تر می‌باشد و معادله ۲ ریشه‌ی حقیقی دارد.

$$I = A_{۱} \times e^{s_{۱}t} + A_{۲} \times e^{s_{۲}t}$$

در این حالت ۲ ریشه‌ی حقیقی منفی داریم. پاسخ مدار به ورودی پله‌ی واحد به‌صورت زیر می‌باشد:

۱

شکل ۶-۳: میرایی شدید

t

۳-۱-۶- حالت میرایی بحرانی (critical damped)

در این حالت مقدار ضریب میرایی با فرکانس تشدید برابر می‌باشد و معادله یک ریشه‌ی مضاعف حقیقی دارد.

$$I = A_1 \times e^{s_1 t} + A_2 \times t \times e^{s_2 t}$$

در این حالت خروجی سریع‌تر از حالت قبلی به ماکسیمم می‌رسد و پاسخ مدار به ورودی پله‌ی واحد به‌صورت زیر می‌باشد:

vo

۱

شکل ۶-۴: میرایی بحرانی

t

۴-۱-۶- حالت میرایی کم (under damped)

در این حالت مقدار ضریب میرایی از فرکانس تشدید کمتر می‌باشد و معادله دو ریشه‌ی مختلط و مزدوج دارد.

$$I = A \times e^{-\alpha t} \times (B \times \cos \omega t + C \times \sin \omega t)$$

به مقدار $\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$ فرکانس میرای طبیعی مدار گفته می‌شود و ریشه‌های معادله‌ی این حالت برابر است با:

$$s_1, s_2 = -\alpha j \times \omega_d$$

تمرین: رابطه‌های ولتاژ خروجی را برای هر ۳ حالت بالا به دست آورید.

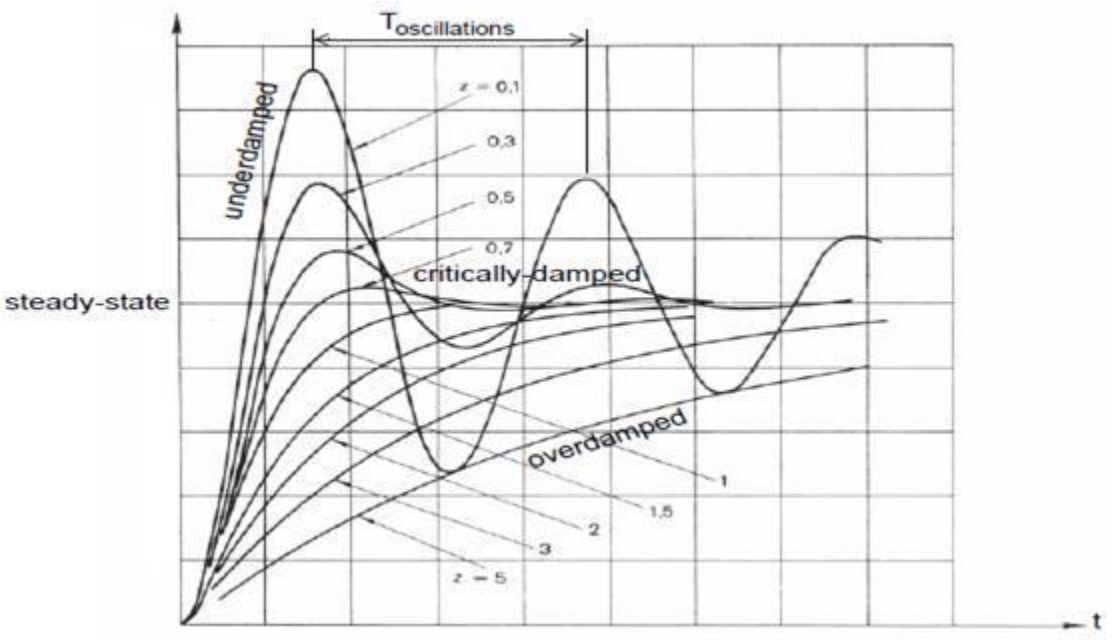
تمرین: پاسخ مدار در حالت میرایی کم را رسم کرده و پارامترهای نمودار را توضیح دهید.

مقدار نهایی ولتاژ خروجی برابر یک می‌باشد و مقدار α است که زمان رسیدن به مقدار نهایی را تعیین می‌کند.

به اولین دامنه‌ی ماکزیمم در پاسخ این مدار M_p گفته می‌شود و مقدار آن برابر است با: $M_p = 1 + e^{-\frac{\alpha}{\omega_d} \times \pi}$

مقدار زمان بین دو قله‌ی ماکزیمم نیز دوره‌ی نوسانات T_d نامیده می‌شود.

در شکل ۶-۵ نمودارهای ۳ حالت مختلف میرایی نمایش داده‌شده است.



شکل۶-۵: نمودارهای میرایی

۶-۱-۵- امپدانس در مدارهای RLC سری

راکتانس در مدارهای RLC سری به‌طورکلی به‌صورت زیر می‌باشد:

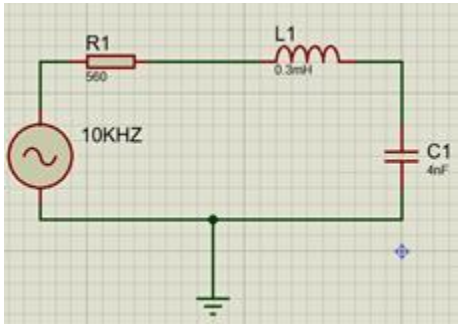
$$X_{total} = |X_l - X_c|$$

امپدانس در مدارهای RLC سری به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$Z = R + j \times X_l - j \times X_c$$

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\sqrt{X_l - X_c}\right)^2} < \tan^{-1}\left(\frac{X_{total}}{R}\right)$$

تمرین: امپدانس مدار شکل زیر را به دست آورید.



شکل۶-۶: شکل تمرین

اگر $X_l = X_c$ شود حالت تشدید سری ایجاد می‌گردد. در این حالت امپدانس کل کم‌ترین مقدار را دارا می‌باشد.

در این حالت مدار کاملاً مقاومتی شده و ولتاژ خازن و سلف نیز با یکدیگر برابر و در فازهای مقابل به هم هستند و یکدیگر را خنثی می‌کنند و جریان در این حالت به حداکثر مقدار خود می‌رسد.

فرکانس تشدید به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \times C}}$$

تمرین: برای مدار تمرین قبل فرکانس تشدید را بیابید.

۶-۱-۶- امپدانس در مدارهای RLC موازی

امپدانس در مدارهای RLC موازی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R < 0} + \frac{1}{X_L < 90} + \frac{1}{X_C < -90}$$

در حالت تشدید موازی جریان سلف و جریان خازن با یکدیگر خنثی می‌شوند، به این دلیل این اتفاق می‌افتد که این مقدار جریان با یکدیگر برابرند ولی در جهت مخالف یکدیگر می‌باشند.

فرکانس تشدید به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \times C}}$$

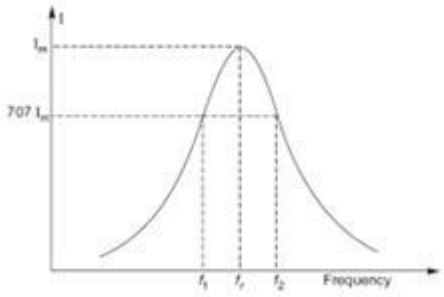
در این حالت امپدانس معادل مدار حداکثر می‌باشد.

۶-۱-۷- امپدانس در مدارهای RLC سری- موازی

برای محاسبات مربوط به این مدارها باید از قوانین مقاومتی و اعداد مختلط استفاده شود.

۶-۱-۸- عرض باند در مدارهای RLC

در مدارهای RLC سری پهنای باند از ۷۰٪ ماکزیمم جریان در حالت بالارونده تا ۷۰٪ در حالت پایین‌رونده می‌باشد. به این دو فرکانس، فرکانس‌های بحرانی می‌گویند.



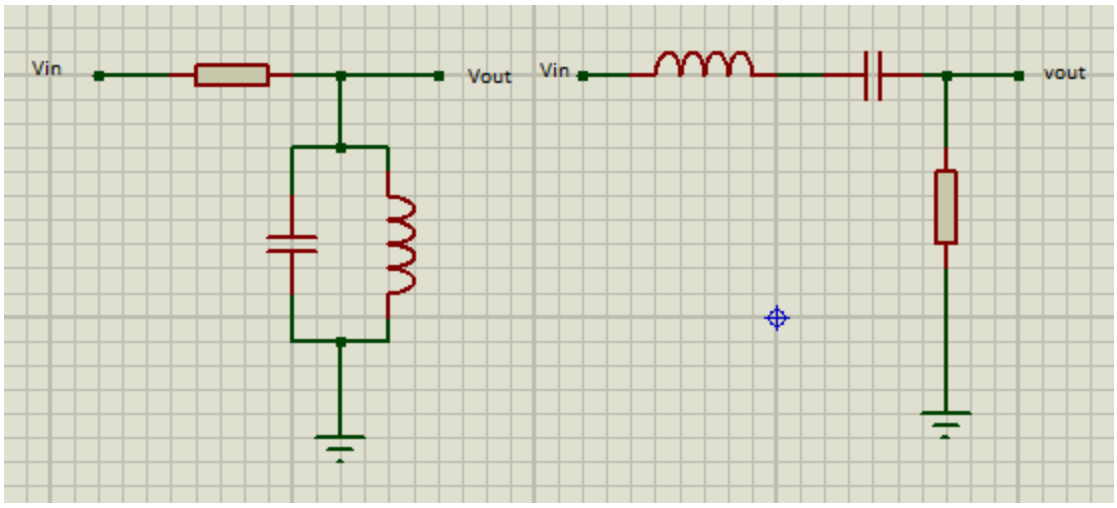
شکل ۶-۷: عرض باند در مدارهای مرتبه دوم

در حالت سری جریان و فرکانس به‌عنوان پارامترها مدنظر هستند ولی در حالت موازی به‌جای پارامتر جریان، از حداکثر امپدانس استفاده می‌شود. (چرا؟؟)

گزینش فرکانسی بیان‌گر این است که یک مدار تشدید چگونه به یک فرکانس خاص پاسخ می‌دهد.

۶-۱-۹- فیلتر باندگذر و فیلتر باندنگذر

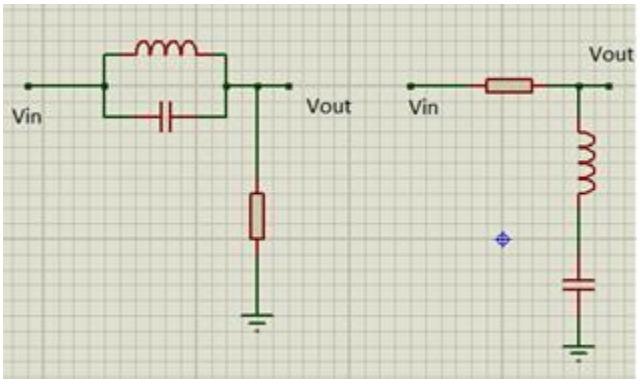
شکل۶-۵ مدارهای فیلتر باند گذر را نشان می‌دهد:



شکل ۶-۸: مدارهای فیلتر باند گذر

این فیلتر باند محدودی از فرکانس را به‌خوبی از خود عبور می‌دهد. همان‌طور که در شکل بالا مشاهده می‌شود می‌توان این فیلتر را به دو صورت بالا ایجاد کرد. در حالت سری در فرکانس تشدید امپدانس کل بسیار کم است و در حالت موازی در فرکانس تشدید امپدانس کل بسیار زیاد می‌باشد. به‌طورکلی در فرکانس‌های متوسط پاسخ مدار به ورودی نزدیک‌تر است.

شکل ۶-۹ مدارهای فیلتر باند نگذر را نشان می‌دهد:

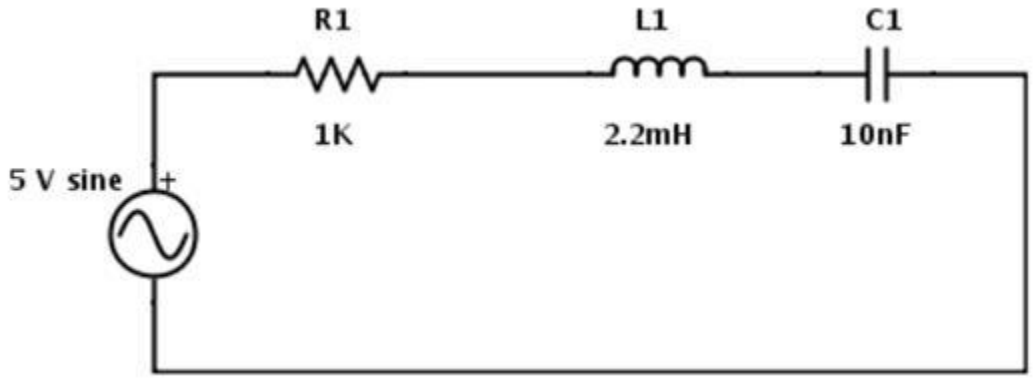


شکل ۶-۹: مدارهای فیلتر باند نگذر

این فیلتر باند معینی از فرکانس را از خود عبور نمی‌دهد و بقیه‌ی فرکانس‌ها را به‌خوبی از خود عبور می‌دهد. در فرکانس تشدید در حالت سری به دلیل کاهش امپدانس خروجی، افت ولتاژ دو سر آن بسیار کم است و در بقیه‌ی فرکانس‌ها چون امپدانس زیاد می‌شود، افت ولتاژ افزایش‌یافته و دامنه‌ی ولتاژ خروجی افزایش می‌یابد.

۲-۶- دستورکار

۱- مداری مطابق شکل مقابل ببندید و با فرکانس ۱ کیلوهرتز محاسبات را آغاز کنید.



شکل ۶- ۱۰: آزمایش اول

در پیش گزارش خود مقدار فرکانس تشدید و حداکثر جریان مدار را محاسبه کنید.

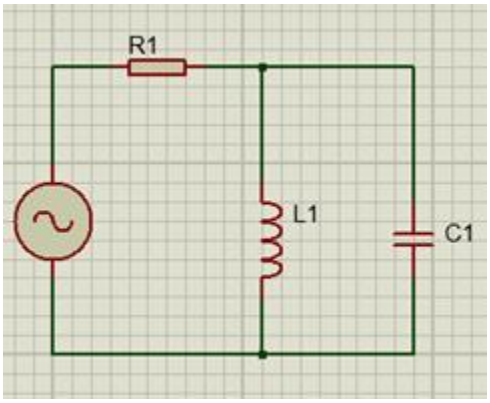
در آزمایشگاه، ولتاژ مقاومت را با استفاده از اسیلوسکوپ بررسی کنید، سپس فرکانس ورودی را افزایش دهید و خروجی را بررسی کنید. سپس فرکانسی که حداکثر دامنه را به شما می‌دهد را مشخص کنید. تأثیر این تغییر را به‌طور کامل شرح دهید.

۲- یک آمپرمتر به‌صورت سری با مدار قرار دهید و در هنگامی‌که حداکثر دامنه را داریم مقدار جریان را به دست آورید. آیا اعداد به‌دست‌آمده با مباحث نظریه مطرح‌شده هماهنگی دارند؟ توضیح مختصری در گزارش کار خود در این رابطه قرار دهید.

۳- یک مدار RLC سری با مقدار سلف ۱۸ میلی هانری و خازن ۳/۳ نانو فاراد و پتانسیومتر ۱۰ کیلو اهم بسازید و ولتاژ پیک تا پیک ۴ولت به‌صورت مربعی به مدار بدهید و خروجی را از خازن مشاهده کنید. (فرکانس را ۱ کیلوهرتز در نظر بگیرید.)

مقاومت را تغییر دهید سه حالت پاسخ گذرای مدار را بررسی کنید و اشکال آن را روی اسیلوسکوپ مشاهده کنید و مقدار مقاومت بحرانی را بیابید. هم‌چنین ثابت زمانی و ضریب میرایی مدار را در حالت میرایی بحرانی را اندازه بگیرید.

۴- مداری مطابق شکل زیر ببندید. از اعداد قسمت ۳ استفاده کنید. از پتانسیومتر ۱۰ کیلو استفاده کنید.



شکل ۶-۱۱

یک موج سینوسی با دامنه‌ی ۲ ولت به مدار بدهید و با تغییر دادن فرکانس آن نوع فیلتر را مشخص کنید. سپس ماکزیمم ولتاژی که در خروجی ظاهر می‌شود را مشخص کنید. فرکانس آن را به دست آورید. (از دو سر خازن)

در هر شاخه‌ی سلف و خازن یک مقاومت کوچک (حدود ۱۰ اهم) قرار دهید و جریان هر شاخه را محاسبه کنید. (از قانون اهم استفاده کنید) سپس جریان مدار را به دست آورید و با اعداد به‌دست‌آمده مقایسه کنید.

۵- مدار مرتبه دوم سری با خازن ۰/۱ میکرو فاراد و سلف ۲۵ میلی هانری و مقاومت ۲۲۰ اهم ببندید. فرکانس تشدید را پیش‌بینی کنید.

ورودی سینوسی با ۸ ولت پیک تا پیک به مدار اعمال کنید. جدول زیر را تکمیل کنید.

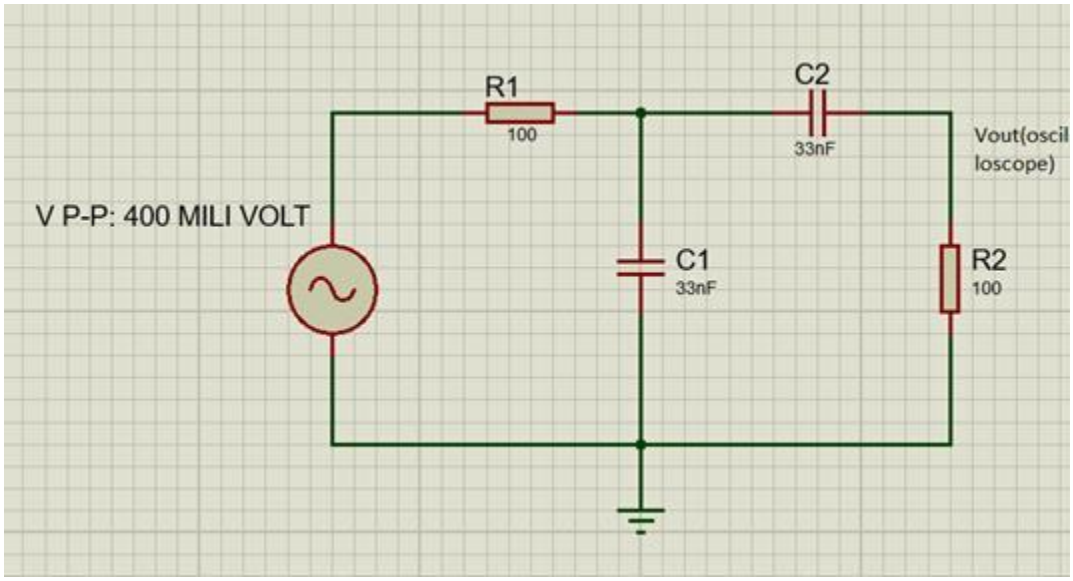
Frequency(HZ)	$V_L(p-p)$	$V_C(p-p)$	$V_R(p-p)$	$I_{p-p}=\frac{V_{R(p-p)}}{R}$	$Z_T=\frac{V_{p-p}}{I_{p-p}}$
500					
1000					
1500					
2000					
2500					
3000					

3500					
4000					
4500					
5000					
5500					

ابتدا ولتاژ پیک تا پیک سلف را محاسبه کنید. سپس منبع را خاموش کرده و جای سلف و خازن را جابه‌جا کنید و ولتاژ پیک تا پیک خازن را محاسبه کنید. سپس مقاومت را به‌جای خازن قرار داده و جدول را تکمیل کنید.

نتیجه‌گیری خود از این آزمایش را در گزارش کار شرح دهید.

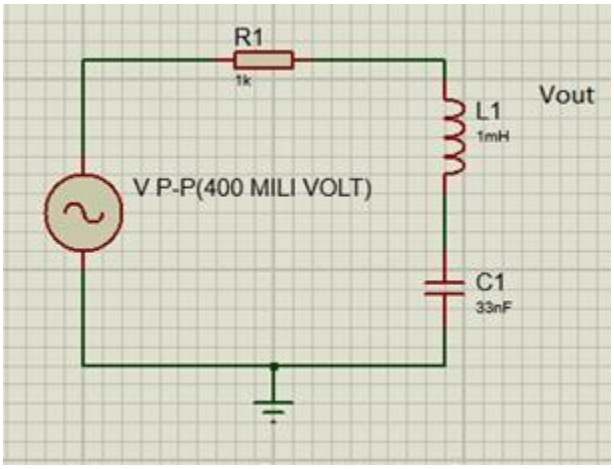
۶- مداری مطابق شکل زیر ببندید و سپس تغییرات V_o را برحسب فرکانس روی کاغذ لگاریتمی رسم کنید. سپس نقاط نیم قدرت را بر روی منحنی معین کنید و پهنای باند عبور را به دست آورید. توجه نمایید که در هنگام انجام آزمایش ولتاژ ورودی ثابت بماند، در تعیین نقاط قدرت، ولتاژ خروجی ماکزیمم را به‌جای V_{in} به‌عنوان ولتاژ مقایسه در نظر بگیرید.



شکل ۶-۱۲: قسمت ۶ آزمایش

F(HZ)	100	200	300	500	1K	2K	5K	10K	20K	50K	100K	150K	200K	250K	300K
Vo															

۷- مداری مطابق شکل زیر ببندید و سپس تغییرات Vo را برحسب فرکانس روی کاغذ لگاریتمی رسم کنید. سپس نقاط نیم قدرت را بر روی منحنی معین کنید و پهنای باند نگذر را به دست آورید. توجه نمایید که در هنگام انجام آزمایش ولتاژ ورودی ثابت بماند.



شکل ۶-۱۳: قسمت ۷ آزمایش

F(HZ)	100	200	300	500	1K	2K	5K	10K	20K	50K	100K	150K	200K	250K	300K
Vo															

آزمایش هفتم: دیودهای نیمه‌هادی

۱-۷- پیش‌آگاهی

در این آزمایش قصد داریم تا با اصول حاکم بر دیودها آشنا شویم. هم‌چنین پارامترهای مربوطه و مطالب مربوط به دیودهای نیمه‌هادی را بررسی کنیم.

۱-۱-۷- نیمه‌هادی‌ها

نیمه‌هادی‌ها گروهی از مواد هستند که از نظر توانایی هدایت الکتریکی، بین هادی و عایق قرار دارند. هدایت این مواد تحت تأثیر عواملی چون افزایش دما، تحریک نوری و تغییر میزان ناخالصی به نحو قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌کند.

هدایت الکتریکی در نیمه‌هادی‌ها توسط دو نوع حامل بار الکتریکی یعنی الکترون‌های آزاد و حفره‌ها صورت می‌گیرد. در این مواد الکترون‌های ظرفیت نمی‌توانند آزادانه به هر سو حرکت کنند، بلکه در پیوندهای کووالان بین اتم‌ها محصورند. مهم‌ترین این نیمه‌هادی‌ها در الکترونیک سیلیکن و ژرمانیم هستند. این دو عنصر علی رغم داشتن ۴ الکترون ظرفیت، در دمای معمولی از هدایت الکتریکی خوبی برخوردار نیستند. در دمای صفر مطلق این مواد مانند مواد عایق عمل می‌کنند.

نحوه‌ی حرکت حفره‌ها و شرکت آن‌ها در جریان الکتریکی در نیمه‌هادی به این صورت است که وقتی با رها شدن یک الکترون آزاد از یک پیوند کووالان یک حفره بر جای ماند، یک الکترون ظرفیت از یک پیوند مجاور می‌تواند به‌آسانی پیوند خود را شکسته و حفره‌ی قبلی را پر نماید. با این کار حفره‌ی جدیدی به وجود می‌آید که محل آن با

محل حفره‌ی قبلی متفاوت است. به‌عبارت‌دیگر یک جابه‌جایی حفره صورت گرفته است که جهت آن در خلاف جهت انتقال الکترون بوده است.

برای بالا بردن چگالی حامل‌های آزاد در نیمه‌هادی‌ها، می‌توان با تزریق درصد ناچیزی از یک عنصر ۳ یا ۵ ظرفیتی به بلور، آن را تغلیظ نمود. اگر به ژرمانیوم که ظرفیت ۴ دارد یک ناخالصی مثل فسفر که ۵ اتم ظرفیت دارد اضافه کنیم، هر اتم فسفر در درون شبکه ۴ الکترون خود را با چهار الکترون مربوط به چهار اتم ژرمانیوم به اشتراک می‌گذارد، لذا یک الکترون آزاد تنها در اختیار یک اتم باقی می‌ماند. همین الکترون‌های اضافی آزاد هستند که هدایت در نیمه‌هادی‌ها را تشدید می‌کنند. به این نیمه‌هادی‌ها نیمه‌هادی نوع n گفته می‌شود. حال اگر به‌جای اتم‌های ۵ ظرفیتی از اتم‌های ۳ ظرفیتی مانند گالیم استفاده کنیم، هر اتم گالیم ۳ الکترون با ۳ الکترون از اتم‌های ژرمانیم مجاور با اشتراک می‌گذارد و کمبود یک الکترون در مجاورت اتم گالیم تولید حفره می‌کند. این حفره‌ها عامل افزایش هدایت هستند. به این نیمه‌هادی‌ها نیمه‌هادی نوع p گفته می‌شود.

در نیم‌رساناهای نوع n الکترون‌های آزاد حامل‌های اکثریت و به حفره‌ها حامل‌های اقلیت می‌گویند. در نیم‌رساناهای نوع p حفره‌ها حامل‌های اکثریت و به الکترون‌های آزاد حامل‌های اقلیت می‌گویند.

وقتی‌که دو ماده‌ی p و n را به یکدیگر متصل کنیم، یک اتصال یا پیوند p-n ایجاد می‌شود. در موقعی که اتم‌های ناخالصی طرف n الکترون از دست بدهند تبدیل به یون مثبت می‌شوند و این یون‌ها را با علامت + نشان داده‌ایم. همین‌طور اتم‌های ناخالصی طرف p با قبول الکترون تبدیل به یون منفی می‌شوند و با علامت – نمایش می‌دهیم. چون در یک طرف این اتصال تعدادی از حفره داریم، لذا الکترون‌ها از طرف n به داخل pمنتقل می‌شود و بالعکس.

پس در طرف n تجمعی از یون مثبت و در طرف p تجمعی از یون‌های منفی داریم. در حوالی این اتصال الکترون‌ها و حفره‌ها با هم ترکیب می‌شوند لذا در این اتصال بار متحرک نداریم. این ناحیه، ناحیه‌ی تخلیه یا ناحیه‌ی گذر است که پهنای کمی دارد. در یک طرف این ناحیه پتانسیل مثبت و در طرف دیگر پتانسیل منفی است. این پتانسیل مثل یک منبع ولتاژ عمل می‌کند و باعث عبور حامل‌ها به دو طرف می‌شود ولی از آن‌جایی که دیود باز است باید کل جریان مدار صفر باشد یعنی باید جریان ناشی از این منبع پتانسیل با جریان‌های ناشی از دیفیوزن الکترون و حفره‌ها یکی باشد تا دیود در حالت متعادل باشد.

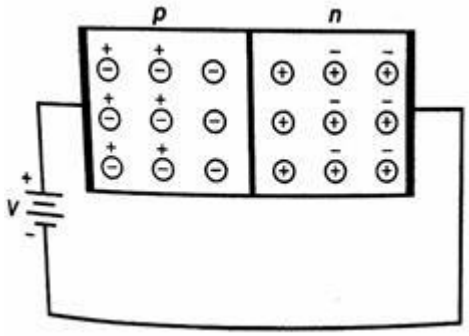
۲-۱-۷- بایاس پیشرو

در شکل ۷-۱ یک منبع ولتاژ dc به دو سر یک دیود متصل شده است. سر منفی منبع تغذیه به ماده‌ی نوع n و سر مثبت آن به ماده‌ی نوع p متصل شده است. به این نوع اتصال بایاس مستقیم می‌گویند.

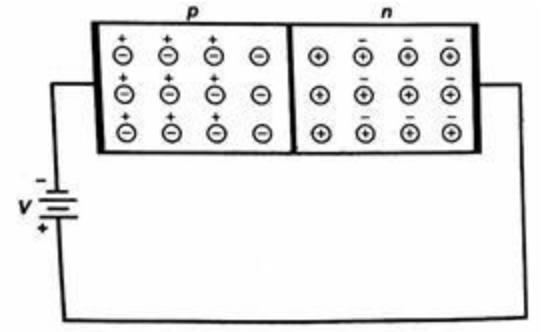
در شکل ۷-۱ باتری، حفره‌ها و الکترون‌های آزاد را به‌طرف محل اتصال می‌راند. اگر ولتاژ باتری از پتانسیل سد کمتر باشد (پتانسیل سد چیست؟ به طور خلاصه در پیش گزارش شرح دهید.) الکترون‌های آزاد انرژی کافی نداشته و نمی‌توانند از لایه‌ی تهی عبور نمایند. در این حالت وقتی الکترون‌های آزاد وارد لایه‌ی تهی شوند، یون‌های آن‌ها را به ناحیه‌ی n بر می‌گرداند. به همین علت هیچ جریانی در داخل دیود وجود نخواهد داشت.

وقتی ولتاژ منبع بیش از پتانسیل سد باشد، باتری مجدداً حفره‌ها و الکترون‌های آزاد را به طرف محل اتصال می‌راند. این بار الکترون‌های آزاد دارای انرژی کافی هستند تا بتوانند از لایه‌ی تهی عبور کنند و با حفره‌ها ترکیب شوند. اگر فرض کنیم تمام حفره‌ها در ناحیه‌ی p به طرف راست و تمام الکترون‌های آزاد به طرف چپ حرکت می‌کنند، آن‌گاه ایده‌ی اصلی را فهمیده‌ایم. در نزدیکی محل اتصال بارهای مخالف ترکیب مجدد انجام می‌دهند. از آن‌جا که الکترون‌های آزاد مرتباً از طرف راست دیود وارد شده و حفره‌ها مرتباً در سمت چپ در حال تشکیل می‌باشند، یک جریان پیوسته در داخل دیود برقرار می‌شود.

به‌طور خلاصه باید این را در نظر داشته باشیم که تا زمانی که ولتاژ اعمال شده بیشتر از سد پتانسیل است، جریان زیادی در مدار برقرار است. به‌عبارت‌دیگر اگر ولتاژ منبع بیش از ۰/۷ ولت باشد، جریان پیوسته‌ای در دیود در بایاس مستقیم برقرار می‌شود.



شکل ۷-۱

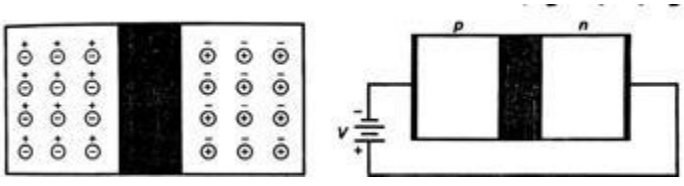


شکل ۷-۲

۳-۱-۷- بایاس معکوس

در شکل۷-۲ سر منفی به طرف p و سر مثبت آن به لایه n متصل شده است. این نوع اتصال را بایاس معکوس می‌گویند.

سر منفی باتری، حفره‌ها و سر مثبت آن الکترون‌های آزاد را جذب می‌کنند. به این علت، حفره‌ها و الکترون‌های آزاد از محل اتصال دور می‌شوند و لایه‌ی تهی پهن‌تر می‌شود. وقتی حفره‌ها و الکترون‌های آزاد از محل اتصال دور می‌شوند، یون‌های جدیدی تولید می‌شوند و این یون‌ها نیز به نوبه‌ی خود اختلاف پتانسیل دو سر لایه‌ی تهی را افزایش می‌دهند. هرچه لایه‌ی تهی پهن‌تر باشد، اختلاف پتانسیل نیز زیادتر است. افزایش یا پهن‌تر شدن لایه‌ی تهی وقتی متوقف می‌شود که اختلاف پتانسیل دو سر آن مساوی ولتاژ معکوس اعمال شده شود. در شکل ۷-۳ داریم که پهنای ناحیه‌ی هاشور خورده متناسب با ولتاژ معکوس اعمال شده است. با افزایش ولتاژ معکوس، پهنای لایه‌ی تهی افزایش می‌یابد.به‌طور خلاصه باید در نظر داشته باشیم که شدت جریان دیودها در بایاس معکوس تقریباً صفر است. چون مانع خیلی زیادی در مقابل حرکت حامل‌ها وجود دارد، جریانی که از اتصال می‌گذرد خیلی کم است، این جریان موسوم به جریان اشباع معکوس دیود است.



شکل ۷-۳

۴-۱-۷- شکست

دیودها حداکثر تا یک ولتاژ مشخص شده را می‌توانند تحمل کنند. ولتاژ معکوسی که می‌توان در بایاس معکوس به دیود اعمال نمود و دیود شکسته نشود محدود است. چنان‌چه ولتاژ معکوس را افزایش دهیم، نهایتاً به ولتاژ شکست دیود می‌رسیم. وقتی به ولتاژ شکست می‌رسیم، تعداد زیادی از حامل‌های اقلیت به‌طور ناگهانی در لایه‌ی تهی ظاهر می‌شوند و دیود شدیداً هدایت می‌کند.

سؤال: این حامل‌ها از کجا می‌آیند؟

طبق معمول شدت جریان معکوس اندکی به خاطر حامل‌های اقلیت وجود دارد. وقتی ولتاژ معکوس افزایش می‌یابد سبب می‌شود تا حامل‌های اقلیت سریع‌تر حرکت نمایند. این حامل‌ها با اتم‌های بلور برخورد می‌نمایند و وقتی انرژی آن‌ها کافی باشد الکترون‌های مدار ظرفیت را جدا نموده و الکترون‌های آزاد جدیدی تولید می‌کنند. حامل‌های اقلیت جدید تولید شده همراه با حامل‌های اقلیت قبلی با اتم‌های دیگر برخورد می‌نمایند. این فرآیند به‌صورت تصاعد هندسی است زیرا یک الکترون آزاد یک الکترون ظرفیت را آزاد نموده و این گونه دو الکترون آزاد وجود خواهد داشت.این دو الکترون آزاد نیز دو الکترون دیگر را آزاد می‌کنند و این‌چنین ۴ الکترون آزاد می‌شود. این فرآیند ادامه می‌یابد تا جریان معکوس بسیار زیاد و در حد بالایی پدید آید.

ولتاژ شکست دیود به میزان ناخالصی اضافه شده در دیود بستگی دارد. در دیودهای یک‌سوساز ولتاژ شکست معمولاً بالاتر از ۵۰ ولت است.

۵-۱-۷- مشخصه‌ی ولت- آمپر دیود

منحنی تغییرات جریان دیود I برحسب ولتاژ دو سر آن V را مشخصه‌ی ولت آمپر دیود گویند. اثبات می‌شود که جریان دیود I به ولتاژ دو سر V توسط رابطه‌ی زیر مربوط می‌شود:

$$I = I_O \left(E^{V/\gamma V_T} - ۱ \right)$$

مقدار مثبت I حاکی از عبور جریان از طرف p به‌طرف n است و مقدار V حاکی از پیشرو بایاس شدن دیود است.

γ برای دیودهای ژرمانیومی معادل ۱ است و برای دیودهای سیلیکنی برابر ۲ است.

$$V_T = \frac{T}{۱۱۶۰۰} V$$

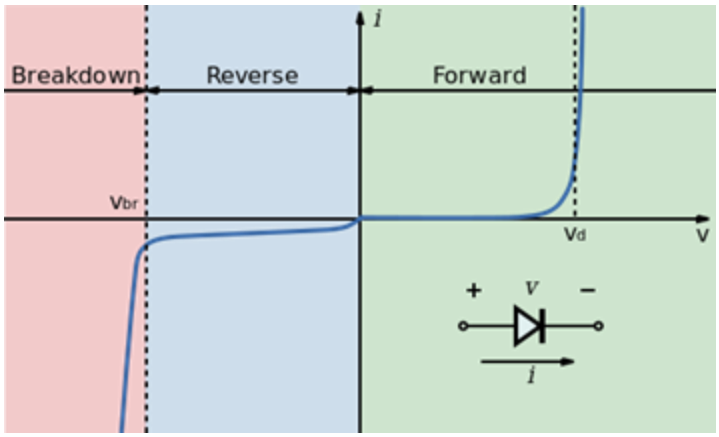
در درجه‌ی حرارت اتاق که $T = ۳۰۰^{\circ K}$، V_T برابر با ۲۶ میلی ولت است.

برای ولتاژهای بایاس مثبت، جریان به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد و برای ولتاژهای بایاس منفی، $I=-I_o$ است، که همان جریان اشباع معکوس از دیود عبور می‌کند. برای بهتر مشخص شدن مشخصه در حالت بایاس پیشرو و معکوس، دو مقیاس اندازه‌گیری برای جریان در نظر می‌گیریم. در حالت بایاس پیشرو جریان در رنج ma است و در حالت بایاس معکوس در رنج μA است. با توجه به اشکال مشاهده می‌شود که در حالت بایاس پیشرو، موقعی که ولتاژ منبع از مقدار معینی تجاوز می‌کند، دیود هدایت می‌کند. این ولتاژ موسوم به ولتاژ آستانه است که برای دیودهای سیلیکنی و ژرمانیومی مقدار متفاوتی دارد. به ازای ولتاژهای بیش از ولتاژ آستانه جریان به‌صورت نمایی زیاد می‌شود. در حالت بایاس معکوس همان‌طور که گفته شد جریان بسیار کم اشباع معکوس از دیود می‌گذرد. با افزایش ولتاژ دیود به ناحیه‌ی شکست می‌رود. این ولتاژ موسوم به ولتاژ شکست است.

همان طور که گفته شد دیود به طور کلی سیلیکنی با ژرمانیومی است. این دو نوع دیود با یک‌دیگر تفاوت‌های ساختاری دارند. یکی از این تفاوت‌های آن‌ها در ولتاژ آستانه‌ی هدایت V_γاست. V_γبرای دیودهای سیلیکنی ۰/۶ و برای دیودهای ژرمانیومی ۰/۲ ولت است. جریان اشباع معکوس دیودهای ژرمانیومی حدوداً ۱۰۰۰ بار بیشتر از جریان اشباع معکوس دیودهای سیلیکنی است. یعنی برای دیودهای ژرمانیومی این جریان در حد میکروآمپر و برای دیودهای سیلیکنی در حد نانوآمپر است.

لازم به تذکر است که وقتی دیود به‌طور پیشرو بایاس می‌شود نباید جریان زیادی از آن بگذرد، زیرا باعث سوختن دیود می‌شود. به همین سبب باید با آن مقاومتی به‌صورت سری قرار داد. و هم‌چنین در حالت بایاس معکوس هم نباید ولتاژ اعمال شده نباید از ولتاژ شکست دیود تجاوز کند چون که جریان زیادی از آن عبور می‌کند و دیود می‌سوزد.

تذکر) دیود در حالت بایاس پیشرو مقاومت کوچکی دارد و در حالت ایده‌آل آن را در نظر نمی‌گیرند. در حالت بایاس معکوس مقاومت آن بسیار زیاد است و در حالت ایده‌آل آن را بی‌نهایت در نظر می‌گیرند.



شکل ۷-۴

۶-۱-۷- مقاومت دیود

چگونه مقاومت حجمی را محاسبه کنیم؟

برای تجزیه و تحلیل دقیق مدار دیود، نیاز به مقاومت حجمی دیود داریم. در دیتاشیت، تولید کنندگان اغلب مقاومت حجمی را به طور جداگانه ذکر نمی‌کنند اما اطلاعات داده شده‌ی آن‌ها برای محاسبه این مقاومت کافی است. مقاومت حجمی توسط رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$R_B = \frac{V_۲ - V_۱}{I_۲ - I_۱}$$

که در آن v1 و I1 ولتاژ و جریان در روی نقطه‌ای بر روی منحنی دیود و بالاتر از ولتاژ زانو، v2 و I2 ولتاژ و جریان در نقطه‌ای بالاتر بر روی منحنی دیود است. (ولتاژ زانو در دیود 1N4001 برابر ۰/۷ است.)

از آن‌جایی که منحنی دیود، جریان دیود برحسب ولتاژ آن است، مقاومت حجمی آن عکس شیب بالاتر از ولتاژ زانو است. هر چه شیب منحنی دیود بیشتر باشد، مقاومت حجمی آن کمتر است. به‌عبارت‌دیگر، هر چه منحنی دیود در بالاتر از زانو به حالت قایم نزدیک‌تر باشد، مقاومت حجمی آن کمتر است.

مقاومت dc دیود

نسبت ولتاژ کل دیود به جریان کل دیود، مقاومت dc دیود است. در بایاس مستقیم مقاومت dc با R_Fو در بایاس معکوس با R_Rنشان داده می‌شود.

مقاومت پیشرو

از آن جایی که دیود یک عنصر غیر خطی است، مقاومت dc آن با جریان آن تغییر می‌کند. توجه داشته باشید که مقاومت dc با افزایش جریان کاهش می‌یابد ولی در هر حال مقاومت مستقیم در مقایسه با مقاومت معکوس کم است.

برای مثال برای دیود 1N914 داریم:

$$R_F = \frac{۰.۶۵}{۱۰mA} = ۶۵\Omega$$

$$R_F = \frac{۰.۷۵}{۳۰mA} = ۲۵\Omega$$

$$R_F = \frac{۰.۸۵}{۵۰mA} = ۱۷\Omega$$

مقاومت معکوس

مشابه آن چه که در بالا گفته شد، برای دیود 1N914 زوج جریان و ولتاژ معکوس وجود دارد:

$$R_R = \frac{۲۰}{۲۵nA} = ۸۰۰M\Omega$$

$$R_F = \frac{۷۵}{۵\mu A} = ۱۵M\Omega$$

توجه کنید که مقاومت معکوس dc با نزدیک شدن به ولتاژ شکست (حدود ۷۵ ولت) کاهش می‌یابد.

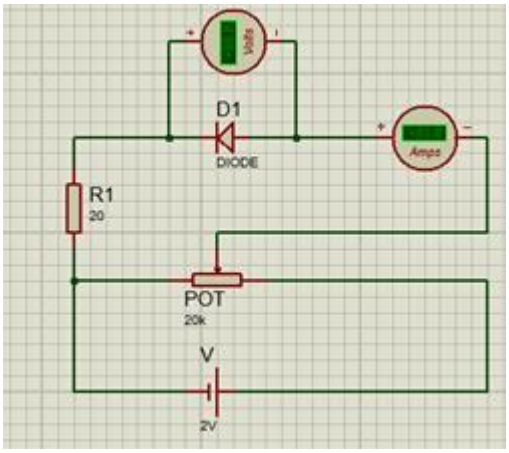
مقایسه‌ی مقاومت dc و مقاومت حجمی

مقاومت dc یک دیود با مقاومت حجمی آن تفاوت دارد. مقاومت dc دیود برابر است با مقاومت حجمی به‌علاوه‌ی اثر پتانسیل سد. به بیان دیگر مقاومت dc یک دیود، تمام مقاومت دیود است در حالی که مقاومت حجمی فقط مقاومت نواحی p و n است و به همین دلیل مقاومت dc دیود همواره بزرگ‌تر از مقاومت حجمی دیود است.

۲-۷- دستور کار

۱- با استفاده از اهم‌متر مقاومت حالت مستقیم و مقاومت حالت معکوس دیودهای 6v2 و 1N4007 را در حالت‌های ۱کیلو اهم و ۱۰ کیلو اهم به‌دست آورید. چگونه می‌توان به این روش نسبت به سالم بودن و غیر سالم بودن این دیودها اطمینان حاصل کرد. چگونه می‌توان آند و کاتد را مشخص کرد.

۲- مداری مطابق شکل پایین ببندید. با تغییر پتانسیومتر ولتاژ دو سر مقاومت و دیود تغییر می‌کند و درنتیجه‌ی این تغییرات جریانی که از آمپرمتر می‌گذرد تغییر می‌کند. با تغییر پتانسیومتر جریان مدار را مشاهده کنید و با توجه به آن ولتاژ دو سر دیود را یادداشت کنید. (ولتاژ ورودی را از ۰ تا ۱۰ ولت تغییر بدهید.)



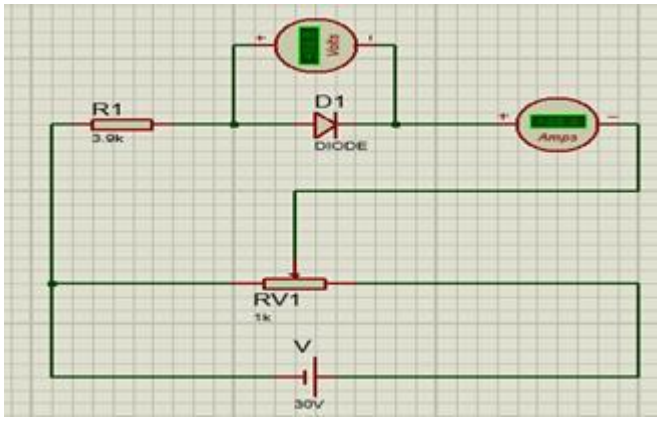
شکل ۷-۵:

I_D (mA)	0	0.05	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	1	3	5	10	20	40
V_D (۱N۴۰۰۷)													

V_D (۲۰.۳ or ۲۰.۷)												

منحنی تغییرات جریان هر دیود را برحسب ولتاژ دو سر آن رسم کنید.

۳- مداری مطابق شکل ببندید. هدف از انجام این آزمایش رسم مشخصه‌ی ولت- آمپر است. با تغییر پتانسیومتر ولتاژهای خواسته شده را به‌دست آورید و سپس هر بار جریان را مشاهده کنید و جدول را تکمیل کنید.



شکل ۷-۶:

V_D	0	0.5	1	3	5	10	15	20	25	30
I_D (µA)										

V_D	0	0.3	0.5	1.5	3	3.5	4	4.5	5
I_D									

توجه کنید که در موقع خواندن جریان مدار، ولت‌متر را باز کنید و مراقب باشید که جریان معکوس دیود از 30ma بیشتر نشود.

منحنی تغییرات جریان هر دیود را برحسب ولتاژ دو سر آن رسم کنید.

ولتاژ شکست دیود را روی نمودار مشخص کنید.

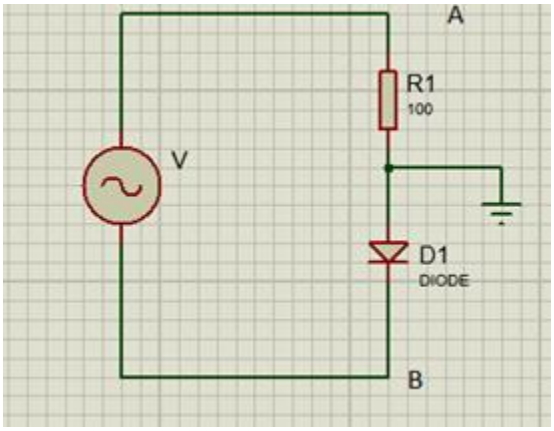
۴- مشاهده‌ی منحنی مشخصه‌ی دیود بر روی اسیلوسکوپ:

مداری مطابق شکل ببندید و نقاط a,b را به دو ورودی اسیلوسکوپ بدهید.

اسیلوسکوپ را در حالت x-y قرار بدهید. نقطه‌ی a بیانگر جریان دیود، و جریان دیود متناظر با جهت ولتاژ دو سر دیود است لذا روی محور دیگر ولتاژ دیود را داریم. در این نقطه باید گفت که چون جریان دیود متناظر با جهت ولتاژ دو سر دیود است لذا ولتاژ این نقطه نسبت به زمین منفی است.

سؤال: چگونه این حالت وارونه را به حالت عادی تبدیل کنیم؟

برای این آزمایش ولتاژ را پیک تا پیک سینوسی ۵ ولت در نظر بگیرید و فرکانس را روی ۳ کیلوهرتز تنظیم کنید. از دیود 1N400x استفاده کنید.



شکل ۷-۷

آزمایش هشتم: کاربرد دیودها و دیود زنر

۸-۱- پیش‌آگاهی

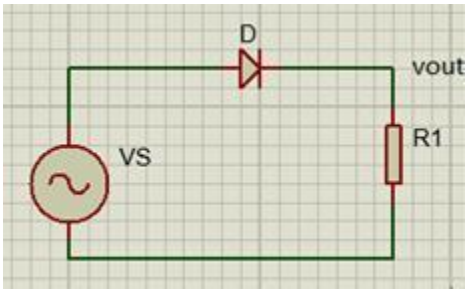
در این آزمایش با یک‌سوسازها و فیلترها و تثبیت‌کننده‌هایی که با دیودها ساخته می‌شوند آشنا می‌شویم و در بخش دوم آزمایش با دیود زنر آشنا می‌شویم.

۸-۱-۱- یک‌سوسازها

این مدارها در دستگاه‌هایی که با برق شهر کار می‌کنند و منبع تغذیه دارند استفاده می‌شوند. آن‌ها ولتاژ متناوب شهر را به ولتاژ DC موردنیاز آن دستگاه‌ها تبدیل می‌کنند. در منابع تغذیه ابتدا به‌وسیله‌ی یک ترانسفورماتور ولتاژ ۲۲۰ ولت به ولتاژ موردنظر تبدیل می‌شود و سپس آن را به‌وسیله‌ی این مدارها یک‌سو می‌کنیم.

۸-۱-۱-۱- یک‌سوساز نیم موج

با استفاده از یک‌سوسازهای نیم موج می‌توان نیم سیکل‌های موردنظر را در خروجی حذف نمود. شکل ۸-۱ یک، یک‌سوساز نیم موج را نشان می‌دهد.



شکل ۸-۱: یک‌سوساز نیم موج

ولتاژ سینوسی ورودی شهر با استفاده از ترانسفورماتور به ولتاژ مناسب تبدیل‌شده و با استفاده از خاصیت دیود یک نیم موج یک‌سو شده در خروجی قابل‌مشاهده است. شکل خروجی در شکل ۸-۲ قابل‌مشاهده است.

شکل ۸-۲: یک‌سوساز نیم موج

$$V_{out} = V_m \sin \omega t \ , i = \frac{V_{out}}{R_1}$$

$$i = \frac{V_m \sin \omega t}{R_1} \ for \ 0 \leq \omega t \leq \pi$$

$$i = 0 \ for \ \pi \leq \omega t \leq 2\pi$$

مقدار جریانDC در خروجی به‌صورت زیر به‌دست می‌آید (ولتاژ هم به همین ترتیب):

$$I_{dc} = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} id(\omega t) = \frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi} \frac{V_m \sin \omega t}{R_1} d(\omega t) + 0 = \frac{1}{2\pi}\frac{V_m}{R_1}[-\cos \omega t]_0^{\pi} = \frac{V_m}{R_1 \pi}$$
$$= \frac{I_m}{\pi}$$

پس می‌توان ولتاژ DC خروجی را تقریباً ۳۲٪ مقدار ماکزیمم ولتاژ ثانویه در نظر گرفت.

۲-۱-۱-۸- یک‌سوساز تمام موج

شکل ۸-۳ یک مدار یک‌سوساز تمام موج را نشان می‌دهد که در اصل از ۲ مدار نیم موج تشکیل‌شده است. در هرکدام از این دو یکی از نیم سیکل‌های ولتاژ سینوسی هدایت می‌شود.

دیود D1 در نیم سیکل مثبت و دیود D2 در نیم سیکل منفی هدایت می‌کند و درنتیجه جریان یک‌سو شده در بار و در هر دو سیکل وجود دارد. درنتیجه به ازای تمام سیکل‌های ولتاژ ورودی، در خروجی ولتاژ سینوسی داریم.

ازآنجایی‌که تعداد سیکل‌های مثبت سیگنال تمام موج دو برابر تعداد سیکل‌های مثبت نیم موج می‌باشد، مقدار DC یا متوسط آن ۲ برابر مقدار نیم موج و برابر ۶۳٪ مقدار ماکزیمم می‌باشد.

تمرین:
یک‌سو کننده‌ی پل را به‌طور کامل شرح دهید.

۲-۱-۸- صافی‌ها

شکل موج ولتاژ خروجی مدارهای یک‌سوساز با شکل موج ورودی تفاوت بسیار زیادی پیداکرده است. درواقع این مدارها از یک ولتاژی که شامل هیچ‌گونه مؤلفه‌ی DC نمی‌باشد، یک ولتاژ همراه با ریپل یا ناصافی ایجاد می‌کند. برای حذف این ناصافی می‌توان از یک صافی خازنی استفاده نمود. شکل ۸-۴ این صافی را همراه با شکل موج ولتاژ و جریان نشان می‌دهد.

با حذف هر چه بیشتر مؤلفه‌ی AC ضریب تموج کمتر شده و خروجی خالص‌تری داریم. از صفر تا رسیدن به قله خازن پر می‌شود و ولتاژ دو سر خازن مانند ورودی دنبال می‌شود (با فرض بزرگ بودن R_lو ایده آل بودن دیود). با کاهش یافتن ولتاژ ورودی ولتاژ دو سر دیود منفی شده و دیود هدایت نمی‌کند. به دلیل بسیار بزرگ بودن R_l، ولتاژ دو سر خازن ثابت می‌ماند و در خروجی یک ولتاژ ثابت DC خواهیم داشت.

برای صافی یک‌سوساز تمام موج نیز می‌توان با موازی کردن یک خازن با مقاومت بار، تغییرات خروجی را تا حد زیادی کاست.

استفاده از صافی یک‌سوساز تمام موج نسبت به صافی یک‌سوساز نیم موج برتری بیشتری دارد و مقدار ولتاژ DC خروجی را صاف‌تر کرده و مؤلفه‌ی AC را بیشتر کاهش می‌دهد. (چرا؟؟)

نحوه‌ی پایین آمدن ولتاژ و قرارگیری قله‌ها به ثابت زمانی خازن بستگی دارد. هر چقدر ثابت زمانی بیشتر باشد، شیب حاصل از ریپل کمتر شده و به DC نزدیک‌تر است.

برای بهتر بودن ولتاژ DC خروجی می‌توان از صافی نوع π و یا L استفاده کرد.

۳-۱-۸- دیود زنر

دیود زنر دیودی است که به‌صورت مستقیم بایاس شود، مانند دیود عادی عمل می‌کند. این دیودها به این دلیل ساخته‌شده‌اند که در ناحیه‌ی شکست نیز کار کنند. ولتاژ شکست این دیودها ولتاژ زنر نامیده می‌شود.

به هنگام وارد شدن به ناحیه‌ی شکست، جریان آن‌ها به‌سرعت افزایش می‌یابد و با استفاده از یک مقاومت باید آن جریان را کنترل کرد. ولتاژ دو سر دیود در این حالت ثابت می‌ماند.

مقدار ولتاژ شکست در این نوع دیود به میزان چگالی ناخالصی آن بستگی دارد.

چون این نوع دیود به خاطر ویژگی‌اش معکوس بایاس می‌شود، کاتد آن به قطب مثبت منبع ولتاژ و آند آن به قطب منفی وصل می‌شود. در این صورت جهت جریان از کاتد به آند خواهد بود. پس مشخصه‌ی دیود زنر در حالت بایاس مستقیم مشابه دیودهای معمولی است. از دیود زنر در تنظیم‌کننده‌های ولتاژ استفاده می‌شود.

به دلیل استفاده از این دیود در رگولاتورها، در صورت تغییر ولتاژ و یا کم‌وزیاد شدن جریان، ولتاژ دو سر بار مدار ثابت خواهد ماند.

۴-۱-۸- رگولاتور ولتاژ

فیلترها به این دلیل طراحی شدند تا تغییرات ایجادشده در یک‌سوسازها را حداقل کرده و ولتاژ ریپل را کاهش دهند. دلایل دیگری نیز برای تغییر ولتاژ بار وجود دارد. اگر دامنه‌ی منبع تغذیه تغییر کند، که این در عمل بسیار ممکن است، ولتاژ DC نوسان پیدا خواهدکرد. اگر جریان بار به دلیل تغییر در R_l تغییر کند، ولتاژ DC به دلیل قانون اهم در

ترانسفورمر، یک‌سوساز و سلف‌ها تغییر خواهد کرد. فیلتر از این تغییرات نمی‌تواند جلوگیری کند و اگر ولتاژ بار حساس باشد باید از یک رگولاتور ولتاژ استفاده کرد.

همان‌طور که اشاره شد، می‌توان از دیود زنر استفاده کرد. یک رگولاتور ولتاژ ساخته‌شده با دیود زنر از یک مقاومت R_sبه‌صورت سری با یک دیود زنر و موازی با یک مقاومت بار R_lساخته می‌شود. ولتاژ V_1خروجی صافی و یک‌سوساز می‌باشد. وظیفه‌ی رگولاتور این است که V_lرا در مقابل تغییرات V_1و I_lثابت نگه دارد. اساس این کار بر اساس این است که در ناحیه‌ی شکست دیود زنر، تغییرات کوچک در ولتاژ دیود با تغییرات زیاد در جریان آن همراه است. جریان‌های بزرگ وارد R_sمی‌شود و ولتاژی تولید می‌کند که تغییرات در V_1و I_lرا جبران می‌کند.

۸-۱-۵- برشگرها

یک برشگر مداری است که قسمت مثبت یا قسمت منفی یک‌شکل موج را قطع می‌کند. این عمل در شکل دادن موج، حفاظت مدار و مخابرات مورداستفاده قرار می‌گیرد.

شکل ۸-۷ یک برشگر مثبت نشان داده‌شده است. این مدار تمام بخش مثبت سیگنال ورودی را حذف می‌کند و به همین علت سیگنال خروجی فقط نیم سیکل منفی سیگنال ورودی است.

نحوه‌ی کار مدار به این نحو است که در طی نیم سیکل مثبت دیود بایاس شده و مشابه یک اتصال کوتاه در سرهای خروجی مدار عمل می‌کند. به‌طور ایده آل ولتاژ خروجی صفر است. در نیم سیکل منفی، دیود اتصال باز است و در این حالت یک نیم سیکل منفی در دو سر خروجی ظاهر می‌شود. مقاومت سری مدار را مخصوصاً به‌مراتب کوچک‌تر از مقاومت بار انتخاب می‌کنند. به همین دلیل ماکزیمم ولتاژ خروجی، همان‌طور که در شکل ۸-۸ نشان داده‌شده است، V_p است.

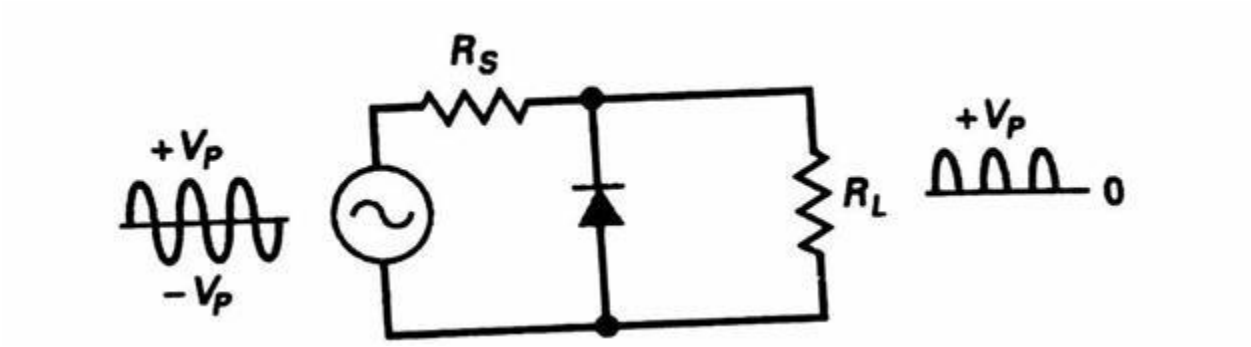
در حالت دیگر، ولتاژ دو سر دیود در حالت هدایت ۰/۷ ولت است. بنابراین، سطح برش به‌جای صفر، ۰/۷ ولت می‌باشد. برای مثال اگر نوک ولتاژ ورودی ۲۰ ولت باشد، خروجی برشگر مشابه شکل خواهد بود.

اگر جهت قرار گرفتن دیود در مدار شکل ۸–۷ را عوض کنیم مدار به یک برشگر منفی که در شکل ۸–۹ آمده است تبدیل می‌شود.

همان‌طور که انتظار می‌رود، مدار قسمت منفی سیگنال ورودی را حذف می‌کند. به‌طور ایده آل، موج خروجی فقط نیم سیکل‌های مثبت سیگنال ورودی است. به علت ایده آل نبودن دیودها عمل برش می‌تواند کامل نباشد و همان‌طور که در شکل ۸–۱۰ آمده است، سطح برش ۰/۷– می‌باشد.

می‌توان دو برشگر را مطابق شکل ۸–۱۱ باهم ترکیب کرد و برشگر ترکیبی را ایجاد کرد. دیود D1 قسمت مثبت بالاتر از سطح بایاس مثبت را برش داده و دیود D2 قسمت پایین‌تر از سطح بایاس منفی را برش می‌دهد. وقتی ولتاژ ورودی در مقایسه با سطوح بایاس خیلی بیشتر باشد، شکل موج خروجی یک موج مربعی می‌باشد.

شکل ۸–۶



شکل ۸–۷

شکل ۸–

۸

شکل ۸-۹

شکل ۸-۱۰

۶-۱-۸- ضریب تموج

همان‌طور که گفته شد، نتیجه‌ی دلخواه یک‌سوسازی ایجاد جریان مستقیم است ولی علاوه بر تولید جریان DC جریان AC را هم شامل می‌باشد. برای اندازه‌گیری مناسب بودن یک‌سوسازی از ضریب تموج استفاده می‌شود که رابطه‌ی آن به شرح زیر است:

$$\gamma = \frac{I_{ac}}{I_{dc}} = \frac{V_{ac(rms)}}{V_{dc}} = \frac{\text{مقدار موثر } ac}{\text{مولفه } dc}$$

چون اتلاف توان در بار همان مقدار rms جریان می‌باشد، مجموع اتلاف توان ناشی از مؤلفه‌های AC و DC است.

$$I_{rms}{}^{2}R_l = I_{DC}{}^{2}R_l + I_{ac}{}^{2}R_l$$

$$I_{ac}{}^{2} = I_{rms}{}^{2} - I_{DC}{}^{2}$$

$$\gamma = \frac{\sqrt{I_{rms}{}^{2} - I_{DC}{}^{2}}}{I_{DC}} = \sqrt{\left(\frac{I_{rms}}{I_{DC}}\right)^{2} - 1}$$

هر چه این مقدار کمتر باشد مدار به‌خوبی جریان متناوب را به مستقیم تبدیل می‌کند.

۲-۸- دستور کار

۱- (مدار برشگر دوسطحی) با استفاده از تعدادی دیود 1N4148 و منبع DC، یک موج سینوسی با فرکانس ۱ کیلوهرتز و دامنه‌ی ۱۰ ولت تولید کرده و با استفاده از این المان‌ها موج مربعی تولید کنید. با تغییر ولتاژهای منبع شکل موج‌های ورودی و خروجی را مشاهده کرده و آن‌ها را رسم کنید. به ازای ولتاژ ۴ ولت شکل منحنی خروجی و ورودی را به‌طور دقیق رسم کنید.

سپس اسیلوسکوپ را روی حالت x-y قرار داده، و به ازای ولتاژهای DC مختلف شکل موج را رسم کنید. (مقاومت ۱۲ کیلو)

۲- مدار کلمپ چیست؟ به‌طور مختصر شرح کوتاهی از کارکرد و ویژگی‌های این مدار توضیح دهید.

۳- مطابق مداری که در سؤال بالا مطالعه کردید، یک منبع ولتاژ به‌صورت سری با دیود مدار قرار دهید. سیگنال ورودی را با فرکانس ۱۰ کیلوهرتز و دامنه‌ی پیک تا پیک ۵ ولت تنظیم کنید. منبع ولتاژ را خاموش کرده و موج ورودی و خروجی را مشاهده کنید. اکنون ولتاژ کلمپ را اندازه بگیرید. سپس دامنه را تا ۷ ولت بالا برده و سپس دوباره کم کنید. تغییرات خروجی را ثبت کنید.

سرعت تغییرات خروجی را بر اساس ولتاژ ورودی بررسی کنید. (از خازن ۴۷۰ میکرو فاراد و ولتاژ ورودی پیک تا پیک ۴ ولت استفاده کنید)

سپس منبع تغذیه‌ی بالا را روشن کرده و ولتاژ را آرام‌آرام افزایش داده و تا ۳ ولت افزایش دهید، سپس حدود یک ولت کاهش دهید. تغییرات خروجی را ثبت کرده و آن را توجیه کنید.

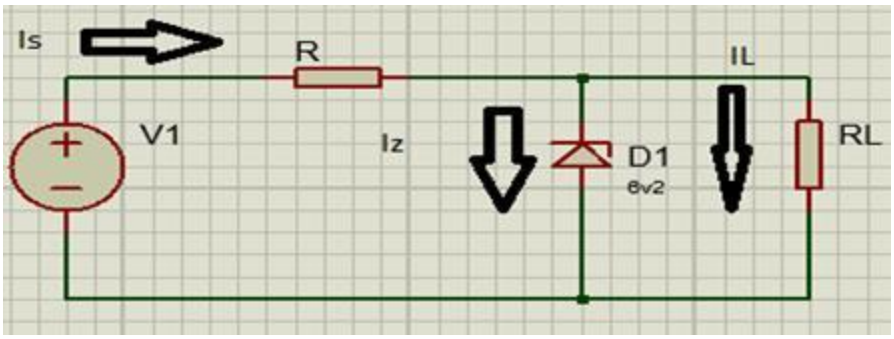
۴- مطابق مداری که در بخش یک‌سوساز نیم موج گفته شد. از ترانسفورماتور ۲۲۰ ولت به ۹ ولت استفاده کنید. شکل ولتاژ خروجی از مقاومت بار روی اسیلوسکوپ مشاهده کنید. به کمک اسیلوسکوپ V_mرا محاسبه کرده و I_mرا به کمک مقاومت بار به‌دست‌آمده آورید. (مقاومت بار را ۱/۵ کیلو در نظر بگیرید.) مقدار ولتاژ DC دو سر مقاومت بار را به‌دست‌آمده و سپس جریان DC آن را حساب کنید. نسبت جریان DC را با جریان I_mمحاسبه کرده و با مقدار مطرح‌شده در قسمت تیوری مقایسه کنید. (فرکانس را ۱ کیلو هرتز در نظر بگیرید)

سپس پس از محاسبه‌ی ولتاژ AC دو سر بار، مقدار جریان AC آن را یادداشت کنید. I_{rms}را با استفاده از فرمول‌ها و مقادیر به‌دست‌آمده محاسبه کنید و مقدار نسبت آن به I_mبه‌دست‌آمده آورید و با مقدار تئوری(۰/۵) مقایسه کنید. در پایان ضریب تموج را به دو روش به‌دست‌آمده آورید و نتایج را مقایسه کنید.

۵- مطابق مدار یک‌سو کننده‌ی پل که در تمرین مطالعه کردید، یک مدار یک‌سوساز تمام موج ساخته و با استفاده از بار ۲/۲کیلو اهم و مقدار ولتاژ ۱۲ ولت حاصل از ترانسفورماتور ، کلیه‌ی محاسبات قسمت ۴ را تکرار کرده و اشکال و اعداد را در گزارش کار ثبت کنید.

۶- در ادامه‌ی قسمت ۴و۵ یک خازن ۴۷۰ میکرو فاراد به دو سر مقاومت بار موازی کنید. شکل موج ولتاژ دو سر بار را رسم کنید. ولتاژ AC,DC را به‌دقت مشخص کنید. با خازن ۱۰۰ میکرو فاراد هم تکرار کنید و نتایج را مقایسه کنید.

۷- مداری مطابق شکل روبه‌رو ببندید. ابتدا مقاومت RL را ثابت برابر ۱کیلو در نظر بگیرید. ولتاژ منبع را مطابق جدول زیر تغییر دهید و پارامترهای خواسته‌شده در جدول را تکمیل کنید. سپس ولتاژ ورودی را مقدار ثابت ۱۵ ولت در نظر بگیرید و مقدار مقاومت را بر اساس جدول تغییر داده و مقادیر خواسته‌شده را یادداشت کنید.



شکل ۸-۱۱

vin	9	12	15	18	21	24	27	30
vout								
IS								
IL								
IZ								

RL	0/33	0/56	1	1/5	2/2	∞
Vout						
Is						
IL						
IZ						

آزمایش نهم: آشنایی با ترانزیستورهای BJT

۱-۹- پیش‌آگاهی

۱-۱-۹- ساختار ترانزیستورهای BJT

ترانزیستور BJT (Bipolar Junction Transistor) یک عنصر مداری سه پایه‌ای است که از سیلیکون یا ژرمانیوم ساخته شده است. ساختار ترانزیستور از دو لایه ناخالصی نوع N که به‌وسیله‌ی یک لایه ناخالصی نوع P از هم جداشده‌اند (NPN) یا از دو لایه ناخالصی نوع P که به‌وسیله‌ی یک لایه ناخالصی نوع N از هم جدا شده‌اند (PNP) تشکیل‌شده است. در هر دو حالت لایه‌ی مرکزی ناحیه‌ی بیس ترانزیستور را تشکیل می‌دهد و لایه‌های بیرونی ناحیه‌های کلکتور و امیتر ترانزیستور را تشکیل می‌دهند. این ساختاری است که پلاریته‌ی هر ولتاژی که به ترانزیستور اعمال می‌شود و جهت الکترون‌ها یا جریان قراردادی را تعیین می‌کند. جهت جریان پایانه‌ی امیتر همان‌طور که در شکل زیر مشخص است جهت جریان قراردادی را تعیین می‌کند.

در ادامه برخی از اصول اساسی ترانزیستورهای NPN را شرح می‌دهیم:

۱- پتانسیل پایانه‌ی کلکتور باید بیش‌تر از امیتر باشد. این موضوع برای حرکت جریان از کلکتور به امیتر ضروری است.

۲- دوقطبی‌های بیس-امیتر و بیس-کلکتور مشابه دیود رفتار می‌کنند:

الف- هنگامی که پیوند بیس-امیتر به‌صورت معکوس بایاس می‌شود، ترانزیستور خاموش می‌شود و هیچ جریانی از کلکتور به سمت امیتر نمی‌رود. پیوند بیس-امیتر مانند پیچ یک والو عمل می‌کند، جریان گذرا میان مدار کلکتور-امیتر را کنترل می‌کند.

ب- هنگامی‌که پیوند بیس-امیتر به‌صورت مستقیم و بیس-کلکتور به‌صورت معکوس بایاس می‌شود، ترانزیستور به حالت کاری فعال یا خطی می‌رود. دیودی که به‌صورت مستقیم بایاس می‌شود یک افت ولتاژ در حدود ۰/۶ تا ۰/۷ (۶/۵) ولت دارد. بنابراین در ناحیه‌ی فعال، جریان از داخل کلکتور عبور می‌کند و رابطه‌ی زیر بین جریان کلکتور و جریان بیس برقرار می‌شود:

$$I_C = \beta I_B$$

پ- وقتی هر دو پیوند ترانزیستور به‌صورت مستقیم بایاس شوند، ترانزیستور به حالت اشباع می‌رود و معمولاً V_{CE} در حدود ۰/۱ الی ۰/۲ ولت است.

ت- علاوه ناحیه‌های فعال و اشباع، هنگامی‌که هردو پیوند ترانزیستور به‌صورت معکوس بایاس شوند، ترانزیستور به حالت قطع می‌رود. در این حالت اصطلاحاً ترانزیستور خاموش می‌شود.

۳- درصورتی‌که I_C و V_{CE} از ماکزیمم مقدار خود بیش‌تر شود ترانزیستور می‌سوزد.

۴- اگر موارد ۱ تا ۳ رعایت شوند آنگاه $I_C \approx h_{FE} I_B = \beta I_B$ است. β (یا h_{FE}) در محدوده‌ی کاری فعال یا خطی به خوبی ثابت است. مقادیر معمول آن در رنج ۵۰ تا ۲۵۰ و به‌طورکلی بین ترانزیستورها متغیر است. یک طراحی مدار خوب آن است که به مقدار دقیق β به‌صورت اساسی بستگی نداشته باشد و تنها در نظر بگیرد که β یک مقدار بزرگ می‌باشد

شکل ۹-۲ تعاریف ولتاژ و جریان ترانزیستور را نشان می‌دهد. لازم به تذکر است که رابطه‌های داخل شکل همواره درست می‌باشد:

(الف)

(ب)

در ناحیه‌ی فعال:

$$I_E = (\beta + ۱) I_B \approx I_C$$

با درنظرگرفتن تقریب برای β بزرگ داریم:

$$V_B = V_E + ۰.۶۵\,V$$

هنگامی که به‌صورت خمیده‌ی یک ترانزیستور BJT معمولی نگاه می‌کنیم، همان‌طور که در شکل ۹–۳ نشان داده‌شده است، پایه‌ی امیتر (E) در سمت راست، بیس (B) در وسط و کلکتور (C) در سمت چپ آن قرار دارد.

ترانزیستور BJT همه‌کاره است و مصارف بسیاری دارد؛ به‌عنوان تقویت‌کننده، سوئیچ یا اسیلاتور. قبل از آنکه سیگنال ورودی AC به ترانزیستور اعمال شود، وضعیت کاری DC آن باید تنظیم شود.

برای این‌که ترانزیستور به‌عنوان یک مدار تقویت‌کننده عمل کند، باید آن را بایاس کنیم. به‌عبارت‌دیگر یک نقطه‌ی Q باید تنظیم شود تا ترانزیستور به حالت فعال برود. روش‌های مختلفی برای بایاس کردن یک ترانزیستور وجود دارد. شکل‌های ۹–۴ و ۹–۵ دو تا از آن‌ها را نشان می‌دهند.

مدار شکل ۹–۴ را مدار بیس بایاس (Base Bias) می‌نامند. در این مدار جریان بیس داخل مقاومت بیس تنظیم می‌شود و امیتر ترانزیستور به زمین وصل می‌شود. این مدار در عمل زیاد استفاده نمی‌شود زیرا نقطه‌ی Q وابستگی شدیدی به β دارد.

روش دوم (شکل ۵-۹) که استفاده از آن
مرسوم است مدار خود بایاس (Self Bias) است. در اینجا ولتاژ بیس از یک تقسیم‌کننده‌ی ولتاژ تأمین می‌شود و امیتر از طریق یک مقاومت به زمین وصل می‌شود. اگر طراحی مدار درست صورت بگیرد این مدار نسبتاً از βمستقل است.

۲-۱-۹- تقویت‌کننده‌ی امیتر مشترک

در تقویت‌کننده‌ی امیتر مشترک سیگنال ورودی بین بیس و امیتر اعمال می‌شود و ولتاژ خروجی بین کلکتور و امیتر ایجاد می‌شود. پایه‌ی امیتر ترانزیستور بین مدار ورودی و خروجی مشترک است، ازاین‌جهت به آن امیتر مشترک می‌گویند. استفاده از تقویت‌کننده‌ی امیتر مشترک در بین انواع تقویت‌کننده‌های ترانزیستور BJT از همه مرسوم‌تر است. این تقویت‌کننده مشخصات زیر را داراست:

۱- بهره‌ی ولتاژی بالا

۲- بهره‌ی جریانی بالا

۳- مقاومت ورودی متوسط

۴- مقاومت خروجی متوسط

۵- اختلاف فاز ۱۸۰ درجه‌ای بین شکل موج ورودی و خروجی

برای این‌که کاری کنیم تا ترانزیستور سیگنال‌های AC را تقویت کند لازم است که پیوند بیس-امیتر به‌صورت مستقیم و پیوند بیس-کلکتور به‌صورت معکوس بایاس شوند. هدف از مدارات بایاس، ایجاد و نگهداری شرایط کاری DC صحیح برای ترانزیستور است. همان‌طور که گفته شد استفاده از مدار خود بایاس به دلیل اینکه به تنوع ترانزیستورها و تغییرات دما حساس نیست مرسوم‌تر از مدار بیس بایاس است.

برای تحلیل هر تقویت‌کننده‌ای از پارامترهای DC شروع می‌کنیم. مراحل حل پارامترهای DC یک تقویت‌کننده‌ی امیتر مشترک که به‌وسیله‌ی یک تقسیم‌کننده‌ی ولتاژ بایاس شده است همان‌طور که در شکل ۹-۶-الف نشان داده شده، به‌صورت زیر است:

۱- به‌صورت ذهنی خازن‌ها را از مدار حذف می‌کنیم زیرا آن‌ها در تحلیل DC به‌صورت مدار باز ظاهر می‌شوند. این باعث می‌شود که مقاومت بار (R_L) حذف شود. ولتاژ بیس (V_B) با اعمال تقسیم‌کننده‌ی ولتاژ R_1 و R_2 مطابق شکل ۹-۶-ب به دست می‌آید.

۲- ۰/۷ ولت افت ولتاژ بایاس مستقیم دو سر دیود بیس-امیتر را از V_B کم می‌کنیم تا ولتاژ امیتر (V_E) طبق شکل ۹-۶-پ به دست بیاید.

۳- جریان DC مدار امیتر با اعمال قانون اهم بر روی مقاومت R_E به دست می‌آید. جریان امیتر (I_E) تقریباً برابر جریان کلکتور (I_B) است. ترانزیستور به‌عنوان یک منبع جریان در مدار کلکتور ظاهر می‌شود و مقدار آن تقریباً برابر I_E است. (شکل ۹-۶-ت)

اکنون می‌توانیم پارامترهای AC تقویت‌کننده را تحلیل کنیم. مدار معادل AC در شکل ۹-۷ نشان داده‌شده است. در تحلیل AC خازن‌ها به‌صورت اتصال کوتاه نشان داده می‌شوند. به همین دلیل مدار معادل AC مقاومت R_E را شامل نمی‌شود. با استفاده از قانون جمع آثار V_{CC} اتصال کوتاه می‌شود و زمین AC قلمداد می‌شود. مراحل تحلیل به‌صورت زیر هستند:

۱- تمام خازن‌ها اتصال کوتاه می‌شوند و V_{CC} زمین AC قرار داده می‌شود. مقاومت AC امیتر (r_e) را از رابطه‌ی زیر به دست می‌آوریم:

$$r_e = \frac{۲۶mV}{I_E}$$

۲- بهره‌ی ولتاژی تقویت‌کننده را محاسبه می‌کنیم. بهره‌ی ولتاژی نسبت ولتاژ خروجی به ولتاژ ورودی است. ولتاژ ورودی، ولتاژ دو سر مقاومت AC امیتر (r_e) تا زمین و ولتاژ خروجی دوسر مقاومت AC کلکتور تا زمین می‌باشد که در این مورد همان R_C است. برای مدار شکل ۹-۷ تقسیم ولتاژ خروجی به ولتاژ ورودی به‌صورت زیر نوشته می‌شود:

اگر از R_Eصرف‌نظر کنیم:

$$|A_V| = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{I_C R_C}{I_e r_e} \cong \frac{R_C}{r_e}$$

اگر از R_Eصرف‌نظر نکنیم:

$$|A_V| = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{I_C R_C}{I_{e(} r_e + R_E)} \cong \frac{R_C}{R_E}$$

۳- مقاومت ورودی نهایی را که از سیگنال AC دیده می‌شود محاسبه می‌کنیم:

اگر از R_Eصرف‌نظر کنیم:

$$R_{in} = R_۱ || R_۲ || \beta r_e$$

اگر از R_Eصرف‌نظر نکنیم:

$$R_{in} = R_۱ || R_۲ || \beta (r_e + R_E)$$

۴- مقاومت خروجی نهایی را که از سیگنال AC دیده می‌شود محاسبه می‌کنیم:

$$R_{out} = R_C$$

۵- بهره‌ی ولتاژی از منبع تا بار را حساب می‌کنیم:

$$\frac{V_L}{V_S} = \frac{R_{in}}{r_S + R_{in}} A_V \frac{R_L}{R_L + R_{out}}$$

۳-۱-۹- تقویت‌کننده‌ی کلکتور مشترک

تقویت‌کننده‌ی کلکتور مشترک دومین تقویت‌کننده‌ی مرسوم ترانزیستور BJT است. سیگنال ورودی تقویت‌کننده‌ی کلکتور مشترک (پیرو امیتر) در بیس اعمال و سیگنال خروجی آن از امیتر گرفته می‌شود. این تقویت‌کننده مشخصات زیر را دارد:

۱- تقریباً بهره‌ی ولتاژ آن ۱ است.

۲- بهره‌ی جریانی بالا

۳- مقاومت ورودی بالا

۴- مقاومت خروجی پایین

۵-شکل موج ورودی و خروجی هم‌فاز هستند.

شکل ۹-۸-الف یک تقویت‌کننده‌ی کلکتور مشترک با استفاده از یک ترانزیستور PNP و یک مدار بایاس تقسیم‌کننده‌ی ولتاژ را نشان می‌دهد. غالباً یک تقویت‌کننده‌ی کلکتور مشترک به دنبال یک تقویت‌کننده‌ی ولتاژ می‌آید. به جای داشتن یک مدار بایاس جدا، مقاومت بایاس از طریق یک مسیر DC از طبقه‌ی (stage) قبل تأمین می‌شود. شکل ۹-۸-ب این تکنیک معمول در تقویت‌کننده‌های توان را نشان می‌دهد.

تحلیل یک تقویت‌کننده با پارامترهای DC شروع می‌شود. این مراحل در قسمت قبل توضیح داده شد. در این‌جا آن‌ها را برای ترانزیستور PNP خلاصه می‌کنیم:

۱- به‌صورت ذهنی خازن‌ها را از مدار حذف می‌کنیم زیرا آن‌ها در تحلیل DC به‌صورت مدار باز ظاهر می‌شوند. این باعث می‌شود که مقاومت بار (R_L) حذف شود.

۲- ولتاژ بیس (V_B) با اعمال تقسیم‌کننده‌ی ولتاژ R_1 و R_2 به دست می‌آید.

۳- ۰/۷ ولت افت ولتاژ بایاس مستقیم دو سر دیود بیس-امیتر را به V_B اضافه می‌کنیم تا ولتاژ امیتر (V_E) به دست بیاید. (توجه کنید که در ترانزیستور PNP امیتر در ولتاژ بالاتری قرار دارد.)

۴- جریان DC مدار امیتر با اعمال قانون اهم بر روی مقاومت R_E به دست می‌آید. ولتاژ دو سر مقاومت امیتر تفاوت بین ولتاژ تغذیه (V_{EE}) و V_E است. جریان کلکتور تقریباً برابر جریان امیتر است و ولتاژ کلکتور صفر می‌باشد.

اکنون می‌توانیم پارامترهای AC تقویت‌کننده را تحلیل کنیم. مدار معادل AC در شکل ۹-۹ نشان داده‌شده است. مراحل تحلیل به‌صورت زیر هستند:

۱- تمام خازن‌ها اتصال کوتاه می‌شوند. مقاومت AC امیتر (r_e) را از رابطه‌ی زیر به دست می‌آوریم:

$$r_e = \frac{۲۵mV}{I_E}$$

۲- بهره‌ی ولتاژی تقویت‌کننده را محاسبه می‌کنیم. بهره‌ی ولتاژی نسبت ولتاژ خروجی به ولتاژ ورودی است. ولتاژ ورودی، ولتاژ دو سر r_e و مقاومت AC امیتر است و ولتاژ خروجی، تنها از دوسر مقاومت AC امیتر گرفته می‌شود. بنابراین بهره‌ی ولتاژی بر اساس مدار تقسیم ولتاژ به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$|A_V| = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{I_e(R_E||R_L)}{I_e(r_e + R_E||R_L)} = \frac{R_E||R_L}{r_e + R_E||R_L} \cong ۱$$

۳- مقاومت ورودی نهایی را که از سیگنال AC دیده می‌شود محاسبه می‌کنیم:

$$R_{in} = R_1||R_2||\beta(r_e + R_E||R_L)$$

۴- مقاومت خروجی نهایی را که از سیگنال AC دیده می‌شود محاسبه می‌کنیم:

$$R_{out} = R_E||R_L||(r_e + \frac{R_E||R_L}{\beta}) \cong r_e$$

۵- بهره‌ی توان تقویت‌کننده را محاسبه می‌کنیم. در این مورد ما تنها به دنبال توان انتقال داده شده به مقاومت بار هستیم. توان خروجی برابر است با: V_{out}^2/R_L . توان ورودی نیز برابر است با: V_{in}^2/R_{in} . چون بهره‌ی ولتاژی تقریباً برابر ۱ است، بهره‌ی توان می‌تواند به‌صورت نسبت R_{in} به R_L بیان شود.

$$A_p = \frac{\frac{V_{out}^2}{R_L}}{\frac{V_{in}^2}{R_{in}}} = A_v^2\left(\frac{R_{in}}{R_L}\right) = \frac{R_{in}}{R_L}$$

این روابط مختص تقویت‌کننده‌ی کلکتور مشترک هستند و برای دیگر تقویت‌کننده‌های ترانزیستور BJT معتبر نیستد.

یک استفاده‌ی مرسوم از تقویت‌کننده‌ی کلکتور مشترک، بافر است. یک بافر برای جبران عدم تناسب امپدانس بین بار و منبع استفاده می‌شود. چون مدار پیرو امیتر امپدانس ورودی نسبتاً بالا و امپدانس خروجی کمی دارد، غالباً از طریق یک پایه‌ی با امپدانس کم به‌صورت زوج یک منبع امپدانس بالا استفاده می‌شود.

۴-۱-۹- تقویت‌کننده‌ی بیس مشترک

در تقویت‌کننده‌ی بیس مشترک ورودی به امیتر اعمال می‌شود و خروجی از کلکتور گرفته می‌شود. شکل ۹-۱۰ یک تقویت‌کننده‌ی بیس مشترک و معادل AC آن را نشان می‌دهد. در این تقویت‌کننده بهره‌ی ولتاژ به‌صورت زیر است:

$$|A_v| = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{I_c(R_C||R_L)}{I_e(r_e||R_E)} \cong \frac{I_e(R_C||R_L)}{I_e(r_e||R_E)}$$

اگر $R_E \gg r_e'$ باشد آنگاه:

$$A_v \cong \frac{R_C||R_L}{r_e}$$

مقاومت ورودی‌ای که از امیتر دیده می‌شود برابر است با:

$$R_{in(emitter)} = \frac{V_{in}}{I_{in}} = \frac{V_e}{I_e} = \frac{I_e(r_e || R_E)}{I_e}$$

معمولاً $R_E \gg r_e$است؛ بنابراین:

$$R_{in(emitter)} = r_e$$

مقاومت خروجی که از کلکتور دیده می‌شود، شامل مقاومت AC کلکتور (r_c) به‌صورت موازی با R_Cاست. از آنجا که r_cبسیار بزرگ‌تر از R_Cاست، مقاومت خروجی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R_{out} = R_C$$

بهره‌ی جریانی از تقسیم جریان خروجی به جریان ورودی به دست می‌آید. چون جریان کلکتور (I_c) تقریباً با جریان امیتر (I_e) برابر است داریم:

$$A_v \cong ۱$$

چون بهره‌ی جریانی تقریباً ۱ است؛ بهره‌ی توانی طبق رابطه‌ی $A_p = A_v A_i$به‌صورت به دست می‌آید:

$$A_p \cong A_v$$

۲-۹-۲ دستور کار

۱-۲-۹- مشخص کردن پایه‌ها، نوع و جنس ترانزیستور به‌وسیله‌ی اهم سنج

هر ترانزیستور دارای سه پایه است که معمولاً مشخص نیست کدام یک امیتر، بیس یا کلکتور هستند. اگر مقاومت بین یکی از پایه‌های آن با دو پایه‌ی دیگر مقدار کم یا مقدار زیادی باشد (اهم‌متر در حالت $R \times 1$) در آن صورت آن پایه بیس است. بعد از مشخص شدن بیس، مقاومت بین بیس و دو پایه‌ی دیگر تعیین می‌گردد. معمولاً مقاومت پیوند بیس-کلکتور در بایاس مستقیم از مقاومت پیوند بیس-امیتر کمتر است. در مورد تعیین جنس ترانزیستور، مقاومت ترانزیستورهای Ge بسیار کمتر از Si است.

نوع و پایه‌های ترانزیستورهایی که در اختیارتان قرار داده می‌شود را تعیین کنید و نتایج را در جدول زیر ثبت کنید.

شماره‌ی ترانزیستور	شکل ظاهری و پایه‌ها	نوع (NPN یا PNP)	جنس ترانزیستور (GE یا Si)

۲-۲-۹- تعیین پارامترهای ترانزیستور و خط بار DC

مدار شکل ۹-۱۱ را با استفاده از یک ترانزیستور NPN ببندید.

الف- ولتاژهای کلکتور، بیس و امیتر را با توجه به زمین مدار اندازه‌گیری کنید. همین‌طور جریان‌های کلکتور، بیس و امیتر را اندازه‌گیری کنید و نتایج را در جدول یادداشت کنید.

ب- ولتاژ کلکتور-امیتر (V_{CE}) و بیس-امیتر (V_{BE}) را اندازه‌گیری و در جدول وارد کنید.

پارامتر	مقدار اندازه‌گیری شده	مقدار محاسبه شده	درصد خطا
V_C			
V_B			
V_E			
I_{CQ}			
I_{BQ}			
I_{EQ}			
β_{DC}			
V_{CEQ}			
V_{BEQ}			

ب- مقدار بهره‌ی جریان DC یا بتا (β) و پارامتر α را با توجه به رابطه‌های آن‌ها به دست آورید.

$$\beta_{DC} = \frac{I_{CQ}}{I_{BQ}}$$

$$\alpha = \frac{\beta}{\beta + 1}$$

پ- نقاط اشباع ($V_{CE(off)}$) و قطع ($I_{C(short)}$) روی خط بار DC را با استفاده از روابط زیر برای این مدار تعیین کنید.

$$I_{C(short)} = \frac{V_{CC}}{R_C + R_E}$$

$$V_{CE(off)} = V_{CC}$$

ت- خط بار DC را با استفاده از نقاطی که در قسمت پ به‌عنوان نقاط انتهایی تعیین کردید؛ رسم کنید. نقطه Q را با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده‌ی I_{CQ} و V_{CEQ} مکان‌یابی کنید.

ث- مدار شکل ۹-۱۲را با استفاده از یک ترانزیستور PNP ببندید.

د- موارد «الف» تا «ت» را برای مدار قسمت قبل تکرار کنید.

۹-۲-۳- ترانزیستور به‌عنوان سوئیچ

مدار شکل ۹-۱۳ را با استفاده از یک ترانزیستور NPN ببندید. توجه کنید مقاومت محدودکننده‌ی جریان R_C باید به‌صورت سری با LED باشد. در غیر این صورت LED می‌سوزد.

الف- اطمینان حاصل کنید که یک سر مقاومت R_B به زمین وصل شده باشد. ولتاژهای بیس (V_B)، امیتر (V_E) و کلکتور (V_C) را اندازه‌گیری کرده و یادداشت کنید. چه مشاهده می‌کنید؟

ب- مقاومت بیس (R_B) را به جای وصل کردن به زمین، به $+۱۰V$ وصل کنید. چه مشاهده می‌کنید؟

پ- برای پیکربندی قسمت قبل ولتاژهای بیس (V_B)، امیتر (V_E) و کلکتور (V_C) را اندازه‌گیری کنید. ترانزیستور در چه مد کاری‌ای است؟ توضیح دهید.

۹-۲-۴- ترانزیستور به‌عنوان تقویت‌کننده

مدار شکل ۹-۱۴ را با استفاده از یک ترانزیستور NPN ببندید.

الف- در ابتدا نقطه‌ی کار DC مدار را تعیین کنید. سیگنال ورودی را قطع کنید. ولتاژهای DC بیس (V_B)، امیتر (V_E) و کلکتور (V_C) را اندازه‌گیری کنید.

ب- سیگنال ورودی را وصل کنید. با استفاده از فانکشن ژنراتور یک سیگنال سینوسی با دامنه‌ی ۰/۵ ولت و فرکانس ۱ کیلوهرتز ایجاد کنید. از اسیلوسکوپ برای مشاهده‌ی سیگنال ورودی و خروجی استفاده کنید.

پ- شکل موج‌های ورودی و خروجی را رسم و اختلاف فاز دو شکل موج را نشان دهید.

ت- بهره‌ی ولتاژی را با اندازه‌گیری ولتاژهای پیک () ورودی و خروجی و با توجه به رابطه‌ی زیر تعیین کنید.

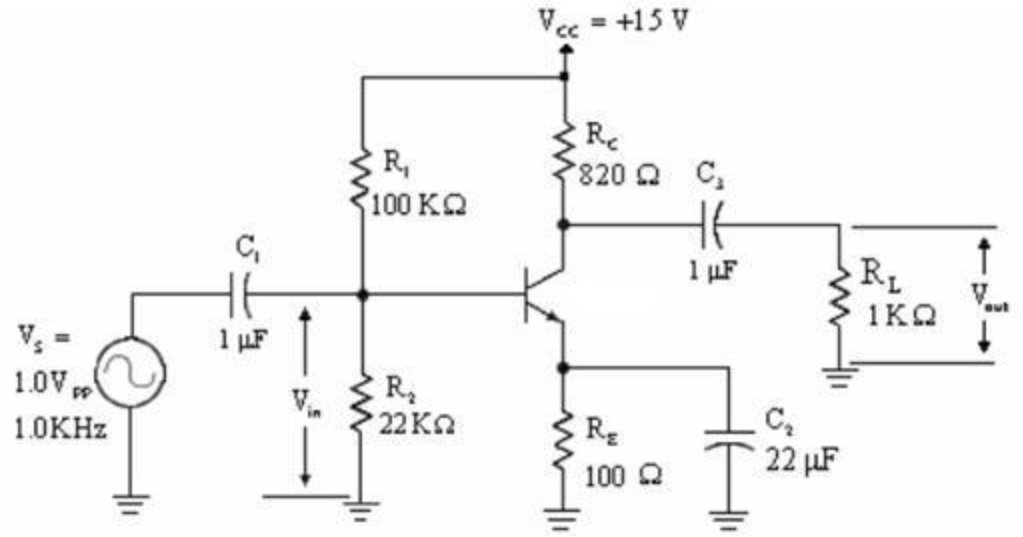
$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

ث- دامنه‌ی ولتاژ ورودی را افزایش دهید تا وقتی‌که یک تغییر قابل توجهی در شکل موج خروجی ببینید. مشاهده‌ی خود را توصیف کنید.

۵-۲-۹- تقویت‌کننده‌ی امیتر مشترک

اندازه‌گیری DC

مدار شکل ۹-۱۵ را ببندید.



شکل ۹-۱۵

الف- سیگنال ورودی را قطع و ولتاژهای DC جدول ۳ را اندازه‌گیری کنید.

ب- مقدار β را مشخص کنید و با استفاده از اندازه‌گیری‌های قسمت قبل پارامترهای DC جدول ۳ را کامل کنید. مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده می‌توانند تا ۱۰٪ با هم اختلاف داشته باشند

پارامتر DC	محاسبه شده	اندازه‌گیری شده
V_B		
V_E		
I_E		
V_C		
V_{CE}		
β		

اندازه‌گیری AC (اختیاری)

الف- پارامترهای AC جدول ۴ را محاسبه کنید. ولتاژ AC بیس (v_b) بیانگر سیگنال ورودی به تقویت‌کننده است. ولتاژ ورودی را در بهره‌ی ولتاژی ضرب کنید تا سیگنال خروجی به دست بیاید. محاسبات خود را نشان دهید.

ب- مقاومت بار (R_L) را از مدار حذف کنید. سیگنال ورودی را به مدار وصل کنید و V_sرا برابر ۰/۱ V_Pموج سینوسی در فرکانس ۰/۱ kHz قرار دهید. مقادیر PP (peak to peak) شکل موج‌های ورودی و خروجی را اندازه‌گیری کنید و در جدول ۴ وارد کنید. از ولتاژهای اندازه‌گیری شده‌ی سیگنال برای به دست آوردن بهره‌ی ولتاژی تقویت‌کننده استفاده کنید.

پ- به‌دقت سیگنال‌های ورودی و خروجی و اختلاف فاز بین آن‌ها را رسم نمایید.

ت- مدار را به حالت اولیه‌ی آن در شکل ۹-۱۵ برگردانید. مقاومت بار (R_L) را $1 k\Omega$قرار دهید و مقادیر PP ولتاژ خروجی را اندازه‌گیری کنید و مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده را یادداشت کنید. از این مقادیر برای تعیین بهره‌ی ولتاژی از ورودی تا مقاومت بار (V_L/V_{in}) استفاده و آن‌ها را داخل جدول ۴ وارد کنید.

ث- با استفاده از قوانین پایه‌ای تقسیم جریان می‌توانید به‌راحتی امپدانس ورودی تقویت‌کننده را تعیین کنید.

یک پتانسیومتر ۴۷ کیلواهمی بین سیگنال ژنراتور و خازن جفت ورودی قرار دهید.

پتانسیومتر را به‌گونه‌ای تنظیم کنید که V_{out}به نصف مقداری که قبل از قرار دادن خازن داشت برسد.

منبع را خاموش و پتانسیومتر را بدون بر هم زدن تنظیم آن از مدار خارج کنید.

مقدار مقاومت پتانسیومتر تنظیم شده را اندازه‌گیری و آن را در جدول ۴ وارد کنید. این مقدار مقاومت داخلی تقویت‌کننده است.

د- C_2را از مدار خارج کنید. سیگنال AC ولتاژ بیس، امیتر وکلکتور ترانزیستور را اندازه‌گیری کنید. همچنین بهره‌ی ولتاژی تقویت‌کننده را اندازه‌گیری کنید.

ذ- قسمت «ت» و «ث» را برای موقعی که خازن «مدار باز» (و R_E داخل مدار) است تکرار کنید. نتایج را با مقادیر محاسبه شده در قسمت الف مقایسه کنید.

ر- برای محاسبه‌ی مقاومت خروجی R_{out} تقویت‌کننده‌ی امیتر مشترک یک پتانسیومتر ۱ کیلواهمی را بین زمین و خازن جفت خروجی قرار دهید. پتانسیومتر را به گونه‌ای تنظیم کنید که V_{out} به نصف مقدار قبلی خود برسد. سپس پتانسیومتر را حذف و مقدار مقاومت آن را اندازه‌گیری کنید. طبق قاعده‌ی تقسیم جریان مقاومت پتانسیومتر برابر مقاومت خروجی تقویت‌کننده است.

پارامتر AC	مقدار محاسبه شده		مقدار اندازه‌گیری شده	
	R_E اتصال کوتاه | R_E داخل مدار		R_E اتصال کوتاه | R_E داخل مدار	
$v_b = V_{in}$				
r_e				
A_V				
$V_C = V_{out}$				
R_{in}				
V_L/V_{in}				

۶-۲-۹- تقویت‌کننده‌ی کلکتور مشترک

اندازه‌گیری DC

مدار شکل ۹-۱۶ را ببندید.

الف- سیگنال ورودی را قطع و ولتاژهای DC جدول ۵ را اندازه‌گیری کنید.

ب- مقدار β را مشخص کنید و با استفاده از اندازه‌گیری‌های قسمت قبل، پارامترهای DC جدول ۵ را برای تقویت‌کننده‌ی کلکتور مشترک شکل ۹-۱۶ کامل کنید. مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده می‌توانند تا ۱۰٪ با هم اختلاف داشته باشند

اندازه‌گیری شده	محاسبه شده	پارامتر DC
		V_B
		V_E
		I_E
		V_C
		β

اندازه‌گیری AC (اختیاری)

الف- پارامترهای AC جدول ۶ را محاسبه کنید. فرض کنید ولتاژ AC بیس (v_b) مشابه ولتاژ منبع (V_S) است. از مراحلی که در پیش‌آگاهی گفته شد برای محاسبه‌ی این پارامترها استفاده کنید و محاسبات خود را نشان دهید.

ب- سیگنال ژنراتور را روشن کنید و در فرکانس $1\,kHz$، V_S را برابر $100\,V_{p-p}$ قرار دهید. برای تنظیم ولتاژ و چک کردن فرکانس از اسیلوسکوپ استفاده کنید. مقدار PP سیگنال ولتاژ ورودی و خروجی را اندازه‌گیری و بهره‌ی ولتاژی را تعیین کنید.

پ- با استفاده از روشی که در قسمت «ث» سؤال قبل گفته شد مقاومت ورودی تقویت‌کننده را به دست آورید و آن را در جدول ۶ وارد کنید.

ت- با استفاده از روشی که در قسمت «ر» سؤال قبل گفته شد مقاومت خروجی تقویت‌کننده را به دست آورید.

پارامتر AC	مقدار محاسبه شده	مقدار اندازه‌گیری شده
v_b		
v_e		
r_e		
A_V		
R_{in}		
R_{out}		
A_P		

ث- مقاومت R_L را با یک مقاومت متغیر ۱۰ کیلواهمی که در ۱ کیلواهم تنظیم شده است تعویض کنید. یک پروب اسیلوسکوپ را به امیتر وصل کنید. آن‌قدر دامنه‌ی سیگنال را زیاد کنید تا سیگنال برش بخورد. اگر قسمت مثبت سیگنال برش بخورد شما شاهد مد کاری قطع ترانزیستور هستید چراکه ترانزیستور خاموش شده است. اگر قسمت

منفی سیگنال برش بخورد؛ ترانزیستور در ناحیه‌ی اشباع قرار دارد چرا که ترانزیستور کاملاً رسانا شده است. کدام نوع برش را اول مشاهده کردید؟

ث- همان‌طور که شکل موج خروجی را مشاهده می‌کنید R_Lرا تغییر دهید. مشاهدات خود را توصیف کنید.

د- برای نشان دادن تأثیر مقاومت بار روی تقویت‌کننده‌ی امیتر مشترک، مدار زیر را ببندید.

ذ- در فرکانس ۱۰kHz، $V_S = ۱۰۰\ kHz$قرار دهید. V_Lرا اندازه‌گیری و یادداشت کنید. بهره‌ی ولتاژی از ورودی تا مقاومت بار (V_L/V_S) را محاسبه کنید.

ر- طبقه‌ی تقویت‌کننده‌ی کلکتور مشترک در بافر کردن یک مقاومت بار با امپدانس کم در مقابل یک مقاومت خارجی امپدانس بالای تقویت‌کننده‌ی امیتر مشترک کاربرد دارد. برای نشان دادن این موضوع مدار زیر را ببندید.

ز- قسمت «ذ» را برای مدار شکل ۹-۱۸ تکرار کنید. اسیلوسکوپ را در AC coupling تنظیم کنید.

۶-۲-۹- تقویت‌کننده‌ی بیس مشترک

مدار شکل ۹-۱۹ را ببندید.

الف- سیگنال ورودی را قطع و ولتاژهای DC جدول ۵ را اندازه‌گیری کنید.

ب- مقدار βرا مشخص کنید و با استفاده از اندازه‌گیری‌های قسمت قبل، پارامترهای DC جدول ۵ را برای تقویت‌کننده‌ی کلکتور مشترک شکل ۹-۱۶ کامل کنید. مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده می‌توانند تا ۱۰٪ با هم اختلاف داشته باشند

پارامتر DC	محاسبه شده	اندازه‌گیری شده
V_B		
V_E		
I_E		
V_C		
β		

اندازه‌گیری AC (اختیاری)

الف- سیگنال ژنراتور را روشن کنید و در فرکانس $1\,kHz$، V_Sرا برابر $100\ V_{p-p}$قرار دهید. برای تنظیم ولتاژ و چک کردن فرکانس از اسیلوسکوپ استفاده کنید. مقدار PP سیگنال ولتاژ ورودی و خروجی را اندازه‌گیری و بهره‌ی ولتاژی را تعیین کنید.

ب- با استفاده از روشی که در دو سؤال قبل گفته شد مقاومت ورودی و خروجی تقویت‌کننده را به دست آورید.

پ- با استفاده از اسیلوسکوپ اختلاف فاز ورودی و خروجی را به دست آورید

.

آزمایش دهم: آشنایی با MOSFET

۱۰-۱- پیش‌آگاهی

هدف از انجام این آزمایش درک رابطه‌ی ولتاژ- جریان در ماسفت‌های n کانال می‌باشد.

به‌طورکلی در ترانزیستورهای اثر میدانی مبنای کار کنترل جریان توسط یک میدان الکتریکی می‌باشد. در این نوع ترانزیستورها تنها یک نوع حامل بار (چه الکترون آزاد و چه حفره) در ایجاد جریان الکتریکی دخالت دارند، می‌توان آن‌ها را جز ترانزیستورهای تک‌قطبی به‌حساب آورد.

ترانزیستورهای اثر میدانی به دودسته‌ی اصلی تقسیم‌بندی می‌شوند.

۱- JFET

۲- MOSFET

در این نوع ترانزیستورها، برخلاف ترانزیستورهای دوقطبی پیوندی که کنترل جریان امیتر و کلکتور با جریان ورودی به بیس صورت می‌گیرد،کنترل جریان سورس و درین با اعمال ولتاژ به گیت صورت می‌گیرد.

ماسفت‌ها خود به دودسته‌ی اصلی تقسیم‌بندی می‌شوند:

۱- تهی ۲- افزایشی

ماسفت‌ها دارای ۳ پایه‌ی سورس، درین، گیت می‌باشد. در ماسفت‌های n کانال، بدنه به زمین یا ولتاژ منفی متصل می‌باشد. درین و سورس در زیر لایه نفوذ داده و توسط کانال باریکی در مجاورت گیت به هم ارتباط داده می‌شوند.

ناحیه‌ی گیت بین سورس و درین است و با یک‌لایه‌ی اکسید پوشیده شده و لایه‌ی فلزی روی آن قرارگرفته است. در ترانزیستور NMOS، ولتاژ مثبت به گیت وارد می‌شود تا کانال n را در زیر گیت ایجاد کند و یک ناحیه‌ی رسانا از سورس به درین ایجاد می‌شود.

هنگامی که ولتاژ درین- سورس به این ترانزیستور وارد می‌شود، جریان الکترون از ناحیه‌ی سورس به ناحیه‌ی درین توسط کانال ایجادشده زیر گیت جاری می‌شود.

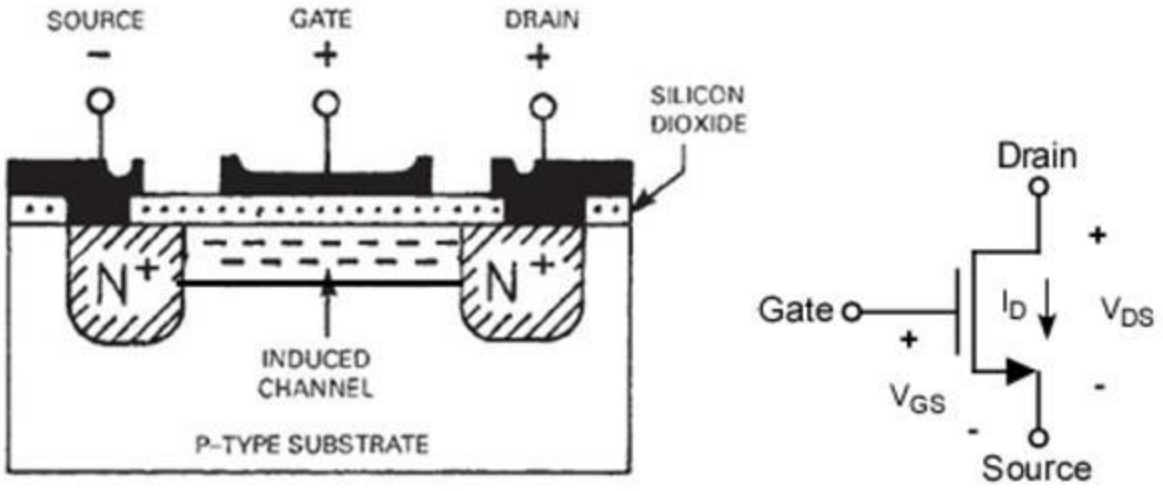
این جریان، که جریان درین نامیده می‌شود با نماد I_d نمایش داده می‌شود که به ولتاژ گیت V_G، ولتاژ درین- سورس، ولتاژ آستانه، و پارامترهای فیزیکی مختلف دیگری K_n بستگی دارد.

در ناحیه‌ی اهمیک یا تریود، هنگامی که مقدار $V_{DS} < (V_{GS} - V_t)$ برقرار است، جریان درین حالت وابستگی خطی به V_{DS} از خود نشان می‌دهد.

$$I_D = K_n \left[(V_{GS} - V_t) V_{DS} - \frac{۱}{۲} {V_{DS}}^۲ \right]$$

هنگامی‌که مقدار $V_{DS} > (V_{GS} - V_t)$ برقرار است، جریان درین به مقدار اشباع می‌رسد و داریم:

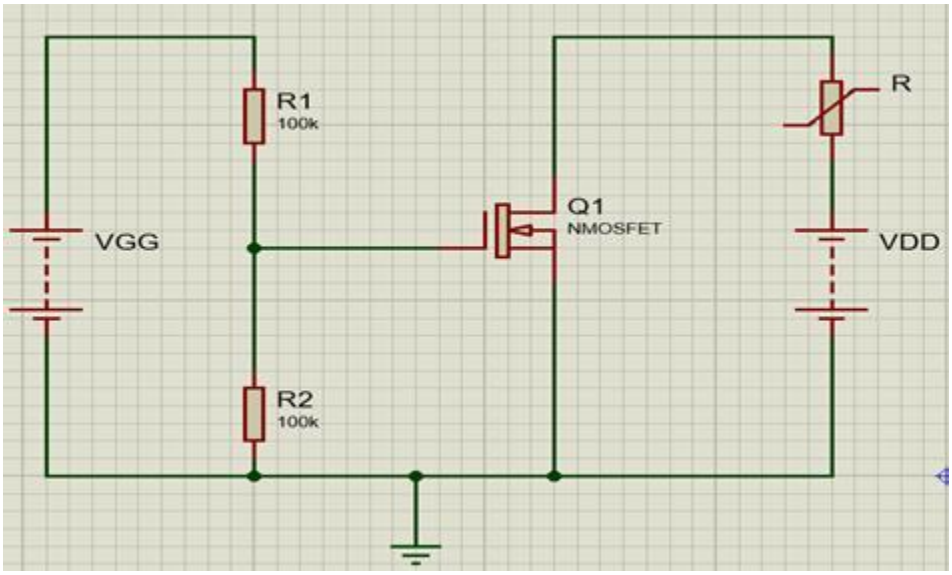
$$I_D = \frac{۱}{۲} K_n (V_{GS} - V_t)^۲$$



۱۰-۲- دستور کار

۱- نمودارهای مربوط به جریان و ولتاژ پایه‌های مختلف را مورد مطالعه قرار دهید.

۲- مداری مطابق شکل زیر ببندید.



۳- V_{GS}را با تغییر V_{GG}از صفر تا سه ولت با قدم‌های ۰/۵ ولتی و برای هر بار تغییر V_{GS}، V_{DS}را از صفر تا ۱۰ ولت با قدم‌های ۰/۲ ولتی تغییر دهید (با تغییر V_{DD}و R) تا این‌که به منطقه‌ی اشباع نزدیک شوید. بعد از رسیدن به این ناحیه قدم‌ها را ۱ ولت در نظر بگیرید. میزان I_Dرا برای هر V_{Gs}و V_{DS}محاسبه کنید. برای این دو ولتاژ با I_D یک نمودار رسم کنید. منطقه‌ی تریود و اشباع را روی نمودار رسم شده مشخص کنید. مقدار I_Dرا با استفاده از اعداد به‌دست‌آمده و فرمول‌های مطرح‌شده نیز به دست آورید.

۴- V_{GS}را از صفر تا پنج ولت با قدم‌های ۱ ولتی تغییر دهید و مقدار I_Dرا برای $V_{Ds=10}$به دست آورید. نمودار $V_{GS} - I_D$ را رسم کنید. مقدار I_Dرا با فرمول اشباع که در متن آمده است نیز به دست آورید.

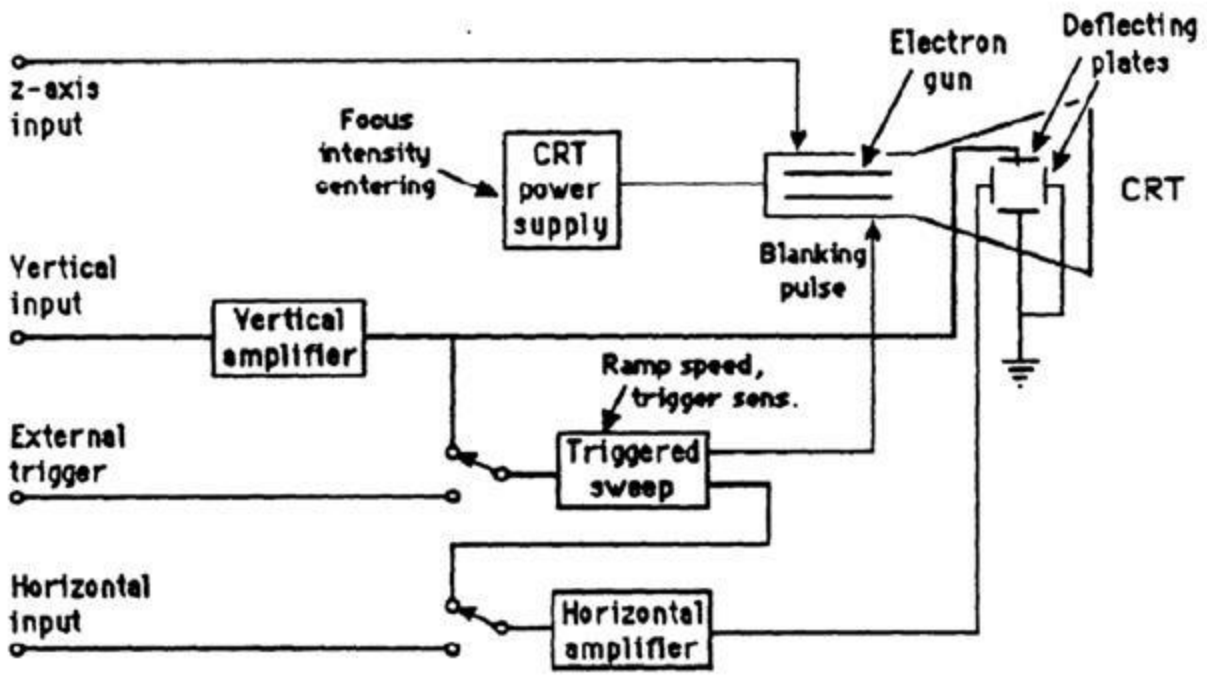
۵- V_{GS}را از صفر تا پنج ولت با قدم‌های ۰/۵ ولتی تغییر دهید و مقدار V_{DS}را برای هر مقدار تغییر داده‌شده به دست آورید. قدم‌ها را در مواردی که این دو مقدار بسیار به هم وابسته می‌شوند کاهش دهید. منحنی انتقال ولتاژ را رسم کنید. مقدار V_tرا به دست آورید و با مقدار داخل کاتالوگ مقایسه کنید.

ضمیمه‌ی اول: دستورالعمل کار با عموم اسیلوسکوپ‌ها

اسیلوسکوپ وسیله‌ای است که برای آنالیز مدارهای الکتریکی با تمرکز بر مشاهده‌ی موج جریان و ولتاژ مدارها می‌باشد. هم‌چنین می‌توان از اسیلوسکوپ برای بررسی فرکانس، فاز، زمان و مقایسه‌ی رابطه‌ی بین دو متغیر استفاده کرد. شاید بزرگ‌ترین ویژگی اسیلوسکوپ توانایی آن در به نمایش درآوردن پالس‌ها و شکل موج‌هایی است که تمایل به بررسی آن‌ها داریم می‌باشد.

اسیلوسکوپ از یک لوله‌ی اشعه‌ی کاتد برای نمایش سیگنال‌ها استفاده می‌کند. لوله‌ی اشعه‌ی کاتد یا همان CRT از یک تفنگ الکترونی تشکیل‌شده است. این تفنگ الکترونی یک پرتوی بسیار چگال از الکترون را به صفحه‌ی فلورسنت می‌تاباند. این پرتو توسط یک جفت صفحه‌ی افقی و یک جفت صفحه‌ی عمودی کنترل می‌شود. هنگامی‌که ولتاژ اعمالی به این صفحه برابر با صفر باشد، پرتونگار یک نقطه‌ی نورانی در وسط صفحه ایجاد می‌کند. هر پتانسیلی که به این صفحات اعمال گردد، یک میدان الکتریکی ایجاد می‌کند که به نسبت این میدان، پرتوی الکترونی را منحرف می‌کند.

نمای کلی از اسیلوسکوپ به شکل زیر می‌باشد:



شکل ۱: نمای کلی اسیلوسکوپ

اجزای اصلی یک اسیلوسکوپ عادی عبارت‌اند از لوله‌ی اشعه‌ی کاتدی، تقویت‌کننده‌ها، جاروب و منبع تغذیه.

ولتاژی که باید جذب شود به صفحه‌ی عمودی وارد می‌شود. این سیگنال ممکن است توسط تقویت‌کننده‌ی عمودی تقویت شود تا بتواند موج عمودی مناسبی را تولید کرده و نمایش دهد. جاروب اسیلاتور پرتو را به‌صورت افقی با نرخی ثابت حرکت می‌دهد.

۲- اسیلوسکوپ عملاً یک ولت‌متر بسیار دقیق می‌باشد ولی توانایی اندازه‌گیری جریان را به‌طور مستقیم ندارد و برای محاسبه‌ی جریان می‌توان از قانون اهم استفاده کرد. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های اسیلوسکوپ این است که می‌توان از آن در فرکانس‌های بسیار بالا نیز استفاده کرد. اسیلوسکوپ‌ها می‌توانند یک یا بیشتر کانال داشته باشند. اسیلوسکوپ‌های تک کانال فقط می‌توانند یک سیگنال را در هرلحظه نمایش بدهند. ما معمولاً از اسیلوسکوپ‌های ۲کانال استفاده می‌کنیم. این اسیلوسکوپ‌ها می‌توانند در هرلحظه ۲ سیگنال را نمایش بدهند.

۳- در این قسمت اجزای اصلی و کلیدهای اصلی اسیلوسکوپ را معرفی می‌نماییم. مطالعه‌ی این قسمت برای شروع به کار با اسیلوسکوپ مهم و اساسی می‌باشد.

پراب: برای انتقال سیگنال‌ها از این وسیله استفاده می‌شود. پراب از نوعی کابل کواکسیال ساخته‌شده است. این کابل نسبت به کابل‌های عادی رشته‌ای در مقابل نویز پایدارتر است. برای اتصال آن ورودی را درون کانال موردنظر قرار می‌دهیم و آن را از چپ به راست می‌پیچانیم. و برای خارج کردن آن این کار را برعکس انجام می‌دهیم. برای بررسی سیگنال نوک پروب را که به‌صورت گیره‌ای یا به‌صورت سوزنی است در محل موردنظر قرار می‌دهیم و سیگنال را بر روی صفحه ملاحظه می‌کنیم. بر روی پراب کلید حالت x1 و حالت x10 وجود دارد. در حالت x1 سیگنال بدون هیچ‌گونه تضعیفی از پراب به اسیلوسکوپ منتقل می‌شود. در حالت x10 سیگنال داخل پروب با ضریب ۱۰ تضعیف می‌شود و سپس به اسیلوسکوپ منتقل می‌شود. از این حالت برای سیگنال‌های با دامنه‌ی بسیار بالا استفاده می‌شود.

صفحه‌ی نمایش: اسیلوسکوپ دارای صفحه‌ای است که در محور عمودی ۸ قسمت و در محور افقی ۱۰ قسمت تقسیم‌بندی شده است. هر خانه نیز خود به ۵ قسمت تقسیم‌شده است که این برای محاسبه‌ی دقیق‌تر پارامتر موردنظر می‌باشد.

Intensity: این کلید شدت نور صفحه را تنظیم می‌کند. این ولوم باید در حالتی قرار بگیرد که بتوان به‌راحتی سیگنال مدنظر را مشاهده کرد.

Focus: این کلید ضخامت سیگنال موردنظر را روی صفحه‌ی اسیلوسکوپ تنظیم می‌کند.

پیچ تنظیم: از این قسمت برای تنظیم سلکتورها و هم‌چنین برای تست کردن دستگاه برای مطمئن شدن از عملکرد صحیح آن می‌توان استفاده کرد. در ساخت اسیلوسکوپ یک سیگنال از پیش طراحی‌شده برای این قسمت در نظر گرفته‌شده است. اگر این سیگنال به اسیلوسکوپ وارد شود می‌توان شکل موج را مشاهده کرد.

Time/div: این کلید دارای ضرایبی برحسب ثانیه، میلی‌ثانیه و میکروثانیه است و این ضرایب نشان‌دهنده‌ی زمان لازم برای جابه‌جایی اشعه در راستای افقی به‌اندازه‌ی یک‌خانه می‌باشد.

Time/variable: از این کلید برای تنظیم فشرده و باز کردن شکل موج در راستای افقی استفاده می‌شود. برای اندازه گرفتن زمان تناوب توسط اسیلوسکوپ باید حتماً این کلید تا آخر در جهت حرکت عقربه‌های ساعت چرخانده شود و روی علامت cal قرار گیرد.

Horizontal position: این کلید شکل موج را در راستای افقی جابه‌جا می‌کند.

Volt/div: این کلید دارای ضرایبی است که این ضرایب برحسب ولت و میلی ولت می‌باشد و هر ضریب بیان‌کننده‌ی این است که هر خانه در محور عمودی چند ولت می‌باشد. از این کلید می‌توان برای محاسبه‌ی دامنه استفاده کرد.

Vertical position: این کلید شکل موج را در راستای عمودی جابه‌جا می‌کند.

کلید Ac/gnd/dc: اگر این کلید بر رویAc باشد یک خازن در مسیر ورودی اسیلوسکوپ قرار می‌گیرد و سبب حذف مؤلفه‌ی Dc می‌شود. اگر کلید روی Dc باشد هر چه در ورودی باشد دقیقاً به‌طور کامل در صفحه‌ی نمایش داده می‌شود. اگر کلید روی حالت Gnd باشد صفحات به اختلاف‌پتانسیل صفر متصل می‌شود. از این حالت برای تعیین مبنای حالت عمودی و یا همان ولتاژ صفر ولت استفاده می‌شود.

ADD–DUAL–CH2–CH1: اگر این کلید رویCH1 باشد فقط سیگنال کانال۱ قابل‌مشاهده است. و اگر روی CH2 باشد فقط سیگنال کانال۲ قابل‌مشاهده می‌باشد. در حالتی که روی DUAL تنظیم‌شده باشد شکل موج هر دو کانال هم‌زمان روی صفحه‌ی نمایش قابل‌مشاهده می‌شود. هم‌چنین در حالت ADD حاصل جمع لحظه‌ای دو شکل موج روی صفحه‌نمایش داده می‌شود.

CHOP- ALT: اگر فرکانس سیگنال‌های ورودی بیشتر از یک کیلوهرتز باشد با استفاده از حالت ALT می‌توانیم دو شکل موج را به‌طور هم‌زمان در صفحه‌ی نمایش اسیلوسکوپ مشاهده کنیم. اما اگر سیگنال‌های ورودی کم باشد مشاهده‌ی دو شکل موج به‌طور هم‌زمان در این حالت امکان‌پذیر نمی‌باشد. زیرا در این صورت وقتی اسیلوسکوپ سیگنال کانال ۱ را نشان می‌دهد سیگنال کانال ۲ محو می‌شود و برعکس. بنابراین این دو موج به‌صورت چشمک‌زن روی صفحه‌ی نمایش ظاهر می‌شود. برای نمایش سیگنال‌های با فرکانس کم بهتر است از حالت Chop استفاده شود. در این حالت یک نقطه‌ی کوچک از سیگنال کانال۱ نمایش داده می‌شود و سپس یک نقطه‌ی کوچک از سیگنال کانال۲ نمایش داده می‌شود.

X-Y: در حالت انتخاب این کلید، سیگنال ورودی کانال ۱ به صفحات انحراف افقی و سیگنال ورودی کانال ۲ به صفحات انحراف عمودی اعمال می‌شود. از این کلید برای مشاهده‌ی منحنی مشخصه ولت-آمپر عناصر نیمه‌هادی و نیز مشاهده‌ی اشکال لیساژور کاربرد دارد.

Source trigger: این کلید ممکن است دارای حالت‌های زیر باشد:

AC: در این حالت عمل تریگر با مؤلفه‌ی AC انجام می‌شود.

DC: در این حالت عمل تریگر با خود موج به‌اضافه‌ی مؤلفه‌ی DC انجام می‌شود.

CH1: در این حالت عمل تریگر توسط سیگنال اعمال‌شده به کانال ۱ انجام می‌شود.

CH2: در این حالت عمل تریگر توسط سیگنال اعمال‌شده به کانال ۲ انجام می‌شود.

Line: در این حالت عمل تریگر با فرکانس برق شهر انجام می‌شود.

EXT: در این حالت باید موجی را که می‌خواهیم توسط آن عمل تریگر انجام شود از خارج اسیلوسکوپ و توسط ترمینال مخصوص آن به اسیلوسکوپ اعمال کنیم.

اندازه‌گیری اختلاف فاز: با استفاده از اسیلوسکوپ می‌توان اختلاف فاز بین دو موج را به دست آورد.

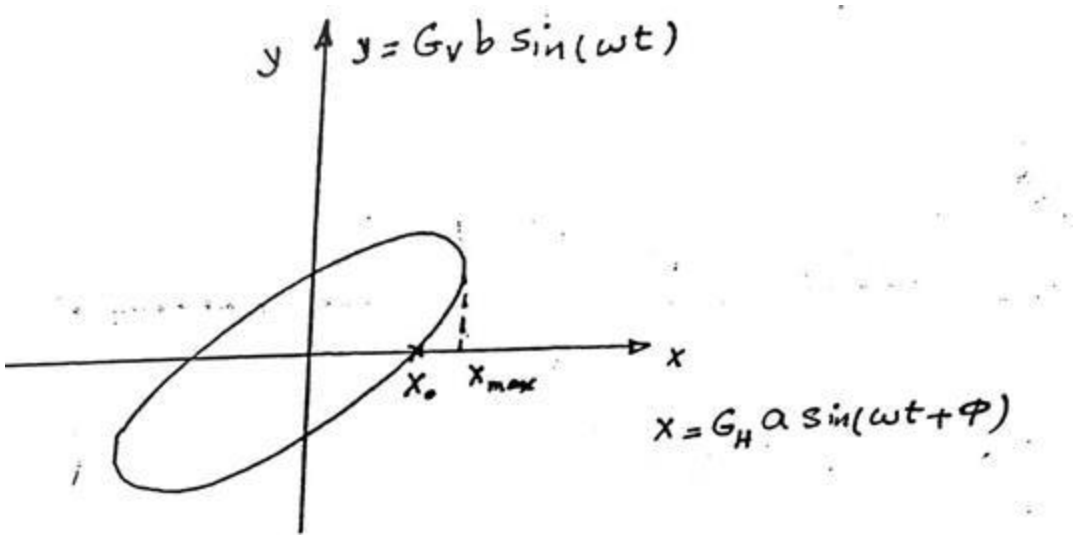
تعیین اختلاف فاز به کمک منحنی‌های لیساژوس:

اگر بخواهیم اختلاف فاز بین $V_1 = a \times \sin(wt + \emptyset)$ و $V_2 = b \times \sin(wt)$ را به دست آوریم سلکتور time/div را در وضعیت x-y قرار داده و کانال یک را به v1 و کانال ۲ را به منبع v2 وصل نمایید، بدین ترتیب نقطه‌ی نورانی روی صفحه‌ی اسیلوسکوپ در جهت محور xها و yها حرکت خواهد داشت که از رابطه‌ی زیر پیروی می‌کند.

$$X = G_H \times a \times \sin(wt + \emptyset)$$

$$Y = G_V \times b \times \sin(wt)$$

که G_H و G_V به ترتیب بهره‌های مربوط به تقویت‌کننده‌های افقی و قایم اسیلوسکوپ هستند. اگر قبل از وارد ساختن سیگنال‌ها نقطه‌ی نورانی را در مرکز صفحه قرار دهیم، بعد از اعمال ولتاژهای v1,v2 مکان نقطه‌ی نورانی یک بیضی خواهد بود که مرکز آن در وسط صفحه است. حال می‌توان اختلاف فاز بین این دو موج یعنی $\emptyset$ را به دست آورد. فرض کنید بیضی به‌دست‌آمده بر روی صفحه‌ی اسیلوسکوپ مطابق شکل زیر باشد.در این صورت محل تقاطع بیضی با جهت مثبت محور xها که xo نامیده می‌شود از روی شکل فوق به دست می‌آید.



شکل ۲: تعیین اختلاف فاز

بنابراین در نقطه‌ی x0 می‌توان نوشت:

$$Y = ۰ \rightarrow ۰ = G_V \times b \times \sin(wt) \rightarrow wt = ۰$$

پس:

$$xo = G_H \times a \times \sin(۰ + \emptyset) \rightarrow sin\emptyset = \frac{x_۰}{G_H \times a}$$

و از طرف دیگر Xmax به ازای $\sin(wt + \emptyset)$ = ۱ به دست خواهد آمد که :

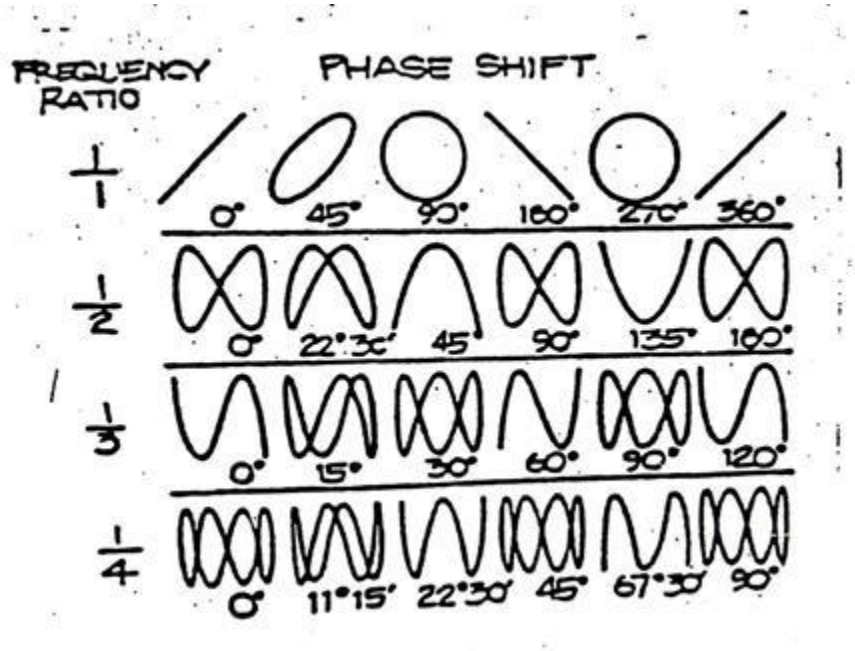
$$\mathrm{Xmax} = G_H \times a$$

درنتیجه:

$$\emptyset = \sin^{-۱} \frac{x_۰}{Xmax}$$

لازم به ذکر است که اندازه‌گیری فوق مستقل از بهره‌های مربوط به انحراف‌های افقی و قایم بوده و تنها به $\emptyset$ بستگی دارد. دیگر این‌که منحنی‌های لیساژوس وقتی به دست می‌آیند که ولتاژهای اعمال‌شده به تقویت‌کننده‌های افقی و

عمودی اسیلوسکوپ هر دو سینوسی و رابطه‌ی هماهنگ باهم داشته باشند. در شکل زیر منحنی‌های لیساژوس را با نسبت فرکانس‌های مختلف ملاحظه می‌کنید.

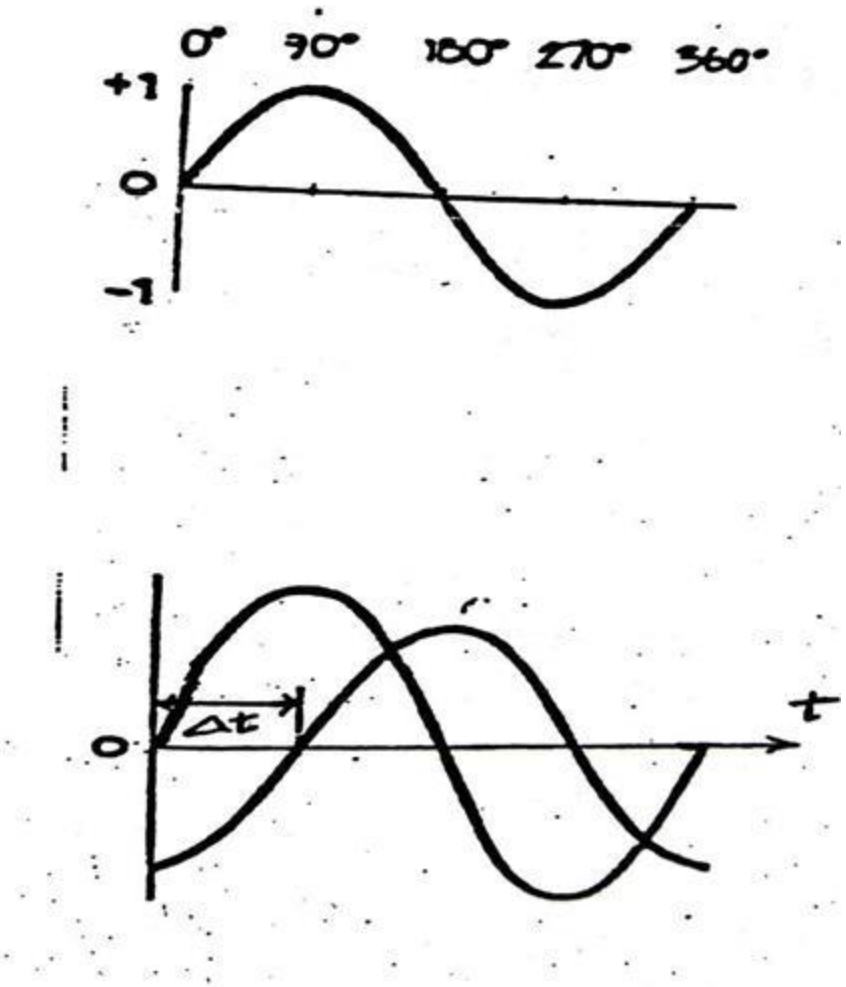


شکل۳: اشکال لیساژوس

تعیین اختلاف فاز با استفاده از اسیلوسکوپ دوکاناله

در این روش v1 را به کانال ۱ اسیلوسکوپ و v2 را به کانال ۲ آن اعمال می‌کنیم و سلکتورهای time/div و volt/div را طوری تنظیم می‌کنیم که در یک دوره‌ی تناوب از هر یک از موج‌ها روی اسیلوسکوپ نمایان باشد. سپس زمان تأخیر یا تقدمی که بین این دوم موج وجود دارد را با استفاده از سلکتور time/div اندازه گرفته و آن را Δt می‌نامیم و به کمک رابطه‌ی زیر اختلاف فاز حساب می‌شود.

$$\emptyset = ۲\pi \times \frac{\Delta t}{t}$$



شکل ۴: تعیین اختلاف فاز

ضمیمه‌ی دوم: آموزش کار با Proteus

پس از ذخیره‌ی نام پروژه و ساخت پروژه و با وارد شدن به محیط اصلی این برنامه منوهایی را مشاهده می‌کنید.

به‌مانند بقیه‌ی برنامه‌ها منوی اصلی در بالای صفحه قرارگرفته است. در این منو گزینه‌هایی برای انجام کارهای اصلی مانند ساخت پروژه‌ی جدید، پرینت کردن شماتیک، ذخیره کردن و ... است. این منو مانند دیگر برنامه‌ها طراحی‌شده است و برای انجام کارهای اساسی مورداستفاده قرار می‌گیرد.

در منوی کاربردی که در زیر منوی اصلی قرارگرفته است ابزارهای بسیار اساسی و کاربردی منوی بالا برای دسترسی سریع‌تر قرارگرفته است.

در سمت چپ صفحه‌ی اصلی مهم‌ترین و کاربردی‌ترین منو برای شبیه‌سازی قرارگرفته است. این منو نیز خود به ۴ قسمت تقسیم‌شده که در این ضمیمه با این ۴ قسمت آشنا می‌شویم.

در پایین‌ترین قسمت این منو گزینه‌های تعیین موقعیت قرار دارد که به‌وسیله‌ی آن‌ها موقعیت‌های قطعات را می‌توان تغییر داد و یا در زوایای موردنظر قرار دارد. هم‌چنین می‌توان به‌وسیله‌ی دو گزینه‌ی آخر آن قطعات را در راستای x و y عکس کرد.

در منوی انتخاب قطعات که در بالاترین قسمت این منو قرار دارد می‌توان با انتخاب گزینه‌ی component mode و سپس فشردن گزینه‌ی P صفحه‌ی pick devices را مشاهده کرد و با توجه به کتاب‌خانه‌های موجود در نسخه‌ی مورداستفاده می‌توان قطعات مختلف را بر اساس نوع و شرکت سازنده و... انتخاب کرد. برای استفاده از مدل‌های استاندارد می‌توان از کتاب‌خانه‌های active و passive استفاده کرد.

پس از انتخاب قطعه‌ی موردنظر می‌توان آن را در قسمت سفیدرنگ مشاهده کرد. با استفاده از موشواره می‌توان یک نمونه از آن را در محیط اصلی قرار دارد.

با دو بار کلیک کردن بر روی قطعه‌ی موردنظر می‌توان ویژگی‌های اصلی آن را مشاهده کرد و هم‌چنین این مشخصات را تغییر داد. برای مثال با جست‌وجوی cap می‌توان خازن معمولی را از کتاب‌خانه‌ی device انتخاب کرد و سپس با قرار دادن آن در صفحه‌ی اصلی و سپس دو بار کلیک بر روی آن نام و ظرفیت آن را تغییر داد. (دقت شود که در حالت component mode باشید.)

هم‌چنین با فشردن کلیک راست بر روی قطعات می‌توانید ویژگی‌های آن‌ها را تغییر بدهید و هم‌چنین مکان و زاویه‌ی آن‌ها را تغییر بدهید.

با انتخاب component mode یا selection mode و سپس قرار دادن موشواره بر روی صفحه‌ی اصلی و قرار دادن آن در کنار قطعات یک مداد قابل‌مشاهده است که به کمک آن می‌توان بین قطعات را سیم‌کشی کرد.

در قسمت terminal mode می‌توان گزینه‌ی زمین را انتخاب کرد و برای زمین مدار از آن استفاده کرد و ground مدار را تعیین کرد.

در این جا ذکر این نکته اساسی است که برای شروع شبیه‌سازی از دکمه‌های پایین صفحه استفاده کرد. نماد play و نماد pause بسیار کاربردی و اساسی است.

در این قسمت به بررسی ژنراتورها می‌پردازیم. این وسایل را در قسمت generator mode می‌توانید پیدا کنید. این منابع شامل منابع DC, sin, pulse,... می‌باشد. در اکثر مواقع از این وسایل به‌عنوان ورودی استفاده می‌شود و به کمک آن‌ها پاسخ مدار بررسی می‌شود.

روش استفاده از این منابع مانند قطعات دیگر است و پس از قرار دادن آن‌ها بر روی صفحه‌ی اصلی می‌توان با دو بار کلیک بر روی آن‌ها نوع منبع و اسم منبع و مقدار آن را معین کرد. انتخاب منابع هم به‌صورت آنالوگ و هم به‌صورت دیجیتال در این قسمت فراهم است.

در منبع سینوسی می‌توان ولتاژ آفست، دامنه‌ی منبع، فرکانس کاری، ولتاژ پیک تا پیک، زمان تناوب، فاز و ... را معین کرد.

در سمت virtual instruments mode می‌توان وسایل اندازه‌گیری مختلف از جمله اسیلوسکوپ، ولت‌متر، آمپر متر و... را مشاهده کرد.

اولین وسیله‌ای که در این منو وجود دارد اسیلوسکوپ است. این وسیله قادر به اندازه‌گیری تا ۲۰ ولت می‌باشد. این وسیله هم امواج DC و هم امواج AC را می‌تواند بررسی کند. فرکانس ورودی آن تا ۲مگاهرتز است. دارای ۴ کانال مجزا می‌باشد. سلکتورهای تنظیم مجزا برای هر کانال فراهم شده است.

قسمت‌های بعدی این منو آمپرمتر و ولت‌متر است. با استفاده از این وسایل شما می‌توانید جریان و ولتاژ مدارهای AC,DC را اندازه‌گیری کنید. ولت‌متر را به‌صورت موازی و آمپرمتر را به‌صورت سری در مدار استفاده کنید.

در نوار ابزار سمت چپ یک نوع ولت‌متر و یک نوع آمپرمتر دیگر نیز وجود دارد. از این دو دستگاه که به‌اصطلاح به آن‌ها پراب گفته می‌شود. از این‌ها برای اندازه‌گیری ولتاژ و جریان قابل‌استفاده است. برای استفاده از این ابزارها از سیم موردنظر استفاده می‌شود.

ضمیمه‌ی سوم: وسایل موردنیاز هر آزمایش

آزمایش اول:

مقاومت‌های ۲/۱، ۱/۸، ۱، ۶/۸ کیلو اهم

۳ مقاومت که به‌صورت دلخواه که توسط استاد انتخاب‌شده است.

۲ پتانسیومتر که به‌صورت دلخواه که توسط استاد انتخاب‌شده است.

مقاومت ۳۳۰ و ۵۶۰ و ۶۸۰ و ۱۸۰۰ اهم

پتانسیومتر ۱ کیلو اهم

آزمایش دوم:

مقاومت ۱۰ کیلو و ۱ کیلو و ۲/۲ کیلو و ۲ کیلو و ۳ کیلو

آزمایش سوم:

مقاومت ۱۰ کیلو و ۱ کیلو و ۲/۲ کیلو و ۲ کیلو و ۳ کیلو

آزمایش چهارم:

IC 741

مقاومت ۲/۲ و ۵/۶ و ۳۳ کیلو اهم

موارد مربوط به ۲ قسمت آخر که قبلاً در پیش گزارش طراحی‌شده

آزمایش پنجم:

مقاومت ۱ کیلو و ۲۲ کیلو و

خازن ۰/۳۳ میکرو فاراد و ۰/۰۰۸ میکرو فاراد

سلف‌ها توسط خود استاد به دانشجویان داده می‌شوند و دانشجویان ضمن اندازه‌گیری مقدار آن‌ها با آن‌ها کار خواهد کرد.

آزمایش ششم:

مقاومت ۱ کیلو اهم، ۲۲۰ اهم

سلف ۲/۲ و۱۸ و ۲۵ میلی هانری،

خازن ۱۰ و ۳/۳ نانو فاراد، ۰/۱ میکرو فاراد

آزمایش هفتم:

دیود زنر ۶/۲، 1N4001-8

مقاومت ۲۰ اهم و ۳/۹ کیلو و ۱۰۰ اهم

پتانسیومتر ۲۰ کیلو و ۱ کیلو

آزمایش هشتم:

دیود 1N4148-1N4007- 6v2-

مقاومت ۱۰و۱۲ کیلو اهم، مقاومت ۱/۵ کیلو اهم، مقاومت و۲/۲ و ۱ کیلو اهم، مقاومت ۳۳۰، ۵۵۰ اهم

خازن ۴۷۰ و ۱۰۰ میکرو فاراد

آزمایش نهم:

ترانزیستور bc107-bc 108 -2N3906- 2N3904

مقاومت ۱کیلو و ۳۳ کیلو و ۱ مگا اهم و ۸۲ کیلو و ۵/۶ کیلو و ۸۲۰ اهم و ۱۰۰ کیلو و ۱۰۰ اهم و ۱۲ کیلو و ۴۷۰ اهم و ۲/۲ کیلو و ۵۶ کیلو و

خازن ۲۲ میکرو فاراد و ۱ میکرو فاراد و ۱۰ میکرو فاراد

LED

آزمایش دهم:

پتانسیومتر ۱کیلو اهم

دو عدد مقاومت ۱۰۰کیلو اهم

Cd4007

منابع

1- P. Sherz and S. Monk, Practical electronics for inventors, 4th edition, McGraw-Hill, 2016.

2- D. Schilling and C. Belove, Electronic circuits, 2nd edition, McGraw-Hill, 1984.

3- R. Smith, Circuits, Devices and Systems, 3rd edition, WILEY, 1976.

۴- مبانی الکترونیک، ع. میرعشقی، ویرایش دوم، شیخ‌بهایی، ۱۳۹۴.

۵- مدارهای الکتریکی، ک. زرگر، چاپ پانزدهم، پوران پژوهش، ۱۳۹۳.

۶- اصول الکترونیک، م. موسوی، ا. برزآبادی، ویرایش اول، دانشگاه اصفهان، ۱۳۸۱.

۷- الکترونیک، ت. فلوید، ویرایش هفتم، نص، ۱۳۸۵.