

بسمه تعالی

دانشگاه آزاد اسلامی



واحد علوم و تحقیقات

دانشکده: مهندسی برق و کامپیوتر

گروه: مهندسی برق

دستور کار:

آزمایشگاه الکترونیک ۱

❖ مقررات آزمایشگاه

۱- آزمایشگاه الکترونیک ۱ در زمان ۲ ساعته برگزار می‌شود. با توجه به زمان محدود هر آزمایش و به منظور ایجاد نظم، لازم است کلیه دانشجویان راس ساعت مقرر در آزمایشگاه حضور یابند. حداکثر تاخیر مجاز ۱۰ دقیقه بوده و پس از آن غیبت منظور خواهد شد.

۲- حداکثر تعداد غیبت مجاز یک جلسه با کسر نمره آزمایش مربوطه است. بنابراین غیبت بیش از یک جلسه باعث حذف درس دانشجو خواهد شد.

۳- دانشجویان به گروه‌های ۲ نفره (یا در شرایط خاص حداکثر ۳ نفره) تقسیم خواهند شد. گروه‌بندی دانشجویان در طی ترم قابل تغییر نبوده لذا در انتخاب هم‌گروهی دقت نمایید.

۴- ارزشیابی نهائی بر اساس جدول زیر خواهد بود:

مؤلفه ارزیابی	کیفیت کار عملی	پیش‌گزارش	گزارش کار	امتحان تئوری	امتحان عملی
نمره	۴	۲/۵	۷/۵	۳	۳

۵- کیفیت کار عملی شامل تسلط بر انجام آزمایش، نظم، توانایی و استقلال در رفع ایرادها و مشکلات و موفقیت در انجام کامل هر آزمایش است.

۶- لازم است گروه‌ها قبل از انجام هر آزمایش دستور کار را به دقت مطالعه کرده و پیش‌گزارش آن را ارائه کنند. در صورت عدم ارائه پیش‌گزارش مجاز به انجام آزمایش نبوده و نمره آن آزمایش کسر خواهد شد.

۷- مهلت مجاز برای تحویل گزارش کار حداکثر یک هفته پس از انجام آزمایش است. به ازای هر هفته تاخیر ۵۰٪ از نمره آن آزمایش کسر خواهد شد.

۸- دانشجویان موظفند پس از اتمام آزمایش میز کار را مرتب کرده و تجهیزات و قطعات مورد استفاده را در محفظه مخصوص قرار دهند.

۹- دانشجویان در حفظ، نگهداری و کاربرد صحیح تجهیزات آزمایشگاه دقت نمایند.

❖ پیش‌گزارش و گزارش کار

۱- پیش‌گزارش باید شامل مقدمه‌ای در خصوص نحوه انجام آزمایش، طراحی مقادیر عناصر مدار در صورت لزوم، دانلود برگه مشخصات (Data sheet) قطعات الکترونیکی آزمایش (دیودها و ترانزیستورها) و شبیه‌سازی تمامی مدارهای آزمایش با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی مانند PSPICE باشد.

۲- گزارش کار باید شامل موارد زیر باشد:

- شرح مختصری از نحوه انجام آزمایش و بیان اهداف آزمایش
- محاسبات تئوری تمام مدارات آزمایش
- نتایج عملی آزمایش
- مقایسه نتایج تئوری، شبیه‌سازی و عملی و نتیجه‌گیری
- پاسخ به سوالات مطرح شده در دستور کار

۳- در تحویل گزارش به نکات زیر توجه کنید.

- به جز نتایج شبیه‌سازی مابقی گزارش کار باید دست‌نویس باشد.
- بخش‌های مختلف گزارش با عناوین مناسب از یکدیگر مجزا شوند.
- فرمولها و محاسبات انجام شده با جزئیات بیان شوند.
- برای نتایج عملی و تئوری (هر دو بروی یک نمودار) فقط از کپی نمودارهای شطرنجی دستور کار که در جلسه آزمایش تکمیل شده و به تایید استاد آزمایشگاه رسیده باشد، استفاده نمایید
- صفحه نخست گزارش کار به صورت زیر باشد:

آرم دانشگاه آزاد
واحد علوم و تحقیقات
دانشکده برق و کامپیوتر
نیمسال تحصیلی:

نام و شماره آزمایش:

۴	آزمایش ۱: «آشنایی با دیود و مدارهای آن»
۱۰	آزمایش ۲: «بررسی یکسوکننده‌های نیم‌موج»
۱۶	آزمایش ۳: «بررسی یکسوکننده تمام موج و مدارهای صافی»
۲۲	ضمیمه آزمایش ۳: «روابط مربوط به رپل خروجی صافی π در یکسوکننده‌ها»
۲۵	آزمایش ۴: «کاربردهای دیود: خازن پرش یا ذخیره کننده DC و چند برابرکننده ولتاژ»
۲۹	آزمایش ۵: «آشنایی با ترانزیستور و منحنی‌های مشخصه آن»
۳۶	ضمیمه آزمایش ۵: «منحنی‌نگار (Curve Tracer)»
۳۸	آزمایش ۶: «تثبیت کننده‌های ولتاژ»
۴۲	آزمایش ۷: «آشنایی با بایاس ترانزیستور در تقویت کننده امپتر مشترک»
۴۶	آزمایش ۸: «آشنایی با تقویت کننده کلکتور مشترک (امپتر پیرو)»
۴۹	آزمایش ۹: «بررسی تقویت کننده‌های عملیاتی»

❖ آزمایش ۱

«آشنایی با دیود و مدارهای آن»

هدف: دیودها دارای انواع گوناگونی هستند و نقش بسیار مهمی را در صنایع الکترونیک ایفاء می‌کنند. در این آزمایش با مشخصه‌های استاتیکی دیودهای معمولی و زئر آشنا می‌شویم. همچنین یک نمونه از کاربردهای آن را مورد بررسی و آزمایش قرار می‌دهیم.

وسایل مورد نیاز:

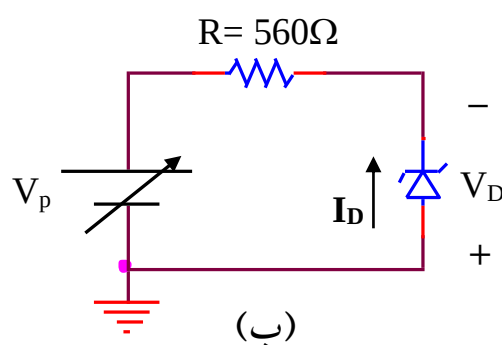
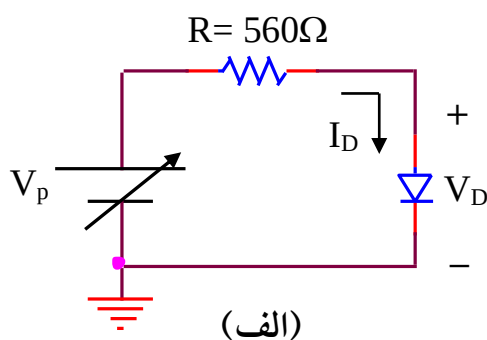
- ۱- اسیلوسکوپ
- ۲- مولد سیگنال: ۱ دستگاه
- ۳- منبع تغذیه DC ۱۵ ولتی: ۱ دستگاه
- ۴- برد بُرد: ۱ عدد
- ۵- مولتی متر دیجیتال: ۱ دستگاه
- ۶- دیود معمولی: ۲ عدد
- ۷- دیود زئر 3.3 V: ۱ عدد
- ۸- مقاومت‌های $(470, 560(0.5w), 1k, 10k, 18k, 100k, 1M) \Omega$
- ۹- خازن‌های $F (0.1\mu, 1\mu)$

نحوه آزمایشات:

آزمایش (۱): رسم منحنی مشخصه دیود معمولی و زئر به روش نقطه‌یابی

مدار شکل ۱-۱ الف برای بدست آوردن مشخصه دیود معمولی و مدار شکل ۱-۱ ب برای یافتن مشخصه دیود زئر در نظر گرفته شده است.

۱-۱- سرهای آند و کاتد دیود معمولی و زئر را توسط مولتی‌متر مشخص کنید. سپس مدارهای شکل ۱-۱ را به ترتیب بروی بُرد بسته و با تغییر دادن منبع تغذیه DC، ولتاژ و جریان دیودها را تغییر داده و با ثبت نقاط آزمایش، منحنی مشخصه دیودها را بدست آورید [شکل‌های ۱-۵ و ۱-۶].



شکل ۱-۱

تذکر ۱: برای اندازه‌گیری ولتاژ و جریان دیودها از مولتی‌متر دیجیتال استفاده نمایید.
تذکر ۲: در ناحیه خمیدگی مشخصه‌ها نقاط بیشتری را برای دقیق‌تر شدن منحنی مشخصه انتخاب کنید.

تذکر ۳: برای دیود زنر فقط منحنی مشخصه ناحیه بایاس معکوس را بدست آورید.

۱-۲- مقاومت دینامیکی دیود معمولی را در جریان 6mA حساب کرده و با آنچه که از منحنی مشخصه بدست می‌آورید، مقایسه کنید.

۲-۳- با توجه به منحنی مشخصه بدست آمده برای دیود زنر مقاومت دینامیکی آنرا در نقطه $V_z = 3.3\text{V}$ بدست آورید.

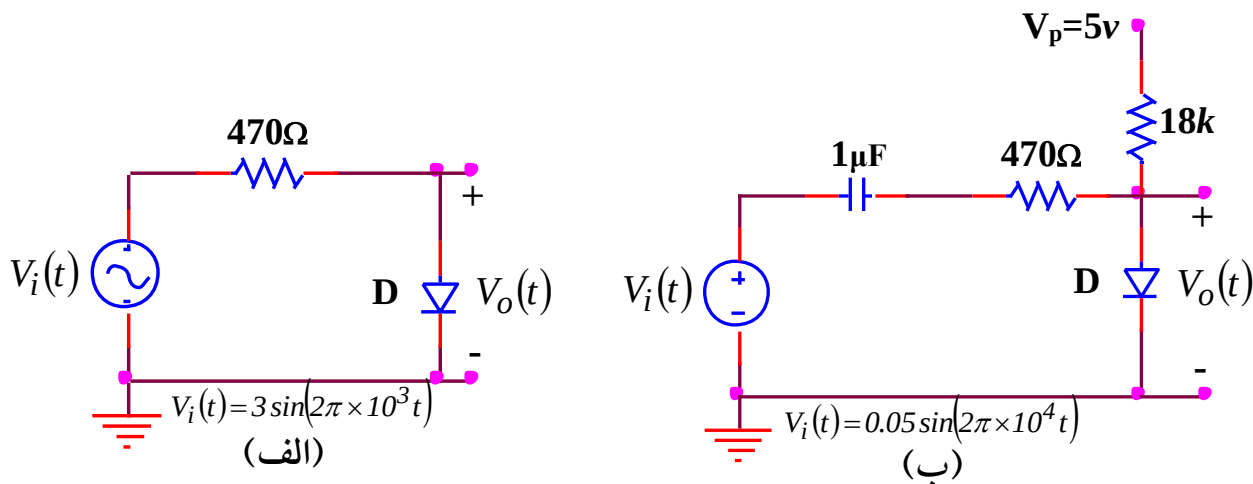
آزمایش (۲): عملکرد دیود برای سیگنال‌های کوچک^۱ و بزرگ^۲

در این قسمت رفتار دیود را برای سیگنال‌های کوچک و بزرگ مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۲-۱- مدار شکل ۱-۲-الف را بروی بُرد بسته و ولتاژ دو سر دیود را توسط اسیلوسکوپ با کوپلاژ DC مشاهده و رسم کنید [شکل ۱-۷].

۲-۲- مدار شکل ۱-۲-ب را بروی بُرد بسته و در حالتی که کوپلاژ اسیلوسکوپ در وضعیت AC قرار گرفته است، مؤلفه AC سیگنال خروجی را مشاهده و دامنه آنرا اندازه‌گیری کنید. حال مؤلفه AC ولتاژ خروجی را محاسبه و با آنچه که اندازه‌گیری شده مقایسه کنید.

1. Small signal
2. Large signal



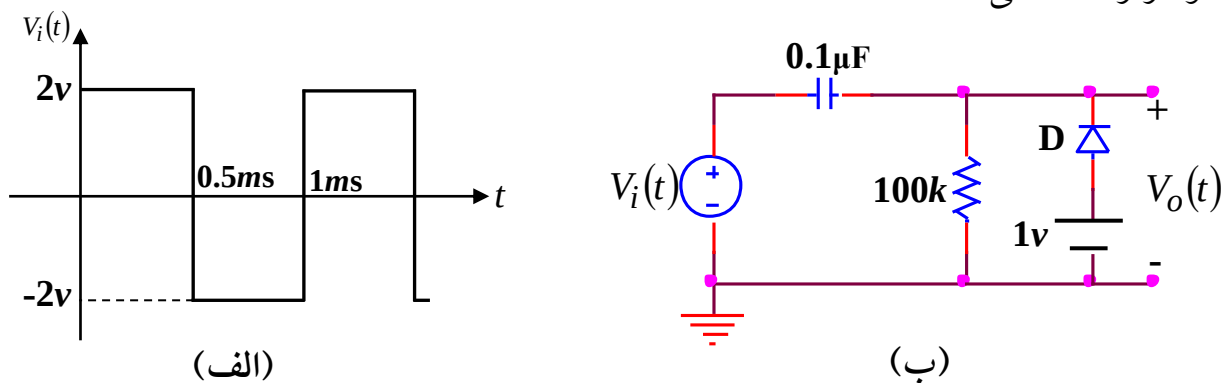
شکل ۱-۲

۲-۳- ولتاژ V_p را ۲ ولت قرار داده، بخش ۲-۲ را تکرار کنید. تغییرات دیده شده را توجیه کنید.

۲-۴- علت قرار گرفتن خازن $1\mu F$ را در مدار شکل ۱-۲-ب بیان کنید.

آزمایش (۳): کاربرد دیود در مدارهای کلمپ

دیودها کاربردهای متنوعی دارند. برای آشنایی بیشتر با این کاربردها در این قسمت یک نوع از این مدارها را مورد آزمایش و بررسی قرار می‌دهیم. شکل ۱-۳ یک مدار تغییر سطح دهنده^۱ ولتاژ را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۳: مدار کلمپر

۳-۱- مدار شکل ۱-۳ را بروی بُرد بسته و شکل موج خروجی را توسط اسیلوسکوپ (کوپلاژ DC) مشاهده و رسم نمایید [شکل ۱-۸].

۳-۲- نقش خازن $0.1\mu F$ را در مؤلفه DC بیان کرده و شکل موج را توجیه کنید.

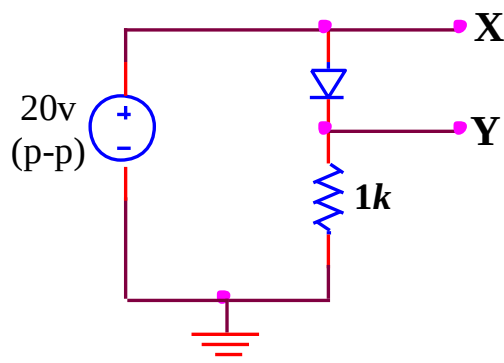
۳-۳- مقاومت $100k\Omega$ را یکبار با $1k\Omega$ و بار دیگر با $1M\Omega$ تعویض کرده و اثر آنرا بروی شکل موج خروجی بررسی نموده و شکل موج‌های خروجی را رسم کنید [شکل ۱-۹].

آزمایش (۴): مشاهده مشخصه دیود بروی اسیلوسکوپ

۴-۱- مدار شکل ۴-۱ را بروی بُرد بسته و نقاط X و Y را به ترتیب به ورودی‌های X و Y اسیلوسکوپ متصل کنید و شکل موج حاصل را رسم کنید.

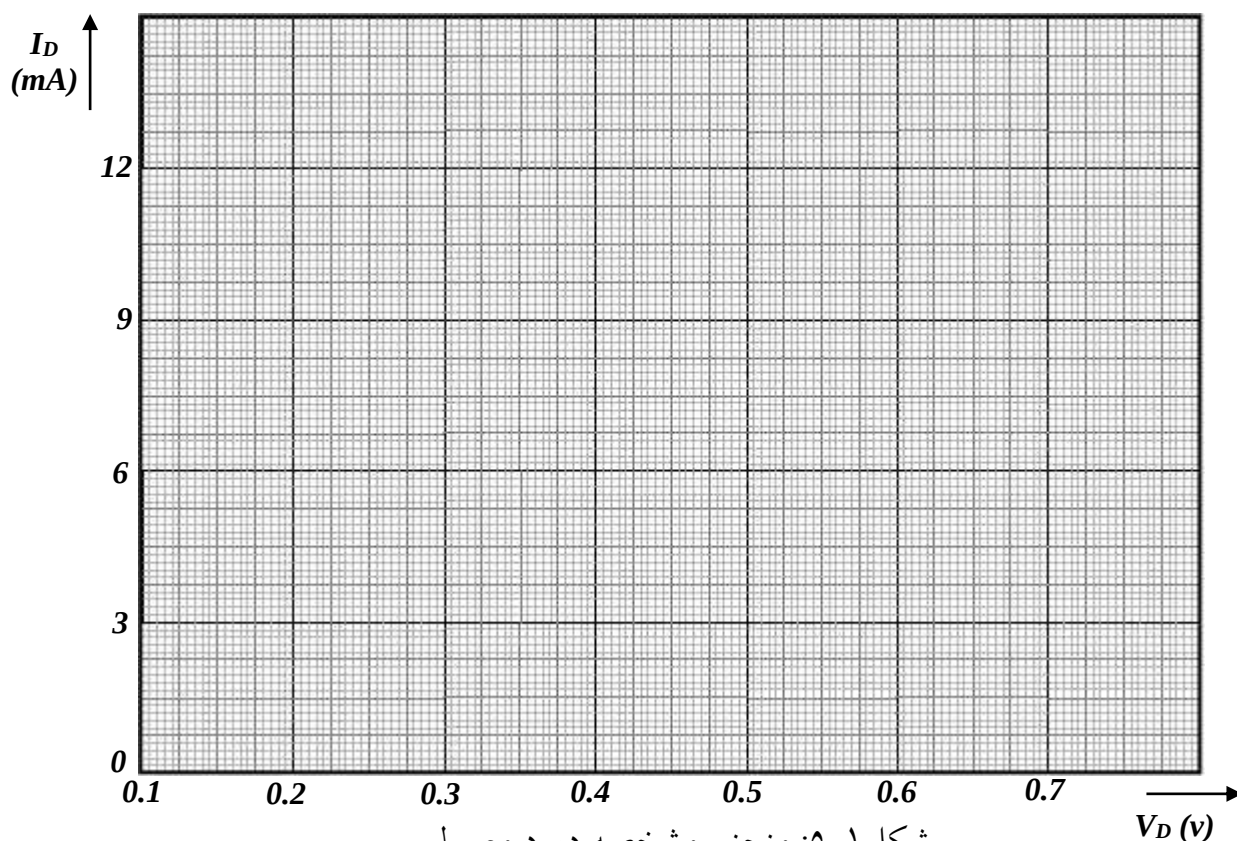
۴-۲- در مورد نحوه عملکرد این مدار توضیح دهید.

۴-۳- به غیر از شکل موج سینوسی چه شکل موج‌های دیگری می‌توان به این مدار متصل کرد و همین نتیجه را گرفت؟

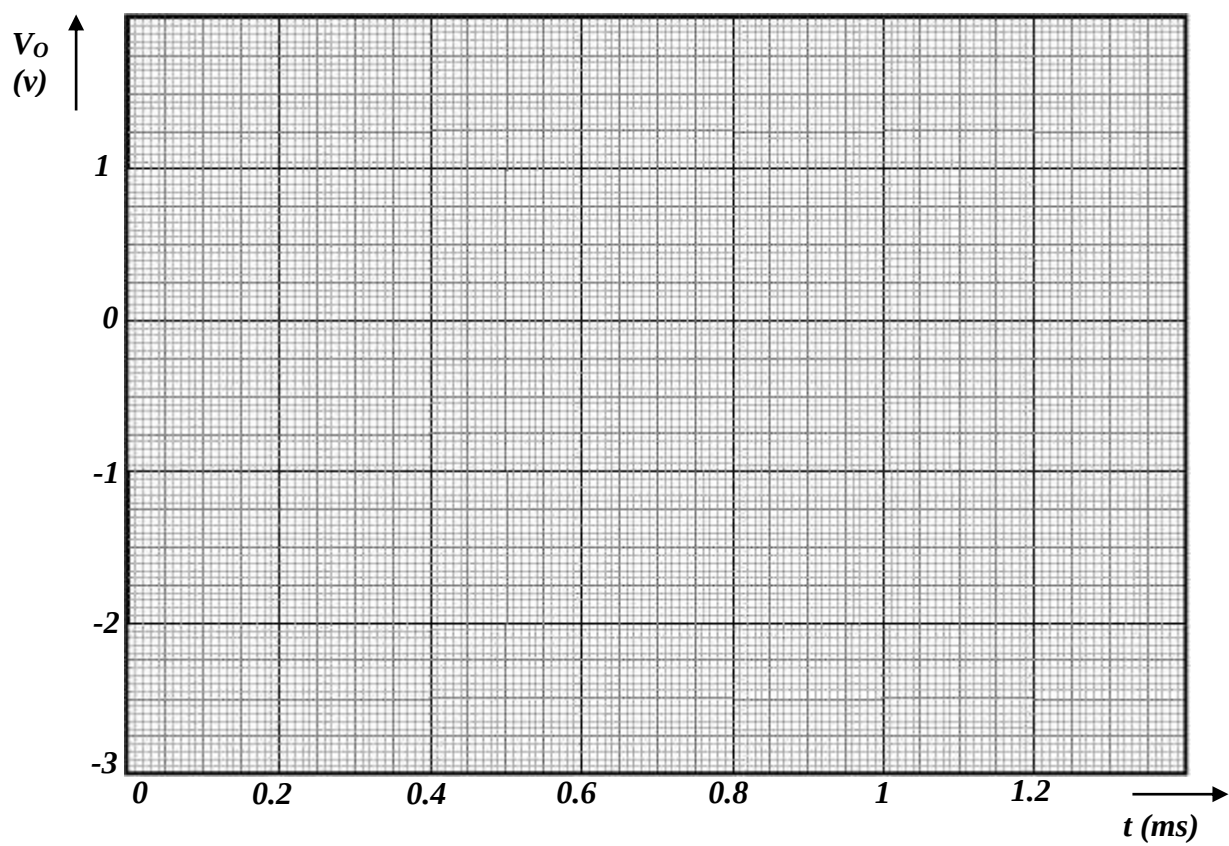
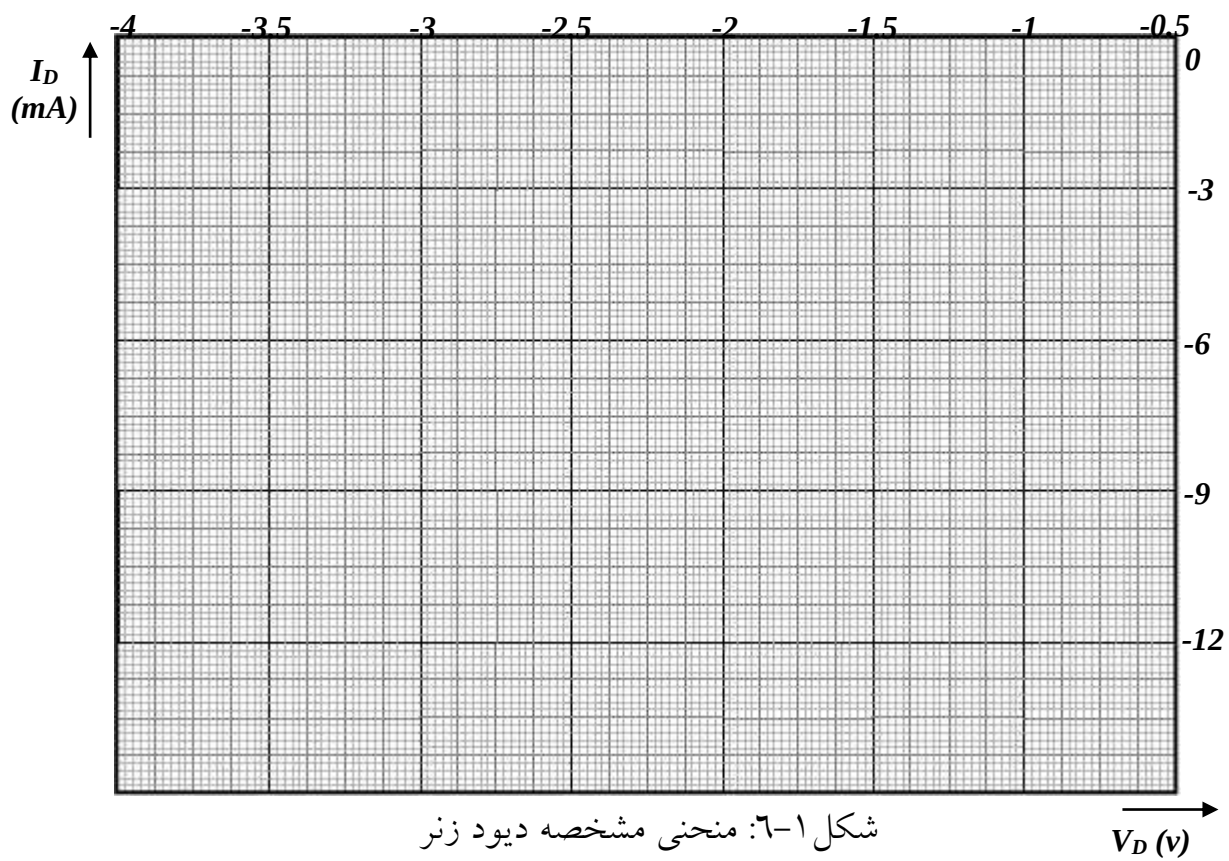


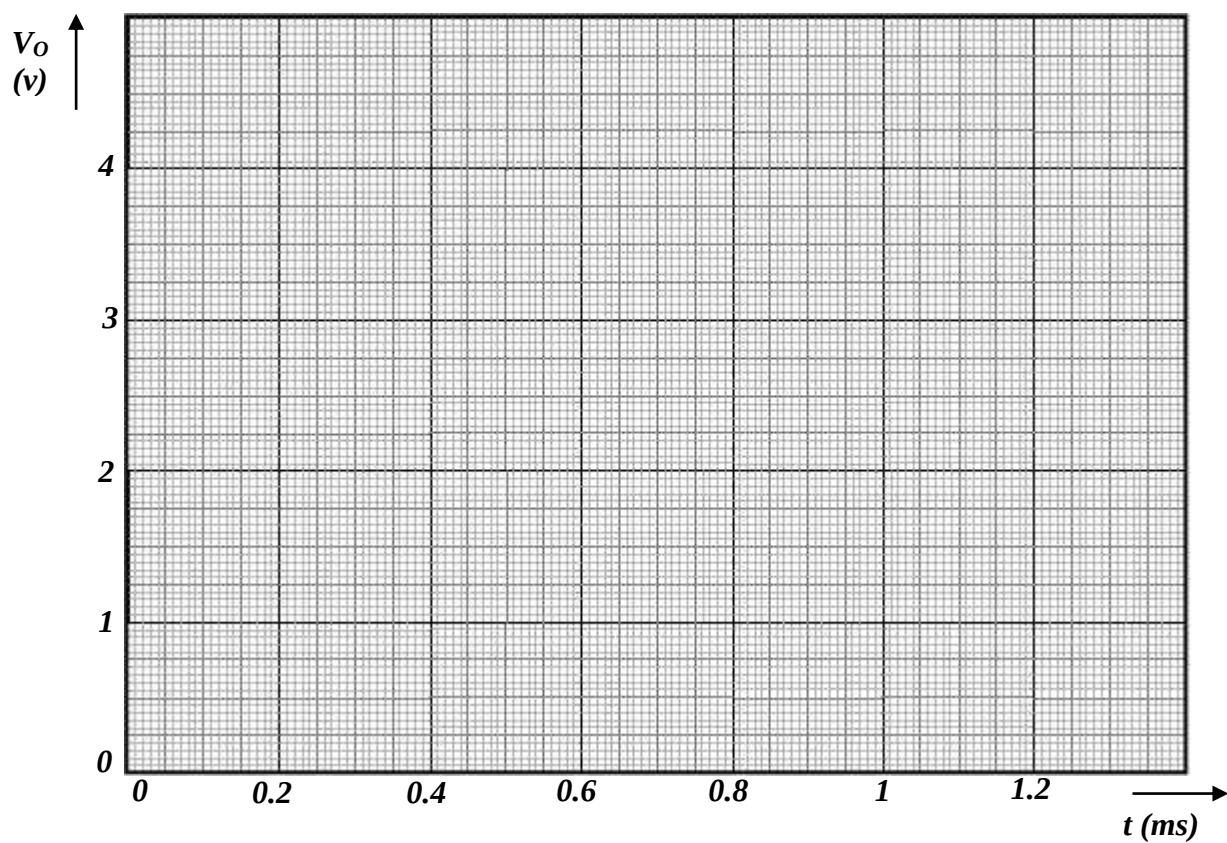
شکل ۴-۱

۴-۴- دیود زنر را جایگزین دیود معمولی کرده و آزمایش را تکرار کنید.

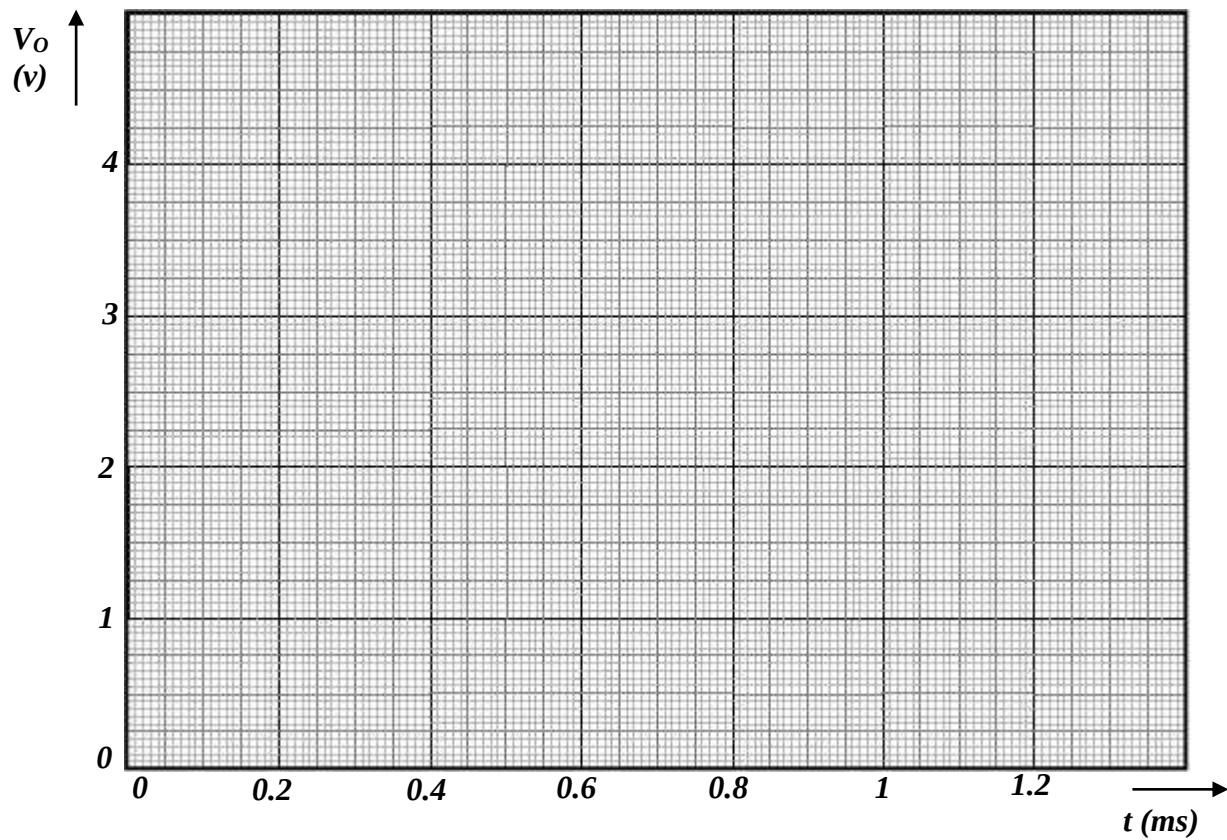


شکل ۵-۱: منحنی مشخصه دیود معمولی





شکل ۱-۸: پاسخ مدار کلمپر به ورودی مربعی



شکل ۱-۹: شکل موج‌های خروجی مدار کلمپر با مقاومت‌های $1M$ و $1k$

❖ آزمایش ۲

«بررسی یکسوکننده‌های نیم‌موج»

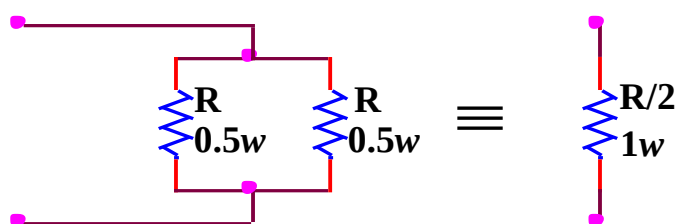
هدف: یکی از کاربردهای مهم دیودها استفاده از آن در یکسوکننده‌های ولتاژ است. در این جلسه یکسوکننده نیم‌موج ولتاژ به‌مراه مدار صافی معرفی و مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج عملی با محاسبات تئوری مقایسه می‌شوند.

وسایل مورد نیاز:

- ۱- اسیلوسکوپ: ۱ دستگاه
- ۲- مولتی‌متر دیجیتال: ۱ عدد
- ۳- ترانسفورماتور 220v/6v (300mA): ۱ عدد
- ۴- برد بُرد: ۱ عدد
- ۵- پتانسیومتر $1k\Omega$: ۱ عدد
- ۶- دیود معمولی: ۱ عدد
- ۷- مقاومت‌های $(2 \times 100(0.5w)) \Omega$
- ۸- خازن $470\mu F$

نحوه آزمایشات:

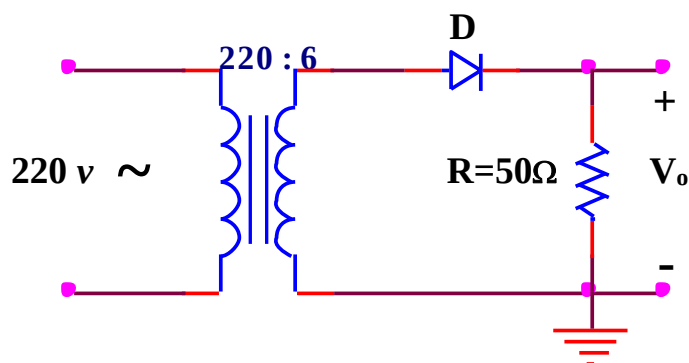
تذکر: در آزمایشات این جلسه بدلیل تلف شدن توان زیاد در مقاومت بار (R) اگر مقاومت با توان بالا در اختیار نداشتید، از ترکیب دو مقاومت موازی بصورت شکل ۲-۱ استفاده کنید.



شکل ۲-۱ اجزاء مقاومت بار

آزمایش (۱): یکسوکننده نیم موج

- ۱-۱- مدار شکل ۲-۲ را بروی بُرد بسته، ولتاژ V_o را در حالت‌های بی‌باری و بار R ، توسط اسیلوسکوپ یکبار با کوپلاژ DC و بار دیگر با کوپلاژ AC مشاهده و رسم کنید [شکل ۲-۶ و ۲-۷].



شکل ۲-۲

توجه ۱: اعوجاج مشاهده شده بروی اسیلوسکوپ در کوپلاژ AC بعلت ایده‌آل نبودن هسته ترانسفورماتور و اعوجاج در برق شهر است.

توجه ۲: در حالت بایاس معکوس دیودها جریان بسیار کوچکی از آنها عبور می‌کند.

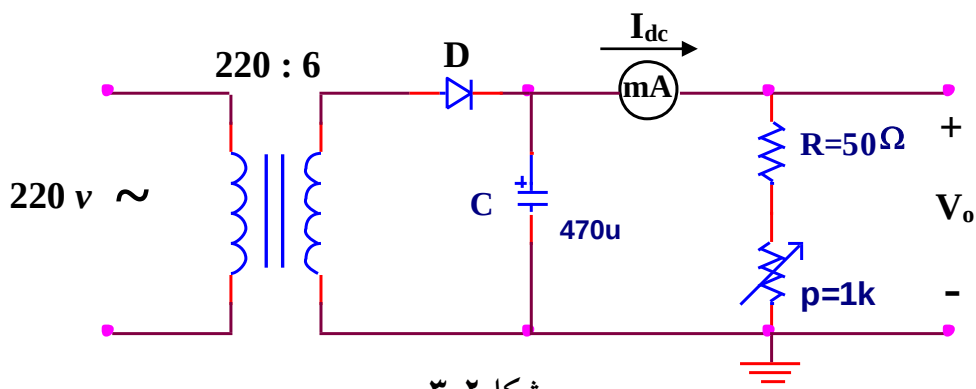
توجه ۳: در هنگام اندازه‌گیری شکل موج توسط اسیلوسکوپ، پروب در وضعیت X1 قرار داده شود.

آزمایش (۲): یکسوکننده نیم‌موج با صافی (فیلتر) خازنی

۲-۱- مدار شکل ۲-۳ را بروی بُرد بسته و ولتاژ DC خروجی (V_{dc}) و ولتاژ ریپل (V_{r-p-p}) را بر حسب جریان I_{dc} بدست آورید [جدول ۲-۱].

تذکره ۱: پایه‌های خازن شیمیایی $470\mu F$ را بطور صحیح در مدار قرار دهید و ولتاژ قابل تحمل آن باید از دامنه ولتاژ خروجی ترانس بیشتر باشد.

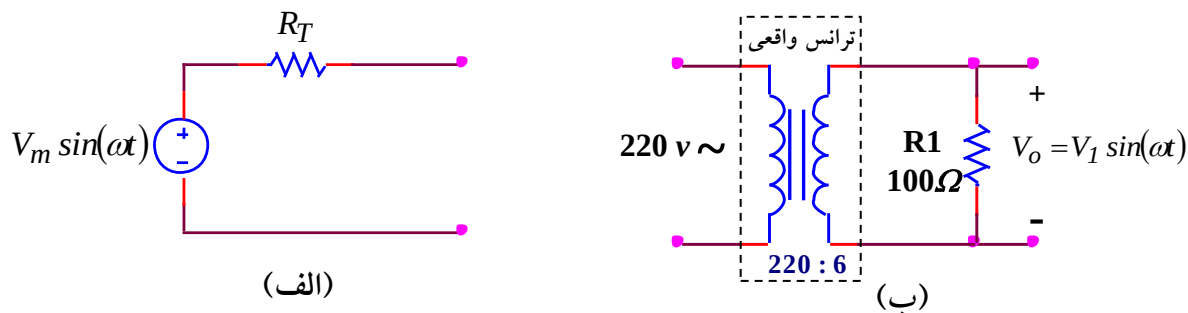
تذکره ۲: برای حالت $I_{dc}=0$ در شکل ۲-۳ پتانسیومتر را از مدار باز کنید.



شکل ۲-۳

۲-۲- منحنی مشخصه $V_{dc}-I_{dc}$ و $V_{r-p-p}-I_{dc}$ که از نتایج تئوری و عملی بدست می‌آیند را ترسیم کرده و با یکدیگر مقایسه کنید [جدول ۲-۱ و شکل‌های ۲-۸ و ۲-۹].

تذکره ۳: سیم پیچ اولیه و ثانویه ترانسفورماتورهای واقعی دارای مقاومت و اندوکتانس پراکندگی هستند. در انجام محاسبات مربوط به این آزمایش می‌توان ثانویه ترانس را به صورت شکل ۲-۲-۴ الف مدل کرد. V_m و R_T را می‌توان توسط آزمایشات ساده‌ای بدست آورد. برای بدست آوردن V_m کافی است که دامنه ولتاژ دو سر ثانویه ترانسفورماتور را در حالت بی‌باری اندازه‌گیری نماییم و برای بدست آوردن R_T از مدار شکل ۲-۴-ب استفاده می‌کنیم.



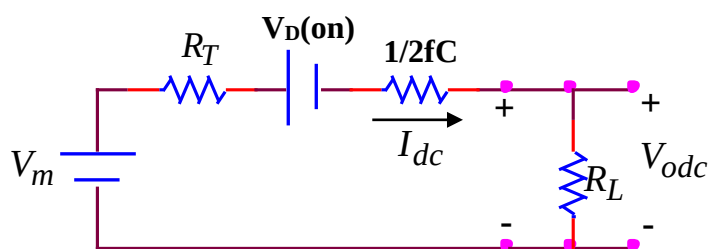
شکل ۲-۴

V_1 دامنه ولتاژ سینوسی دو سر مقاومت 100Ω است. بدین ترتیب می‌توان نشان داد که R_T از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$R_T = \left(\frac{V_m}{V_1} - 1 \right) R_1 \quad (2-1)$$

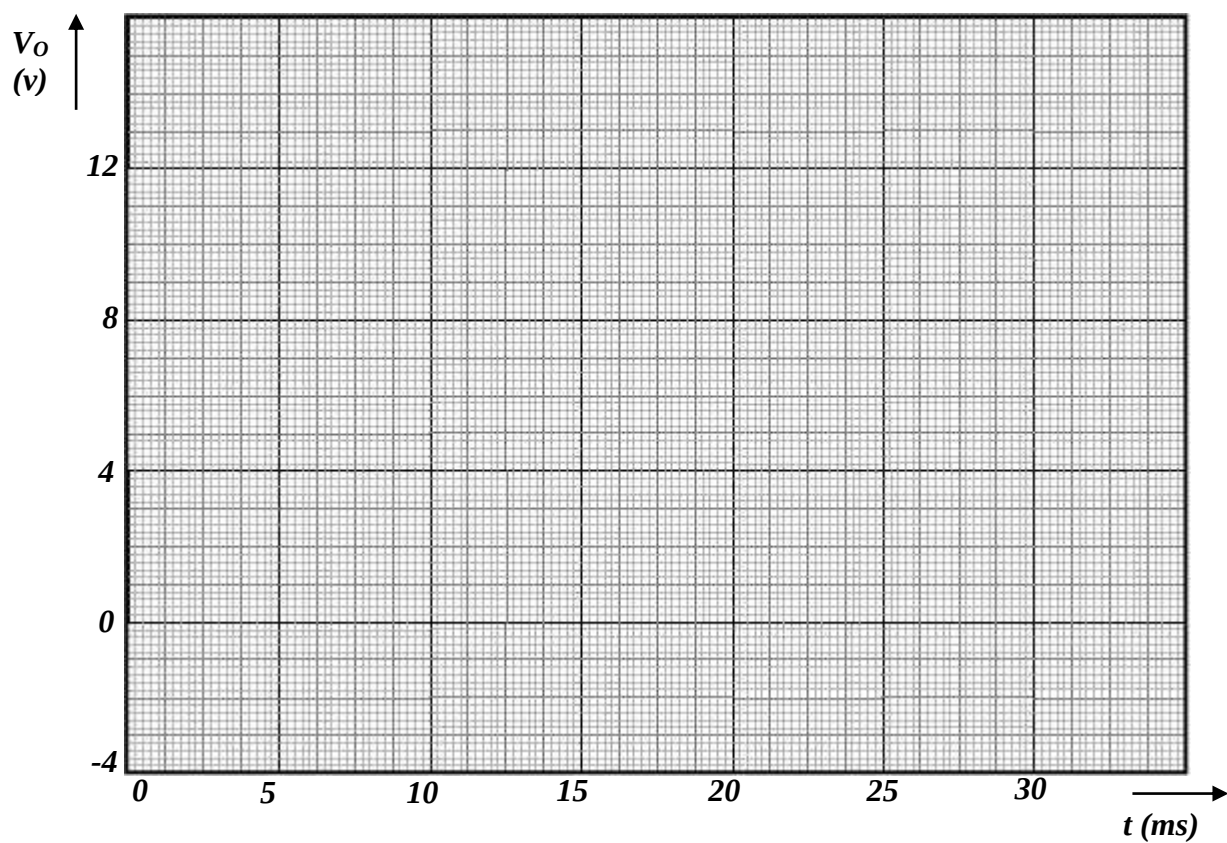
باید توجه داشت که R_T تنها مقاومت DC سیم پیچ ثانویه نیست، بنابراین نمی‌توان با استفاده از اهم‌متر R_T را بدست آورد.

برای بدست آوردن ولتاژ DC خروجی، اگر از مدار معادل یکسوساز نیم موج استفاده کنیم، مدار معادل شکل ۲-۳ از لحاظ DC بصورت شکل ۲-۵ در خواهد آمد. در ضمن $V_{D(on)}$ را حدود $0.6V$ در محاسبات خود در نظر بگیرید.

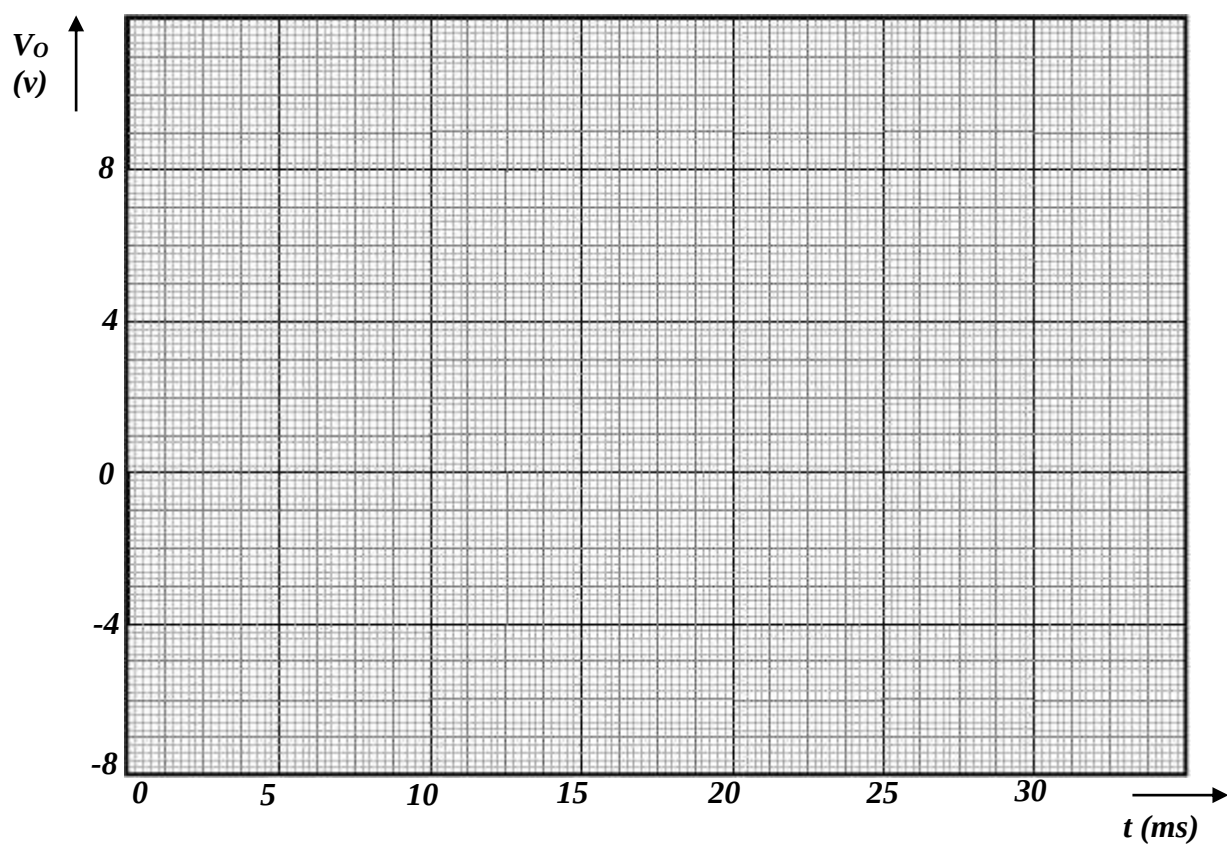


شکل ۲-۵: مدار معادل DC یکسوساز نیم‌موج با صافی خازنی

۲-۳- در مدار شکل ۲-۳ به ازای $I_{dc} = 60mA$ ، شکل موج ولتاژ خروجی را با درج مقادیر مهم رسم نمایید [شکل ۲-۱۰].



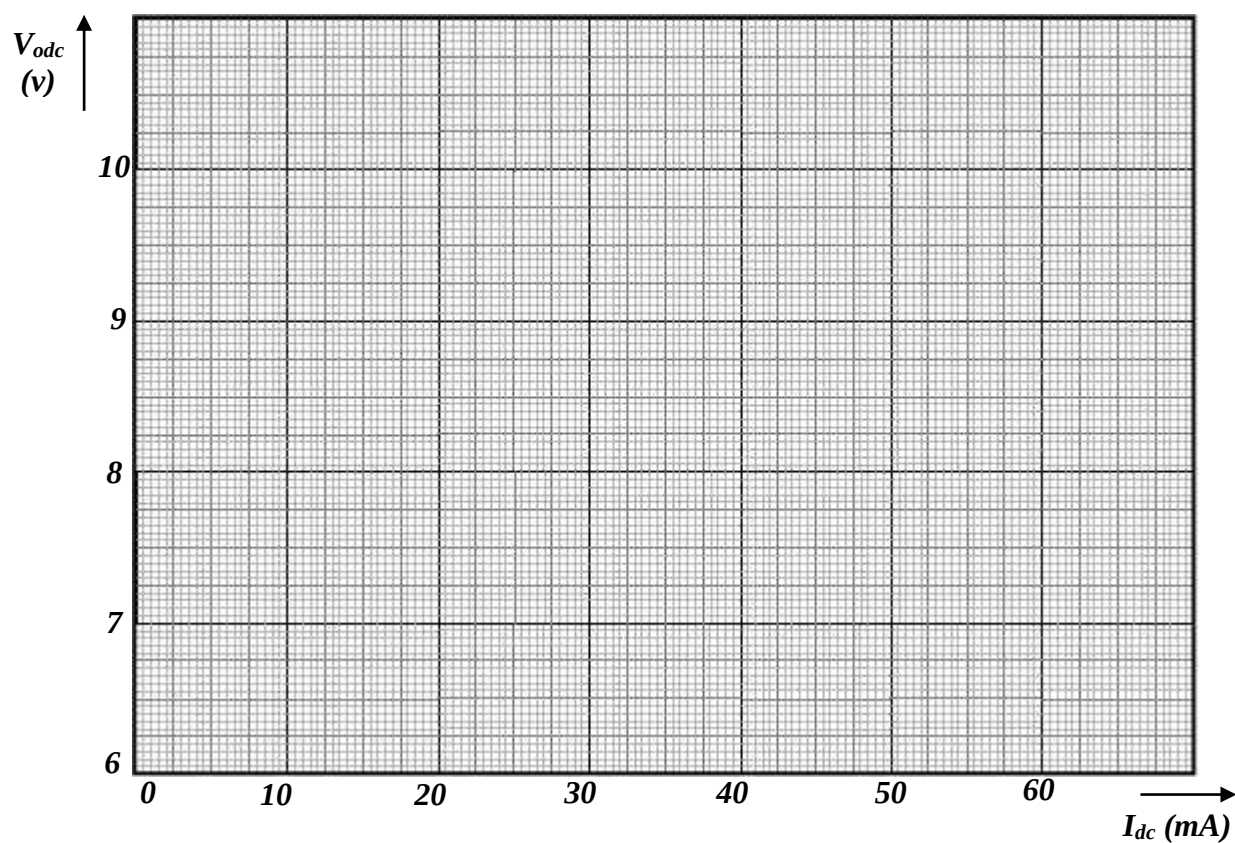
شکل ۲-۶: ولتاژ خروجی مدار شکل ۲-۲ (با کوپلاژ DC اسیلوسکوپ)، $R=50\Omega$ و $R=\infty$



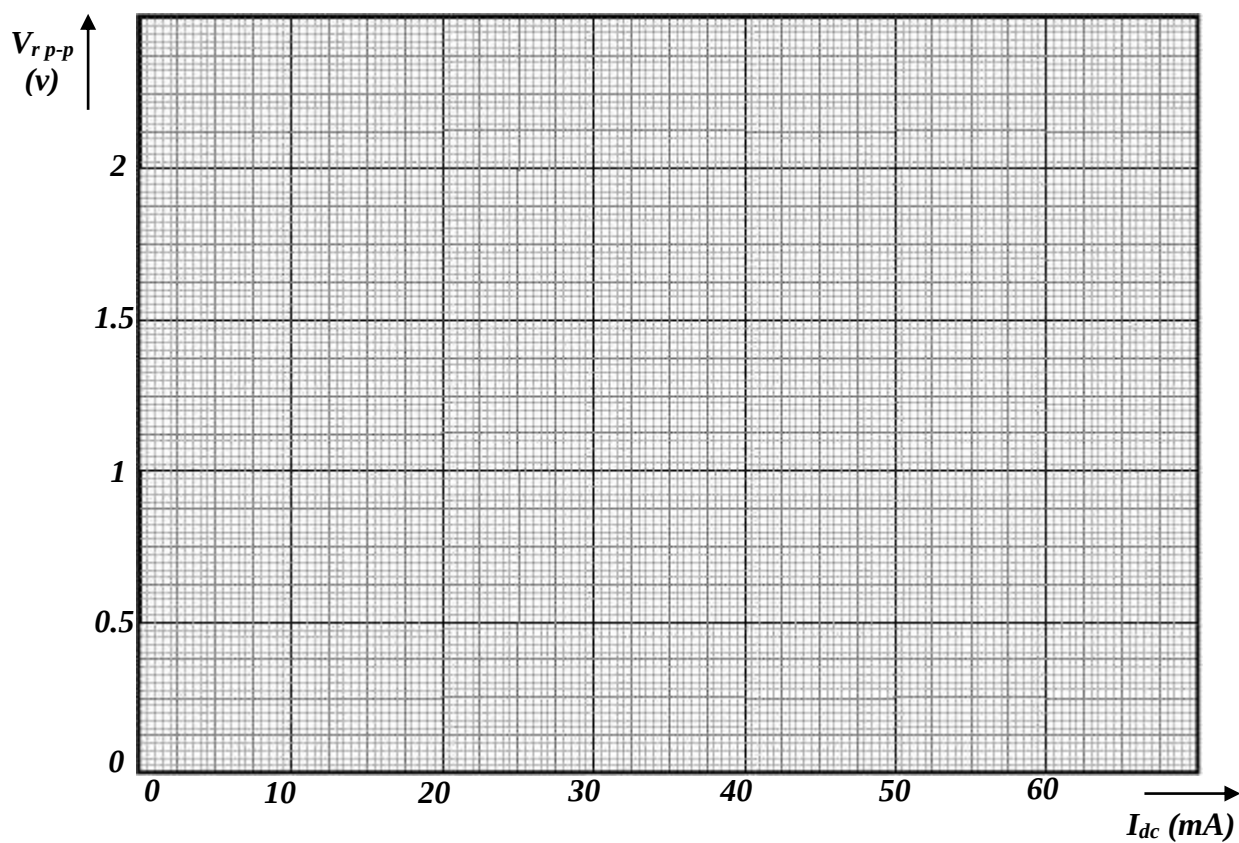
شکل ۲-۷: ولتاژ خروجی مدار شکل ۲-۲ (با کوپلاژ AC اسیلوسکوپ)، $R=50\Omega$ و $R=\infty$

I_{dc}		0 mA	10 mA	20 mA	30 mA	40 mA	50 mA	60 mA
V_{odc}	محاسبه							
	آزمایش							
$V_{r p-p}$	محاسبه							
	آزمایش							

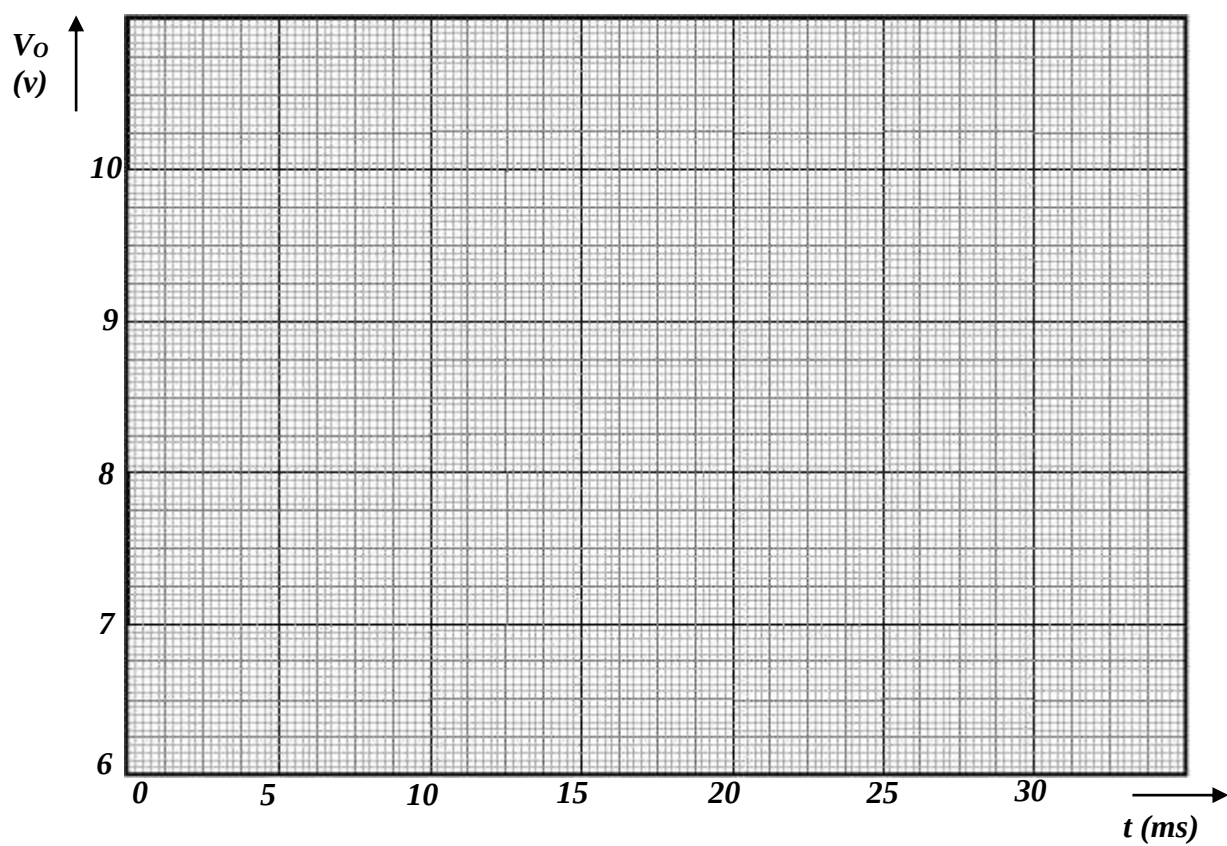
جدول ۱-۲



شکل ۲-۸: منحنی مشخصه V_{odc} - I_{dc} یکسوساز نیم موج



شکل ۲-۹: منحنی مشخصه V_{rp-p} - I_{dc} یکسوساز نیم موج



شکل ۲-۱۰: شکل موج خروجی یکسوساز نیم موج برای $I_{dc} = 60\text{mA}$

❖ آزمایش ۳

«بررسی یکسوکننده تمام موج و مدارهای صافی»

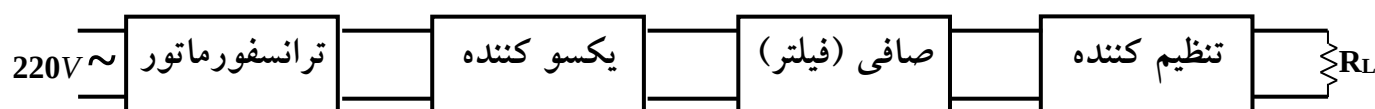
هدف: منابع تغذیه DC دارای کاربردهای بسیار زیادی در صنایع الکترونیک هستند. بدلیل در دسترس بودن منابع ولتاژ AC، معمولاً انرژی الکتریکی مورد نیاز منابع DC توسط این منابع تأمین می‌شود. در جلسه قبل یکسوکننده‌های نیم‌موج مورد بررسی قرار گرفت. در این جلسه یکسوکننده تمام‌موج و همچنین چند نمونه از مدارهای صافی معرفی و مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج عملی با محاسبات تئوری مقایسه می‌شوند.

وسایل مورد نیاز:

- ۱- اسیلوسکوپ: ۱ دستگاه
- ۲- مولتی‌متر دیجیتال: ۱ عدد
- ۳- ترانسفورماتور (300mA) 220V/6V : ۱ عدد
- ۴- برد بُرد: ۱ عدد
- ۵- پتانسیومتر $1k\Omega$: ۱ عدد
- ۶- دیود معمولی: ۴ عدد
- ۷- مقاومت‌های Ω (0.5W) 2×100 (15)
- ۸- خازن‌های F (470 μ , 1000 μ)

نحوه آزمایشات:

در این جلسه با مدار یکسوساز تمام‌موج و بعضی از مدارهای صافی که در ساخت منابع تغذیه DC از منابع AC بکار می‌روند، آشنا می‌شویم. شکل ۱-۳ بلوک دیاگرام کلی سیستم مبدل ولتاژ AC به DC را نشان می‌دهد.

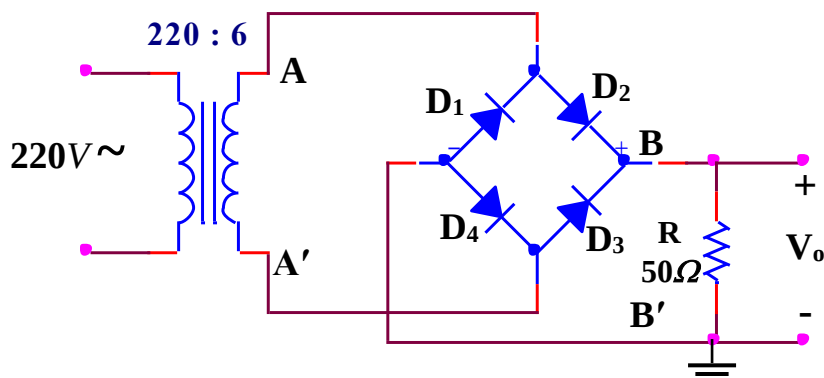


شکل ۱-۳: بلوک دیاگرام کلی مبدل ولتاژ AC به DC

در آزمایشات مربوط به این جلسه به مدارهای تنظیم کننده اشاره‌ای نمی‌شود و در جلسات بعدی این بلوک مورد بررسی و آزمایش قرار می‌گیرد.

آزمایش (۱): بررسی پل یکسوکننده

مدار شکل ۲-۳ یک پل یکسوکننده (یکسوساز تمام موج) را نشان می دهد.



شکل ۲-۳

۱-۱- مدار شکل ۲-۳ را بروی بُرد بسته، ولتاژ V_0 را در حالت های بی باری و برای بار R ، توسط اسیلوسکوپ (کوپلاژ DC) مشاهده و رسم کنید [شکل ۳-۵].

۱-۲- ولتاژ DC خروجی مدار شکل ۲-۳ را توسط ولت متر اندازه گیری کرده و با آنچه که از محاسبه بدست می آید، مقایسه کنید.

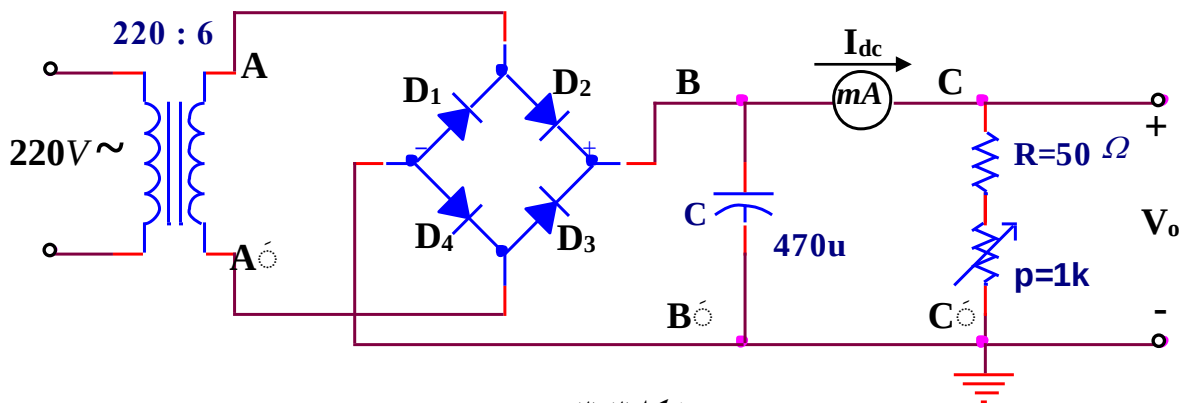
۱-۳- توان مصرفی بار $R=50\Omega$ را محاسبه و با آنچه که در مدار قرار داده شده است، مقایسه کنید.

آزمایش (۲): پل یکسوساز با صافی خازنی

۲-۱- مدار شکل ۳-۳ را بروی بُرد بسته، ولتاژ DC خروجی (V_{dc}) و ولتاژ ریپل (V_{r-p-p}) را بر حسب جریان های مختلف I_{dc} بدست آورید [جدول ۳-۱].

۲-۲- منحنی مشخصه $V_{dc}-I_{dc}$ و $V_{r-p-p}-I_{dc}$ که از نتایج تئوری و عملی بدست می آیند را ترسیم کرده و با یکدیگر مقایسه کنید [جدول ۳-۱ و شکل های ۳-۶ و ۳-۷].

تذکره ۱: برای محاسبات این قسمت مطالبی را که جلسه قبل در مورد یکسوساز نیم موج ذکر شد، با اندکی تغییر به پل یکسوساز تعمیم دهید.

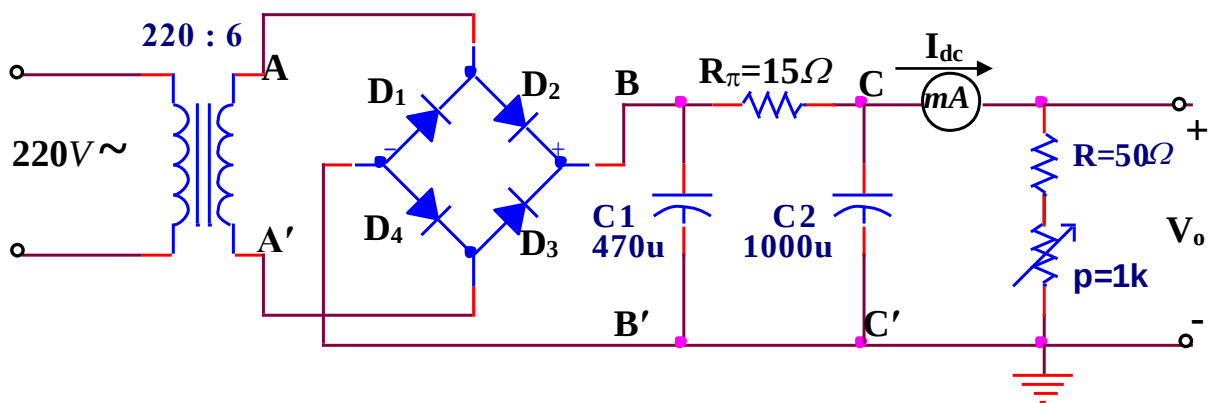


شکل ۳-۳

۳-۲- در مدار شکل ۳-۳ به ازای $I_{dc}=60mA$ ، شکل موج ولتاژ خروجی با درج مقادیر مهم رسم نمایید [شکل ۳-۸].

آزمایش (۳): یکسوساز با صافی π مقاومتی

روش‌های مختلفی برای کاهش رپل وجود دارد. یکی از روش‌ها استفاده از «صافی (فیلتر) π مقاومتی» است. معمولاً در مواقعی که جریان بار در حدود چند ده میلی‌آمپر است، استفاده از این روش مناسب است. شکل ۴-۳ مدار پل یکسوساز را با صافی π مقاومتی نشان می‌دهد.



شکل ۴-۳

۳-۱- مدار شکل ۴-۳ را بروی بُرد بسته، به ازای جریان‌های مختلف I_{dc} ، ولتاژ DC خروجی (V_{odc})، ولتاژ رپل در گره B (V_{rB-p-p}) و رپل خروجی (V_{r-p-p}) را اندازه‌گیری نمایید [جدول ۳-۲].

۲-۳- متغیرهایی را که در قسمت قبل اندازه‌گیری کرده‌اید، با استفاده از روابط مداری محاسبه کنید^۱ و با نتایج عملی مقایسه نمایید [جدول ۲-۳].

۳-۳- به نظر شما با افزایش مقاومت R_{π} چه پارامترهایی در مدار تغییر می‌کنند؟ توضیح دهید.

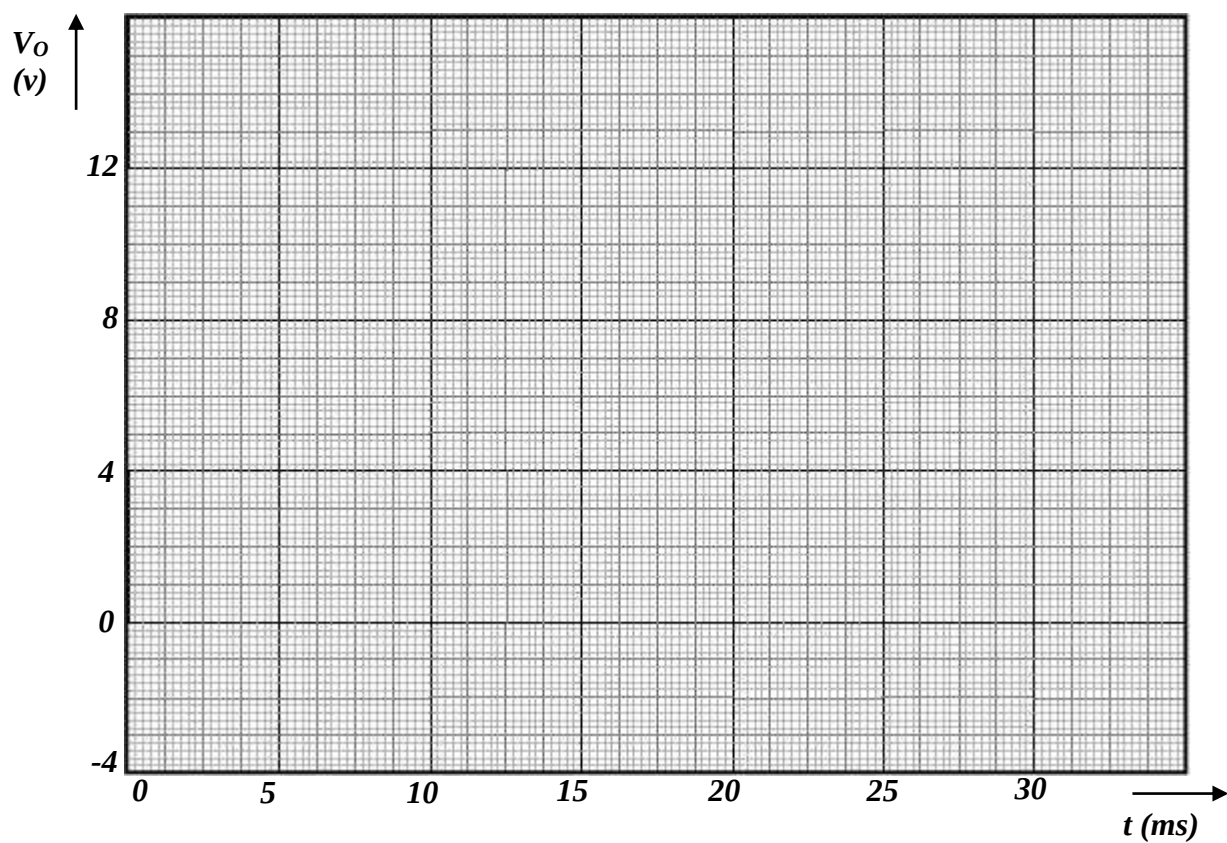
I_{dc}		0 mA	10 mA	20 mA	30 mA	40 mA	50 mA	60 mA
V_{odc}	محاسبه							
	آزمایش							
$V_{r\ p-p}$	محاسبه							
	آزمایش							

جدول ۱-۳

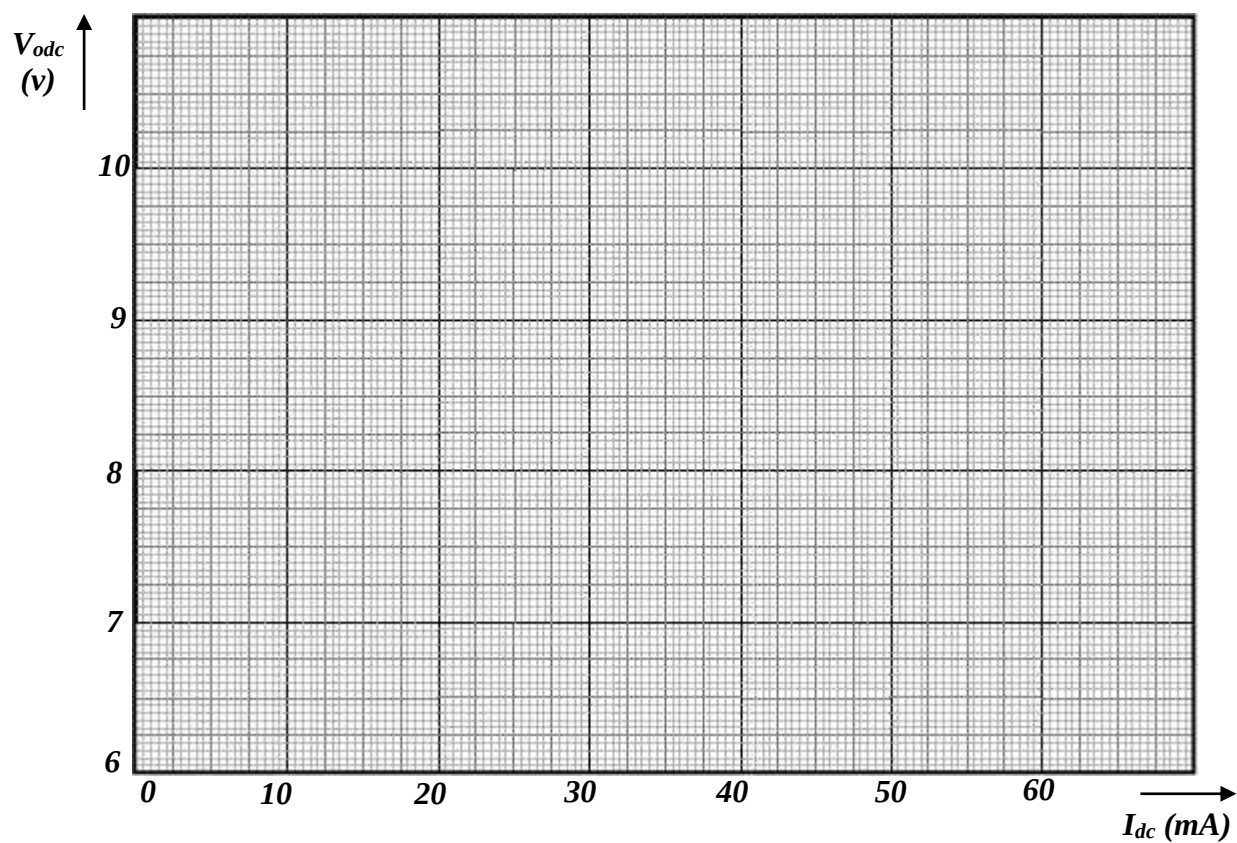
I_{dc}		0 mA	10 mA	20 mA	30 mA	40 mA	50 mA	60 mA
V_{odc}	محاسبه							
	آزمایش							
$V_{rB\ p-p}$	محاسبه							
	آزمایش							
$V_{ro\ p-p}$	محاسبه							
	آزمایش							

جدول ۲-۳: نتایج محاسبات و اندازه‌گیری‌های آزمایش (۳)

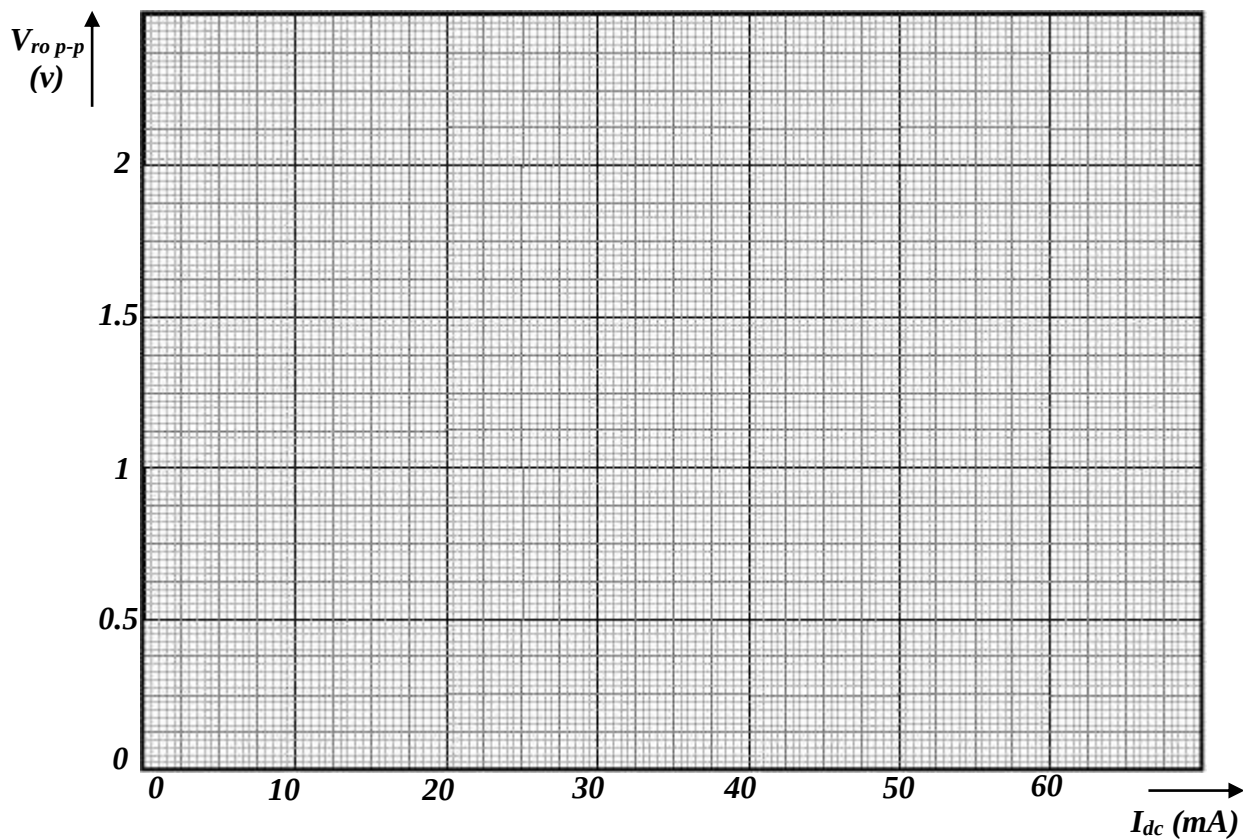
۱- به ضمیمه این جلسه مراجعه کنید.



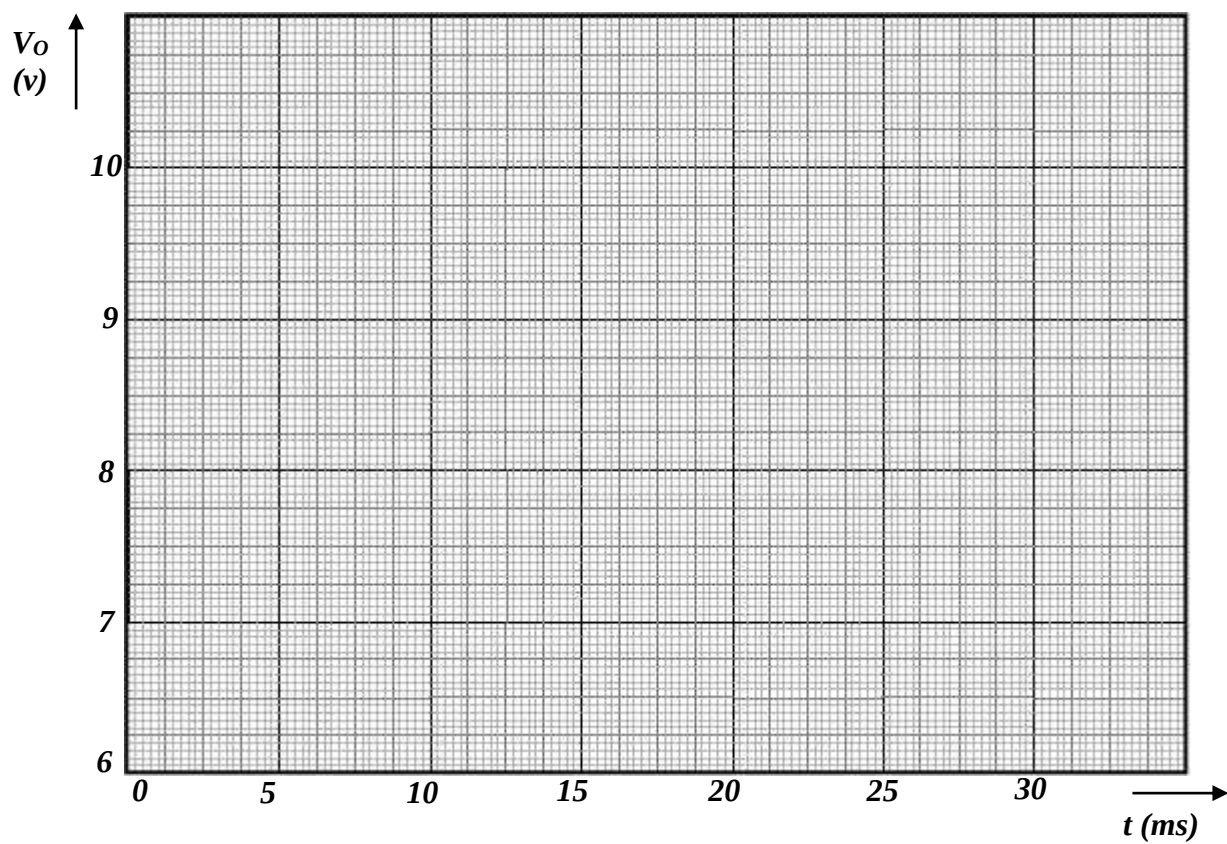
شکل ۳-۵: ولتاژ خروجی مدار شکل ۳-۲ (با کوپلاژ DC اسیلوسکوپ)، $R=50\Omega$ و $R=\infty$



شکل ۳-۶: منحنی مشخصه V_{odc} - I_{dc} پل یکسوساز



شکل ۳-۷: منحنی مشخصه $V_{ro\ p-p}$ - I_{dc} پل یکسوساز

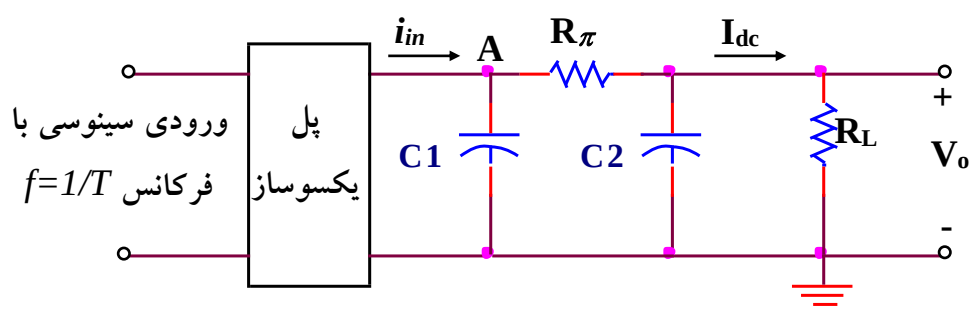


شکل ۳-۸: شکل موج خروجی یکسوساز تمام موج برای $I_{dc}=60\text{mA}$

ضمیمه آزمایش ۳

«روابط مربوط به رپل^۱ خروجی صافی π در یکسوکننده‌ها»

در یکسو کننده‌ها همواره سعی بر این است که رپل ولتاژ خروجی را کاهش دهیم. روش‌های مختلفی برای کاهش رپل در محدوده‌های مختلف جریان خروجی ارائه شده است. در این ضمیمه به بررسی تئوری صافی π مقاومتی پرداخته و روابط مورد نیاز را بصورت ساده بدست می‌آوریم. شکل ۱ مدار پل یکسوساز با صافی π مقاومتی را نشان می‌دهد. در این مدار دامنه رپل خروجی را بر حسب جریان I_{dc} و دیگر پارامترهای مدار بدست می‌آوریم.



شکل ۱: پل یکسوساز با صافی π

ابتدا فرض می‌کنیم که زمان هدایت دیودها بسیار کوچکتر از پریود هدایت آنها باشد. بنابراین جریان i_{in} را می‌توان به صورت مجموعه‌ای از جریان‌های ضربه‌ای نوشت.

$$i_{in} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} k \delta\left(t - \frac{nT}{2}\right) \quad (۱)$$

و از طرفی چون خازن‌های C_1 و C_2 جریان DC مصرف نمی‌کنند، بنابراین:

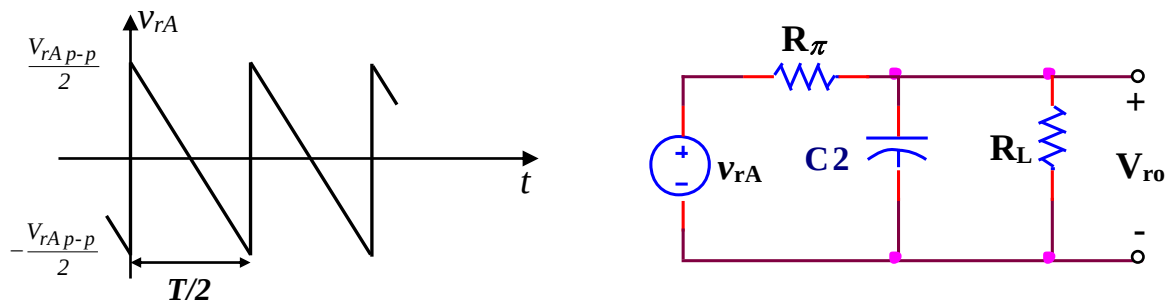
$$\langle i_{in} \rangle = I_{dc} \quad (۲)$$

و در نتیجه ضریب k در رابطه (۱) برابر با $\frac{I_{dc}T}{2}$ خواهد بود. جریان‌های ضربه‌ای فقط از خازن C_1 عبور می‌کنند زیرا اگر از مقاومت R_{π} عبور کنند، سبب تولید ولتاژ بی‌نهایت در گره A می‌شوند که چنین چیزی غیر ممکن است. بنابراین ولتاژ دو سر خازن C_1 در لحظات $t = \frac{nT}{2}$ پرش به اندازه V_{rAp-p} می‌کند که بصورت زیر بدست می‌آید.

$$\Delta V_{C1} = \frac{1}{C_1} \int_t^{t+\Delta t} i_{C1}(\tau) d\tau$$

$$V_{rAp-p} = \frac{I_{dc}T}{2C_1} = \frac{I_{dc}}{2fC_1} \quad (3)$$

همچنین می توان نشان داد که به ازای مقادیر عملی برای خازن و مقاومت های شکل ۱ ولتاژ گره A بین زمان های دو شارژ متوالی بصورت تقریباً خطی افت پیدا می کند. لذا مدار معادل تقریبی AC شکل ۱ بصورت شکل ۲ در خواهد آمد.



شکل ۲

همانطوری که مشاهده می شود v_{rA} یک ولتاژ پریودیک با پریود $T/2$ است. بنابراین می توان بسط سری فوریه آن را بصورت زیر نوشت.

$$v_{rA}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_{rAp-p}}{n\pi} \sin\left(\frac{4\pi n t}{T}\right) \quad (4)$$

از طرفی تابع تبدیل ولتاژ خروجی به ولتاژ ورودی (در حالت دائمی سینوسی) برای مدار شکل ۲ بصورت معادله (۵) بدست می آید.

$$H(j\omega) = \frac{V_{ro}(j\omega)}{V_{rA}(j\omega)} = \frac{\frac{R_L}{R_L + R_\pi}}{1 + j\omega C_2(R_L \parallel R_\pi)} \quad (5)$$

که ω بصورت زیر تعریف می شود.

$$\omega = \frac{2\pi}{T/2} = \frac{4\pi}{T} = 4\pi f \quad (6)$$

بدلیل خطی بودن مدار شکل ۲ می توان از اصل جمع آثار^۱ استفاده کرد و ولتاژ ریپل خروجی را بصورت زیر بدست آورد.

$$V_{ro}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left| \frac{R_L / (R_L + R_\pi)}{1 + j\omega C_2(R_L \parallel R_\pi)} \right| \frac{V_{rAp-p}}{n\pi} \sin(n\omega t + \angle H(j\omega)) \quad (7)$$

مشاهده می‌شود که ولتاژ ریپل در خروجی از مجموعه بی‌نهایت سینوسی تشکیل می‌شود. ولی با توجه به اینکه صافی شکل ۲ یک مدار پایین گذر است و مقادیر R_{π} و C_2 بگونه‌ای انتخاب شده‌اند که هارمونیک‌های ولتاژ V_{rA} را تضعیف می‌کنند، به طوری که مقدار تضعیف با افزایش فرکانس هارمونیک‌ها بیشتر می‌شود، بنابراین می‌توان ولتاژ ریپل خروجی را فقط با هارمونیک اول آن تقریب زد. در این صورت بدست می‌آوریم:

$$V_{ro}(t) \cong \frac{R_L V_{rA p-p}}{\pi(R_L + R_{\pi})[1 + jn\omega C_2(R_L \| R_{\pi})]} \sin(\omega t + \angle H(j\omega)) \quad (8)$$

با توجه به اینکه عموماً $R_L \gg R_{\pi}$ است و همچنین با استفاده از معادله (۳)، ولتاژ ریپل پیک تا پیک در خروجی بصورت رابطه زیر بدست می‌آید.

$$V_{ro p-p} \cong \frac{I_{dc}}{\pi f C_1 \sqrt{1 + (4\pi f R_{\pi} C_2)^2}} \quad (9)$$

و اگر $1 \gg (4\pi f R_{\pi} C_2)^2$ باشد، رابطه (۹) بصورت ساده زیر در می‌آید.

$$V_{ro p-p} \cong \frac{I_{dc}}{4\pi^2 f^2 R_{\pi} C_1 C_2} \quad (10)$$

معمولاً استفاده از معادله (۱۰) نیازهای عملی را برآورده می‌سازد. با توجه به این رابطه دیده می‌شود که $V_{ro p-p}$ به صورت خطی با جریان بار افزایش می‌یابد و اگر مقادیر R_{π} و C_2 را به اندازه کافی بزرگ انتخاب کنیم، دامنه ریپل خروجی بسیار کوچک می‌شود.

❖ آزمایش ۴

«کاربردهای دیود: خازن پرش یا ذخیره کننده DC و چند برابر کننده ولتاژ»

هدف: در جلسات قبل کاربرد دیود در یکسوسازی ولتاژ AC برای تأمین تغذیه DC بررسی گردید. در این جلسه دو کاربرد دیگر دیود را خواهیم دید. ابتدا یک مدار ذخیره کننده یا بازیافت کننده DC مورد آزمایش قرار گرفته و عملکرد آن بررسی می‌گردد در ادامه مدار چند برابر کننده ولتاژ بررسی خواهد شد. از این مدار برای داشتن ولتاژ DC از مضارب بالاتر پیک ولتاژ ورودی می‌توان استفاده کرد.

وسایل مورد نیاز:

- ۱- اسیلوسکوپ: ۱ دستگاه
- ۲- مولد سیگنال: ۱ دستگاه
- ۳- آمپر متر: ۱ عدد
- ۴- برد بُرد: ۱ عدد
- ۵- ترانسفورماتور $220v/6v (300mA)$: ۱ عدد
- ۶- دیود معمولی (1N4007): ۴ عدد
- ۷- خازن‌های $(4 \times 1, 4 \times 330) \mu F$
- ۸- مقاومت‌های $(1k, 10k) \Omega$

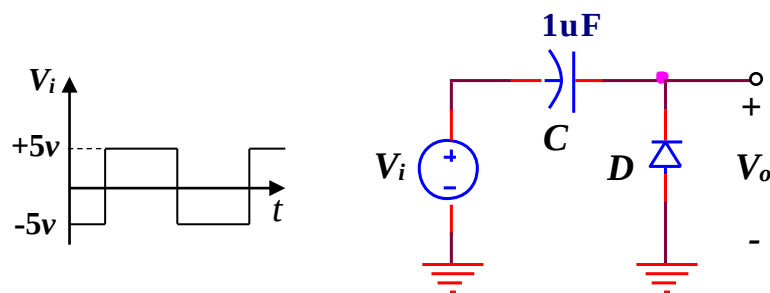
نحوه آزمایشات:

آزمایش (۱): خازن پرش یا ذخیره کننده DC

اگر در مدار یکسو کننده پیک، خروجی را از دو سر دیود بگیریم، یک مدار جالب با موارد کاربرد مهم بدست می‌آید. این مدار را یک ذخیره کننده یا بازیافت کننده DC می‌گویند. شکل ۴-۱ یک نمونه از این مدار را نشان می‌دهد.

۱-۱- چگونگی عملکرد مدار را توضیح دهید.

۱-۲- مدار شکل ۴-۱ را بروی برد بُرد بسته و با اعمال یک موج مربعی، خروجی آنرا توسط اسیلوسکوپ با کویلاژ DC مشاهده و رسم نمائید [شکل ۴-۴].



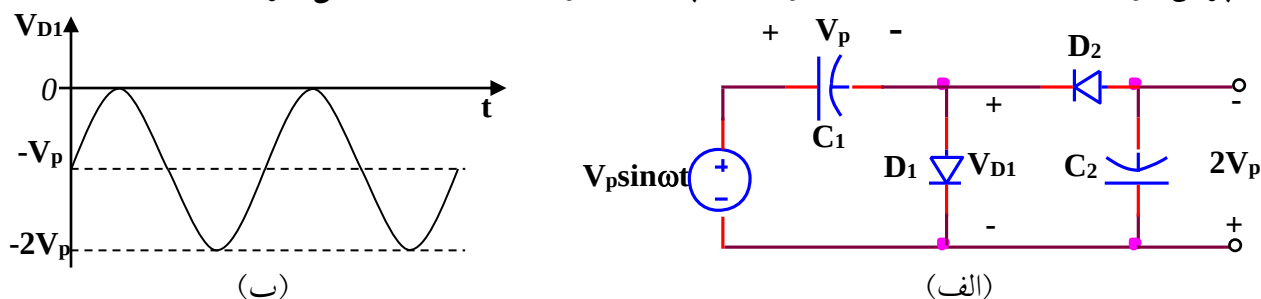
شکل ۴-۱: مدار بازیافت کننده DC با ورودی موج مربعی و بدون بار

بازیافت DC کار مفیدی است زیرا مؤلفه DC شکل موج پالس یک مقدار مؤثر برای اندازه‌گیری نسبت پهنای پالس به فاصله زمانی بین پالس‌های متناوب است. سیکل کار یک شکل موج پالس را می‌توان مدوله کرد (بصورت مدولاسیون عرض پالس) و اطلاعات را از طریق آن حمل کرد. در چنین سیستمی، آشکارسازی یا دمدولاسیون را به سادگی با اعمال موج پالس رسیده به یک بازیافت کننده DC و سپس استفاده از یک فیلتر پایین گذر RC ساده برای جدا کردن مقدار متوسط موج خروجی از پالس‌های اضافی جمع شده، می‌توان انجام داد.

۱-۳- مقاومت $R=1k\Omega$ (مقاومت بار) را بصورت موازی با دیود D ببندید و آزمایش را تکرار کنید. تغییرات مشاهده شده را بروی همان نمودار شکل ۴-۱ رسم نمائید و این دو شکل را با هم مقایسه کنید.

آزمایش (۲): چند برابر کننده ولتاژ

شکل ۴-۲-الف یک مدار ۲ قسمتی را که پشت سرهم بسته شده است، نشان می‌دهد: یک مدار پرش توسط C_1 و D_1 و یک یکسو کننده پیک که توسط D_2 و C_2 شکل گرفته است.



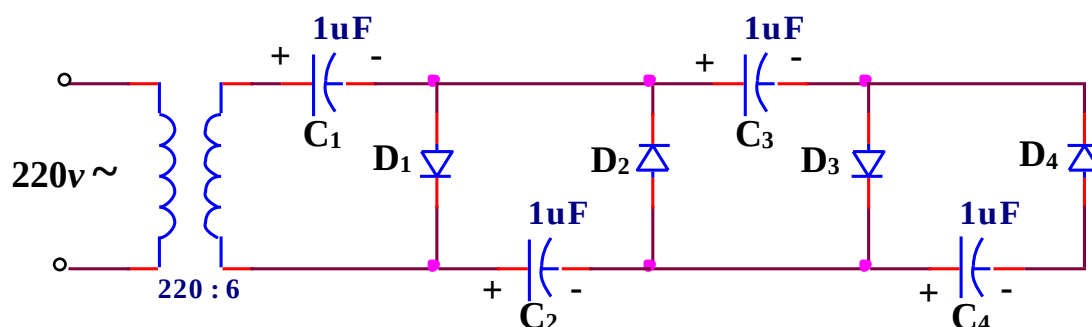
شکل ۴-۲: دو برابر کننده ولتاژ الف- شکل مدار ب- شکل موج ولتاژ دیود D_1

هنگامی که مدار توسط یک شکل موج سینوسی با دامنه V_p تحریک شود، قسمت پرش شکل موجی ولتاژی همانند شکل ۴-۲-ب فراهم می‌کند. توجه داشته باشید که وقتی پیک مثبت به

صفر ولت می‌پرد، پیک منفی به $-2V_p$ می‌رشد. در پاسخ به این شکل موج، قسمت آشکار ساز پیک یک ولتاژ DC منفی با دامنه $2V_p$ روی خازن C_2 تولید می‌کند. چون پیک ولتاژ ورودی دو برابر شده است، مدار را یک دو برابر کننده ولتاژ می‌خوانند.

۱-۲- مدار شکل ۳-۴ یک چهار برابر کننده ولتاژ را نشان می‌دهد. این مدار را بروی برد بُرد بسته و ولتاژ ورودی و خازن‌ها (ولتاژهای چند برابر شده) را اندازه‌گیری نمایید.

تذکر: در انتخاب خازن‌ها به حداکثر ولتاژی که باید تحمل کنند، توجه داشته باشید.

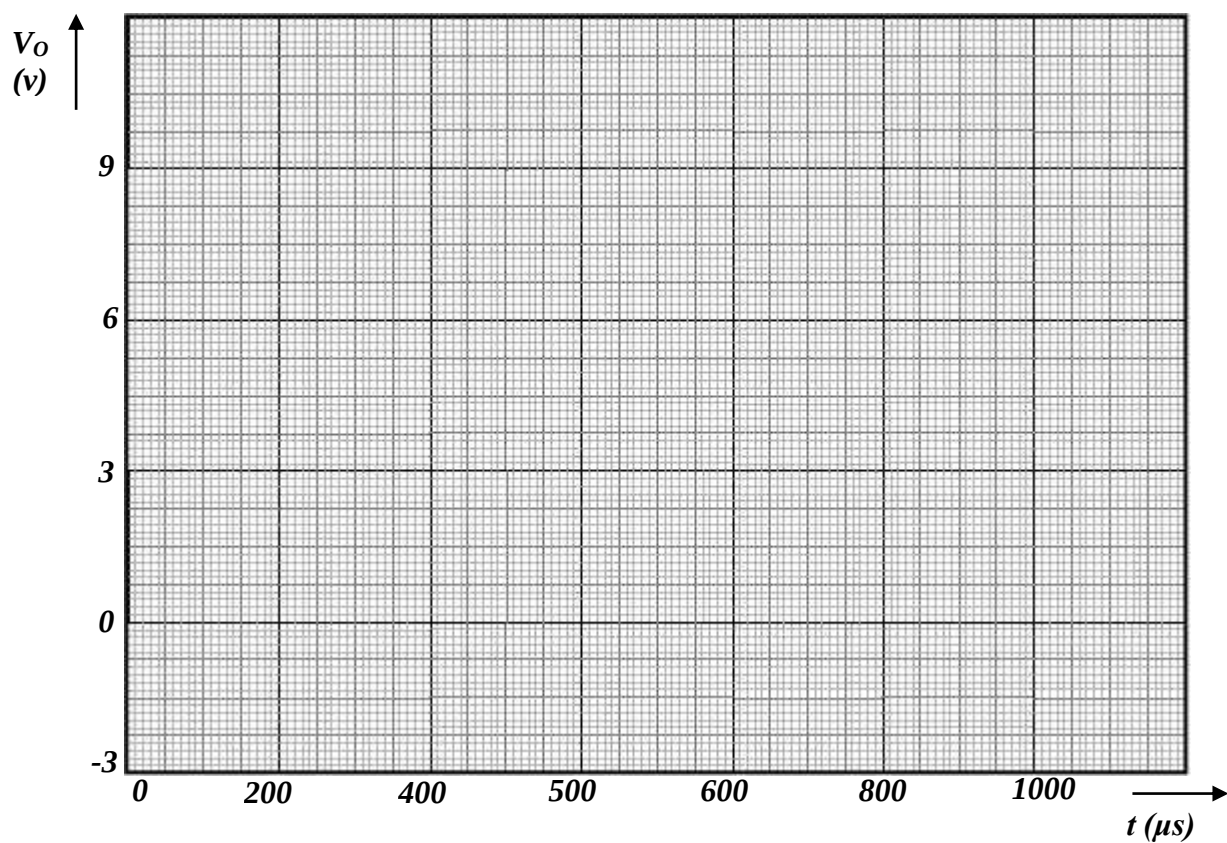


شکل (۳-۴): مدار چهار برابر کننده ولتاژ بدون بار

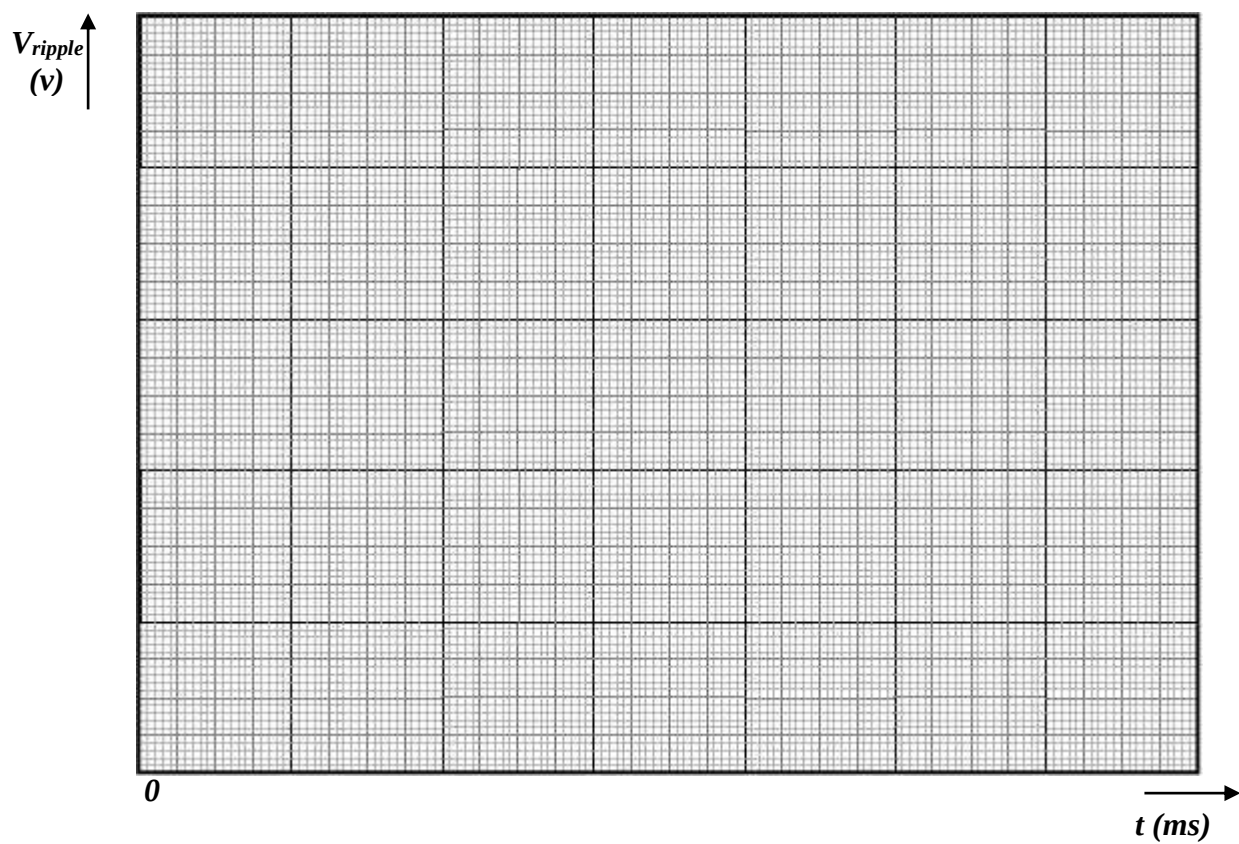
۲-۲- در این بخش می‌خواهیم اثر بار بروی حداکثر ولتاژ خروجی (ولتاژ ۴ برابر شده) و میزان ریزش آن را بررسی کنیم. لذا مقاومت بار $R_L = 10k$ را به مدار اضافه می‌کنیم (توجه داشته باشید که مقاومت R_L را بصورت موازی با قسمت ۴ برابر کننده ولتاژ ببندید). در انتخاب مقاومت باری که برای این آزمایش انتخاب کردیم چه ملاحظاتی باید صورت گیرد؟ با قرار دان اسیلوسکوپ در کوپلاژ AC مقدار ریزش ولتاژ خروجی را مشاهده و رسم کنید [شکل ۴-۵].

تذکر: در این قسمت کلیه خازن‌ها را با خازن‌های $330\mu F$ تعویض نمایید. دلیل این کار را توضیح دهید.

۲-۳- حداکثر ولتاژ خروجی چهار برابر کننده ولتاژ قسمت‌های ۱-۲ و ۲-۲ را با یکدیگر مقایسه کنید. علت اختلاف را توضیح دهید.



شکل ۴-۴: شکل موج ولتاژ خروجی آزمایش (۱)



شکل ۴-۵: شکل موج رپل ولتاژ خروجی چهار برابر کننده ولتاژ با بار

❖ آزمایش ۵

«آشنایی با ترانزیستور^۱ و منحنی‌های مشخصه آن»

هدف: ترانزیستورها کاربردهای بسیار زیادی در مدارهای الکترونیکی بخصوص تقویت کننده‌ها دارند و در طراحی مدارهای الکترونیک نیاز به مشخصات این المان‌ها است. در این جلسه ضمن آشنایی با ترانزیستور، منحنی‌های مشخصه ورودی و خروجی آن را توسط آزمایشات عملی بدست آورده و با استفاده از این منحنی‌ها بعضی از پارامترهای مهم این ترانزیستورها را محاسبه می‌کنیم.

وسایل مورد نیاز:

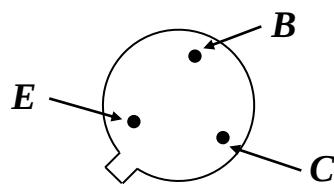
- ۱- اسیلوسکوپ: ۱ دستگاه
- ۲- منبع تغذیه ۱۵ ولتی: ۲ دستگاه
- ۳- مولتی متر دیجیتال: ۱ عدد
- ۴- برد بُرد: ۱ عدد
- ۵- ترانزیستور npn: ۱ عدد
- ۶- پتانسیومتر $5k\Omega$: ۱ عدد
- ۷- ترانسفورماتور (300mA) 220v/6v: ۱ عدد
- ۸- دیود معمولی: ۱ عدد
- ۹- مقاومت‌های $(180, 1k, 10k)\Omega$

نحوه آزمایشات:

می‌دانیم که از ترانزیستورها می‌توان بعنوان تقویت کننده استفاده کرد. این عنصر می‌تواند در آرایش‌های مختلف که عبارتند از: بیس مشترک، امیتر مشترک و کلکتور مشترک، عمل تقویت ولتاژ و یا جریان را انجام دهد. در هر کدام از این آرایش‌ها ترانزیستور دارای منحنی مشخصه ورودی و خروجی مربوط به خود است. در این جلسه ما منحنی مشخصه‌های ورودی و خروجی آرایش‌های بیس مشترک و امیتر مشترک را بروش نقطه‌یابی و توسط اسیلوسکوپ

بدست آورده و با آنچه قبلاً آموخته‌ایم، مقایسه می‌کنیم. همچنین با استفاده از این منحنی‌ها برخی از پارامترهای مهم ترانزیستور را محاسبه می‌کنیم.

ترانزیستوری که در این تقویت کننده‌ها بکار می‌رود بدون توجه به نوع آرایش می‌تواند از نوع npn و یا pnp باشد. در این جلسه آزمایشات بر اساس ترانزیستور npn طراحی گردیده است. ترانزیستورهای npn مورد استفاده می‌توانند از نوع BC107 یا BC108 یا BC109 باشند که مشخصات پایه‌های همگی آنها مشابه بوده و بصورت شکل زیر هستند.



شکل ۵-۱: نمای زیرین ترانزیستورهای BC107، BC108 و BC109

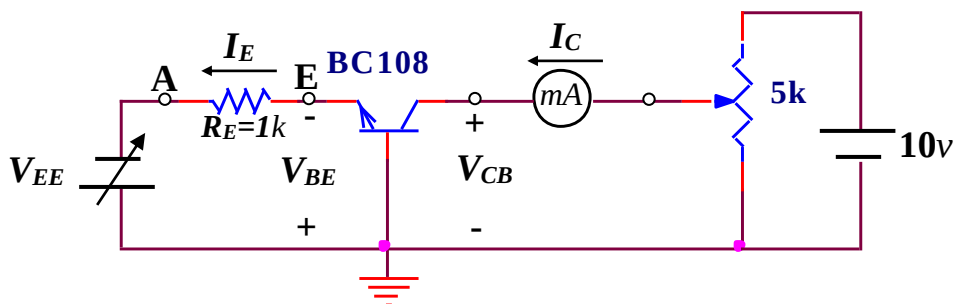
تذکره ۱: قبل از اینکه ترانزیستور را در مدار بکار برید توسط مولتی‌متر از سالم بودن آن مطمئن شوید. برای این کار می‌توانید دیودهای بیس-امیتر و بیس-کلکتور را مورد آزمایش قرار دهید.

تذکره ۲: توجه کنید که در هنگام بستن مدار بروی برد بُرد اشتباهی در اتصالات صورت نگیرد. زیرا کوچک‌ترین اشتباهی ممکن است که سبب معیوب شدن ترانزیستور شود.

آزمایش (۱): رسم منحنی مشخصه ورودی و خروجی بیس-مشترک به روش نقطه‌یابی

۱-۱- مدار شکل ۵-۲ (بیس-مشترک) را بروی برد بُرد بسته و با تغییر ولتاژ V_{EE} جریان امیتر را تغییر دهید و برای هر یک از جریان‌های $I_E = (0, 1, 2, 3, 4, 5) \text{ mA}$ ، ولتاژ V_{CB} را بصورت پله‌ای توسط پتانسیومتر $5k$ افزایش داده و مقادیر I_C و V_{BE} را اندازه‌گیری کنید [جدول ۵-۱].

تذکره: برای اندازه‌گیری جریان I_E ، ولتاژ V_{EA} را بر مقاومت R_E تقسیم کنید.



شکل ۵-۲: ترانزیستور در آرایش بیس مشترک

۱-۲- با استفاده از نتایج جدول ۱-۵ منحنی مشخصه I_C-V_{CB} را به ازای مقادیر مختلف I_E رسم کنید [شکل ۵-۵].

۱-۳- α_{dc} و α_{ac} را در نقطه کار $V_{CB}=4V$ و $I_E=3mA$ بدست آورده و با یکدیگر مقایسه کنید [از نتایج جدول ۱-۵ استفاده نمائید].

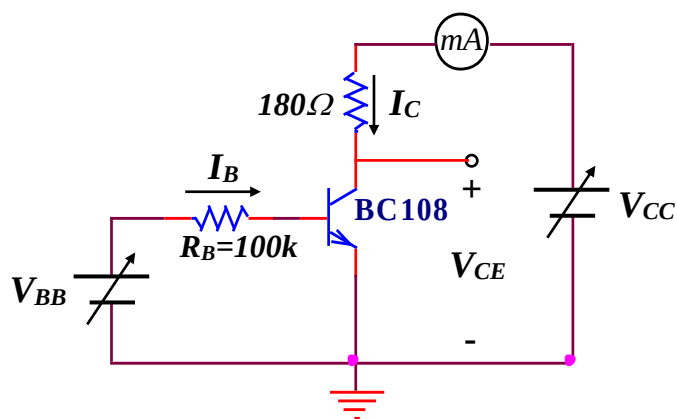
۱-۴- منطقه قطع ترانزیستور را روی منحنی مشخصه خروجی نشان دهید.

۱-۵- مقدار تقریبی I_{CB0} را از روی منحنی مشخصه در $V_{CB}=4V$ بدست آورید.

۱-۶- با استفاده از نتایج جدول ۱-۵ منحنی مشخصه I_E-V_{BE} را به ازای $V_{CB}=1V$ و $V_{CB}=10V$ رسم کرده و با یکدیگر مقایسه کنید [شکل ۶-۵].

آزمایش (۲): رسم منحنی مشخصه خروجی امیتر- مشترک به روش نقطه‌یابی

۲-۱- مدار شکل ۳-۵ (امیتر- مشترک) را بروی برد بُرد بسته و با توجه به اینکه جریان I_B را می‌توان توسط منبع ولتاژ V_{BB} تغییر داد، به ازای جریان‌های $I_B = (0, 10, 20, 30, 40, 50) \mu A$ و با تغییر منبع ولتاژ V_{CC} ، ولتاژ V_{CE} را بصورت پله‌ای تغییر داده و I_C را اندازه‌گیری کنید [جدول ۲-۵].



شکل ۳-۵: ترانزیستور در آرایش امیتر-مشترک

۲-۲- با استفاده از نتایج جدول ۲-۵ منحنی‌های تغییرات I_C بر حسب V_{CE} را به ازای I_B های مختلف رسم کنید [شکل ۷-۵].

۲-۳- β_{dc} و β_{ac} را در نقطه کار $V_{CE}=6V$ و $I_B=20\mu A$ بدست آورده و با یکدیگر مقایسه کنید.

۲-۴- مقدار تقریبی I_{CE0} را در $V_{CE} = 8V$ بدست آورید.

آزمایش (۳): رسم منحنی مشخصه خروجی امیتر- مشترک توسط اسیلوسکوپ

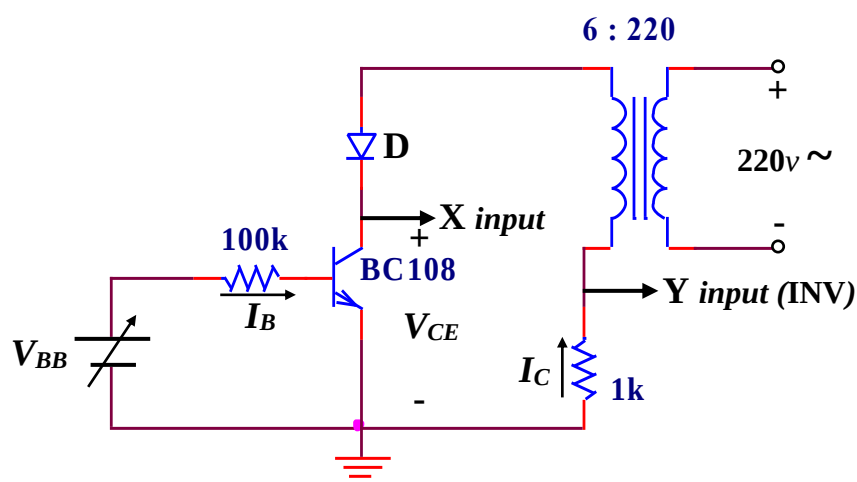
مدار شکل ۵-۴ برای بدست آوردن مشخصه خروجی ترانزیستور در آرایش امیتر-مشارک توسط اسیلوسکوپ طراحی شده است. توجه داشته باشید که در هنگام استفاده از اسیلوسکوپ کلید سلکتوری مربوط به زمان را بروی X-Y قرار داده و دکمه معکوس (INV) مربوط به ورودی Y را فشار دهید.

۳-۱- نقش هر یک از اجزاء شکل ۵-۴ را بطور کیفی شرح دهید.

۳-۲- مدار شکل ۵-۴ را بروی بُرد بُرد بسته و به ازای جریان‌های $I_B = (0, 10, 20, 30, 40, 50) \mu A$ منحنی خروجی ترانزیستور را توسط اسیلوسکوپ مشاهده و رسم کنید [شکل ۵-۸].

۳-۳- منطقه اشباع قطع و اشباع ترانزیستور را روی منحنی $I_C - V_{CE}$ که توسط اسیلوسکوپ بدست آمده، مشخص کنید و مقدار V_{CEsat} را بطور تقریبی بدست آورید.

۳-۴- با توجه به منحنی‌های مشخصه $I_C - V_{CE}$ مشاهده می‌شود که با افزایش I_B ، شیب منحنی‌ها در ناحیه فعال افزایش می‌یابد. این شیب معرف چه پارامتری در مدل سیگنال‌های کوچک هایبرید^۱ ترانزیستور است؟ توضیح دهید.



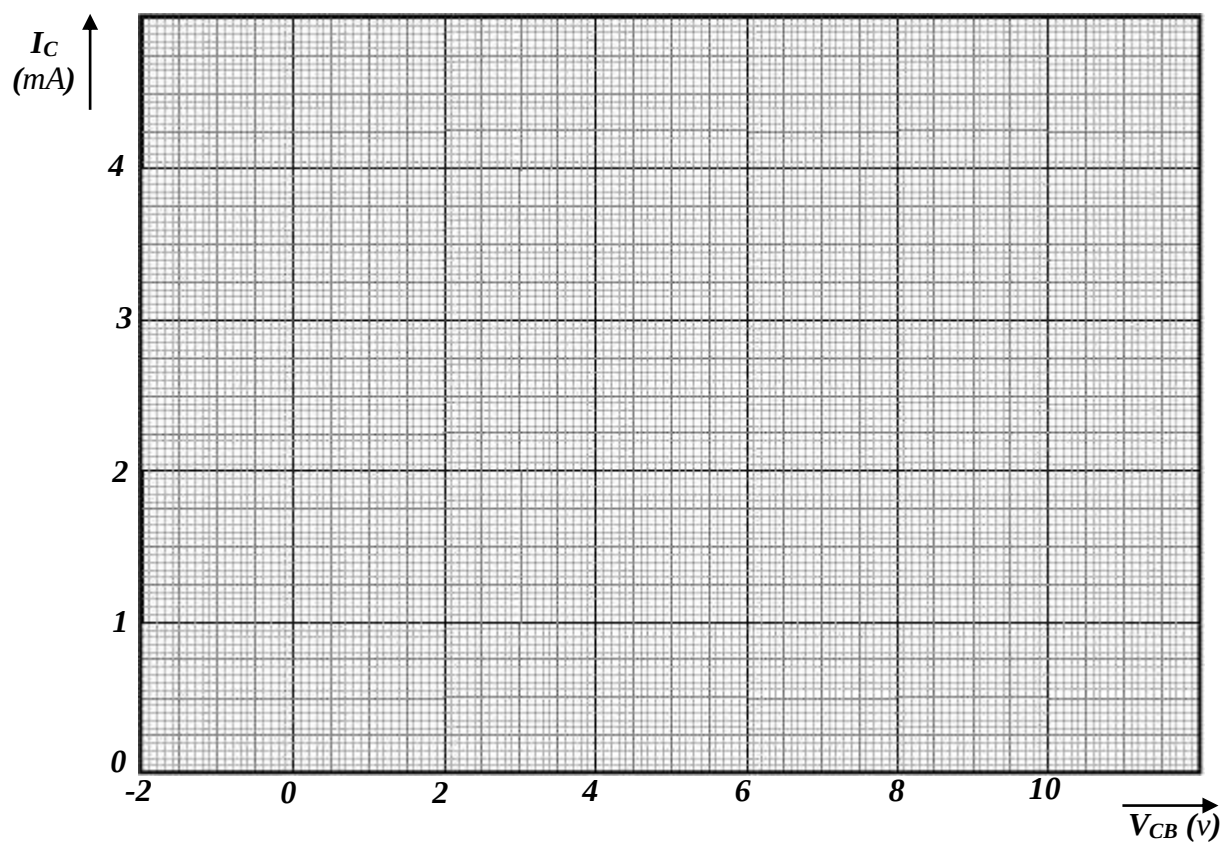
شکل ۵-۴: رسم مشخصه خروجی ترانزیستور در آرایش امیتر-مشارک توسط ترانزیستور

$V_{CB}(V)$ $I_E (mA)$		0	1	2	3	4	6	8	10
0	$I_C (\mu A)$								
	$V_{BE} (V)$								
1	$I_C (mA)$								
	$V_{BE} (V)$								
2	$I_C (mA)$								
	$V_{BE} (V)$								
3	$I_C (mA)$								
	$V_{BE} (V)$								
4	$I_C (mA)$								
	$V_{BE} (V)$								
5	$I_C (mA)$								
	$V_{BE} (V)$								

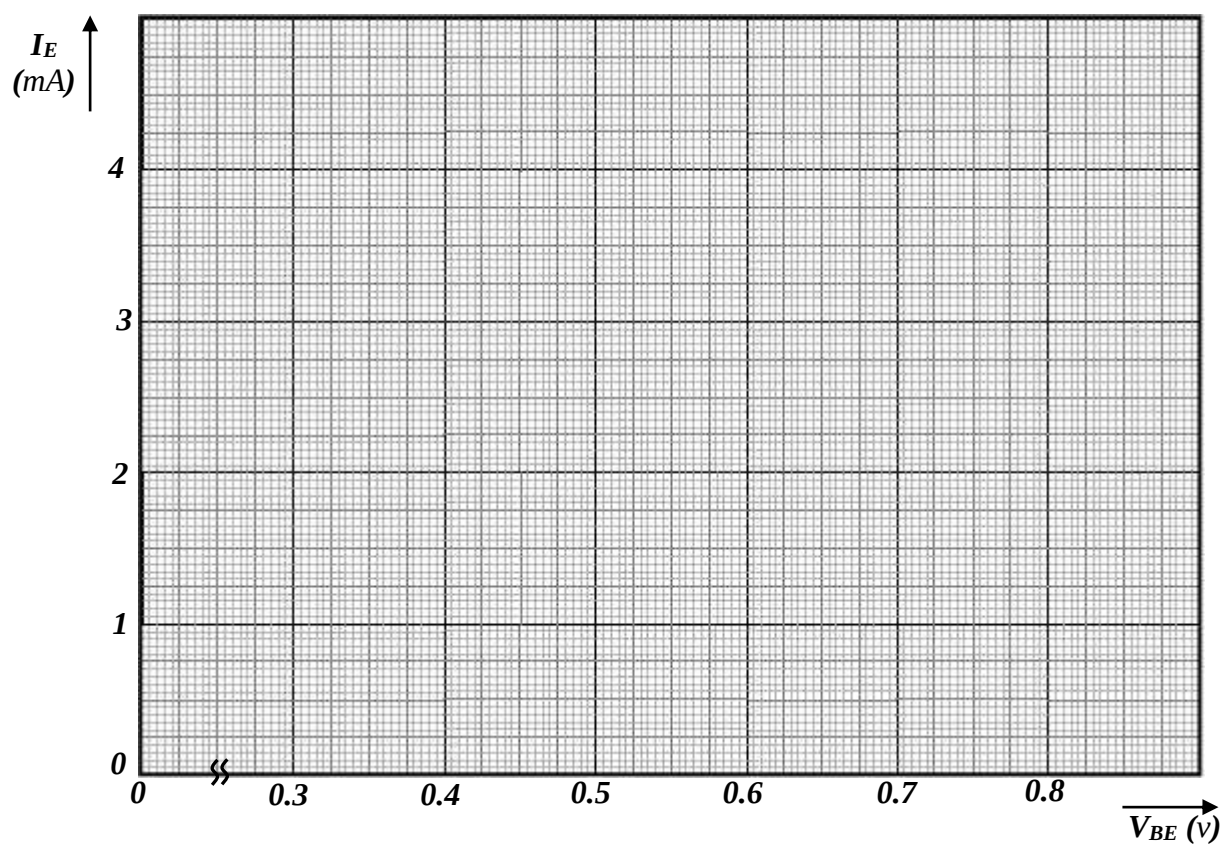
جدول ۵-۱: نتایج آزمایشات مربوط به آرایش بیس-مشترک

$V_{CE}(V)$ $I_B (\mu A)$		0	1	2	3	4	6	8	10	12
0	$I_C (mA)$									
10	$I_C (mA)$									
20	$I_C (mA)$									
30	$I_C (mA)$									
40	$I_C (mA)$									
50	$I_C (mA)$									

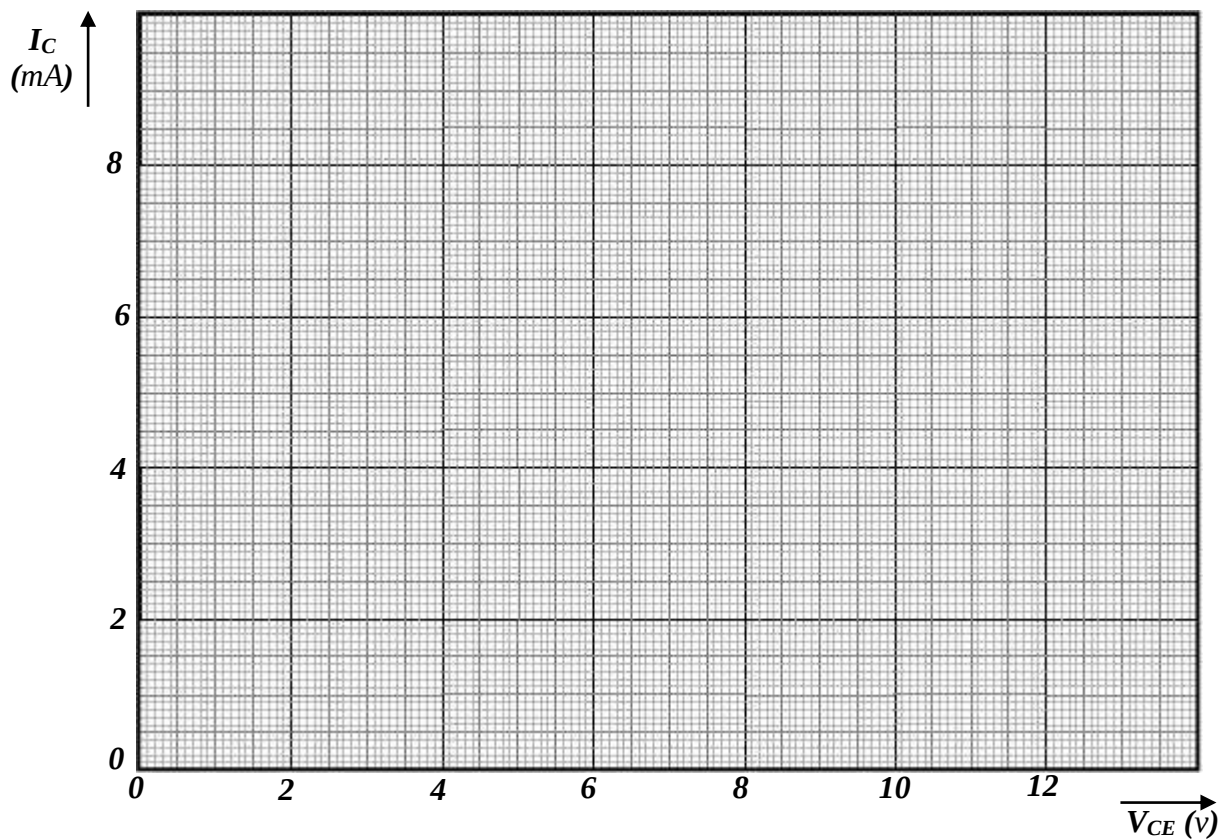
جدول ۵-۲: نتایج آزمایشات مربوط به آرایش امیتر-مشترک



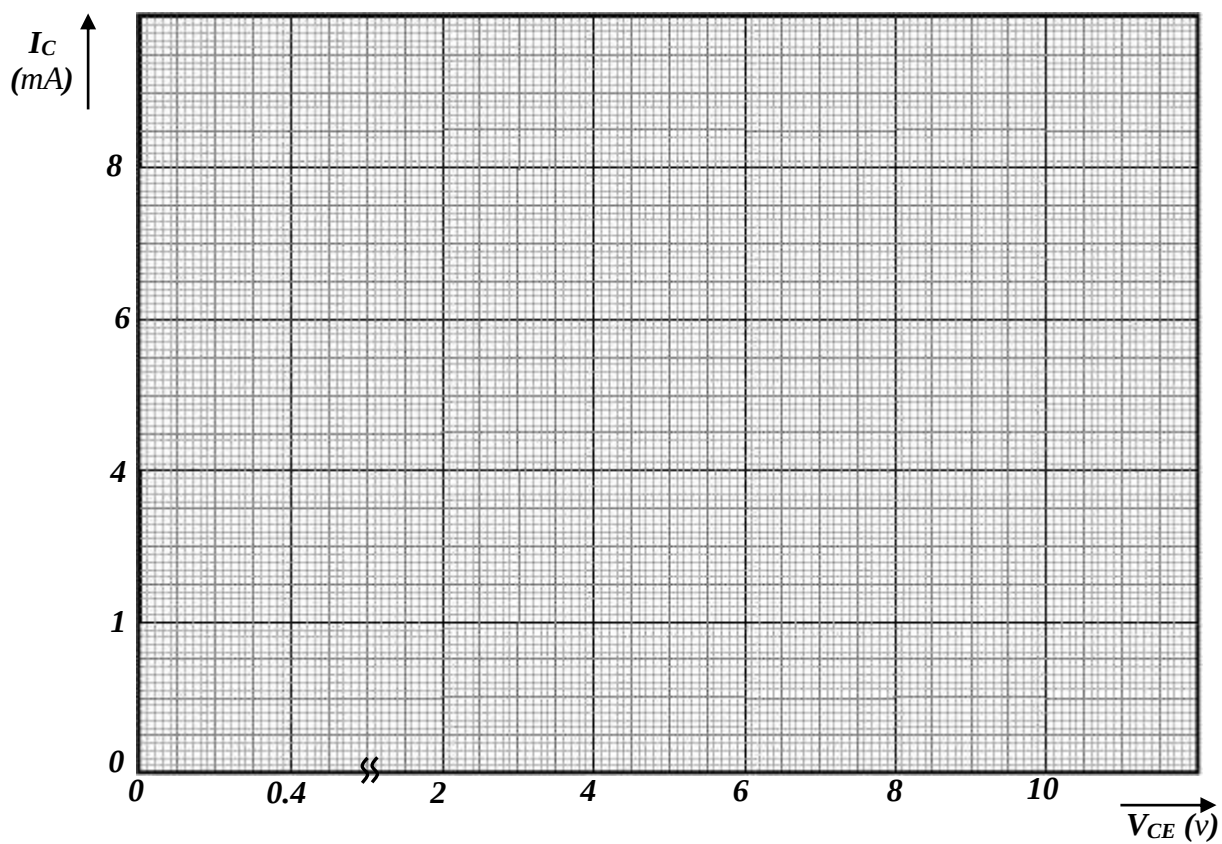
شکل ۵-۵: منحنی مشخصه I_C - V_{CB} را به ازای مقادیر مختلف I_E



شکل ۵-۶: منحنی مشخصه I_E - V_{BE} را به ازای $V_{CB}=10V$ و $V_{CB}=1V$



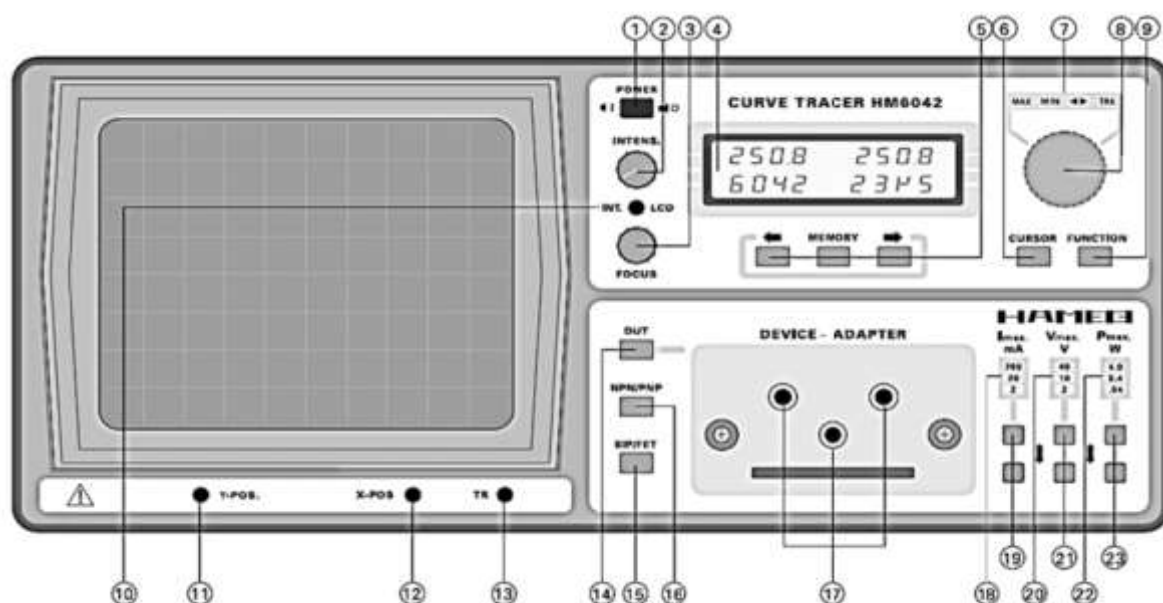
شکل ۵-۷: منحنی تغییرات I_C - V_{CE} را بر حسب I_B های مختلف



شکل ۵-۸: منحنی مشخصه I_C - V_{CE} را به ازای $V_{CB}=1V$ و $V_{CB}=10V$

❖ ضمیمه آزمایش ۵

«منحنی‌نگار (Curve Tracer)»



منحنی‌نگار برای قرائت پارامترهای dc و ac ادوات نیم‌رسانای ۲ سر (دیود) و ۳ سر (ترانزیستور) در نقطه کار مطلوب استفاده می‌شود. دستگاه موجود در آزمایشگاه از شرکت HAMRG مدل HM6042 است که قابلیت اندازه‌گیری همزمان دو قطعه را دارد. این منحنی‌نگار نیمه دیجیتالی بوده که از یک صفحه CRT (همانند اسیلوسکوپ معمولی) برای نمایش منحنی مشخصه قطعه و یک نمایشگر LED برای درج پارامترهای اندازه‌گیری شده در نقطه کار استفاده می‌کند. همچنین امکان ذخیره کردن پارامترها به منظور مقایسه با قطعه دیگر وجود دارد. محور افقی در صفحه CRT ولتاژ (برحسب ولت) و محور عمودی جریان (برحسب میلی‌آمپر) است.

راهنمای دستگاه:

- ۱- روشن‌خاموش
- ۲- شدت روشنایی منحنی مشخصه در صفحه CRT
- ۳- تنظیم وضوح منحنی‌ها
- ۴- نمایشگر LED برای درج پارامترهای dc و ac

- ۵- از دو بخش تشکیل شده است: ۱- کلید $\leftarrow \rightarrow$ برای انتخاب پارامترهای اندازه‌گیری و ۲- کلید MEMORY برای ذخیره کردن پارامترهای اندازه‌گیری شده
- ۶- انتقال مکان‌نما (نقطه کار) از یک منحنی به منحنی دیگر
- ۷- نشان‌دهنده عملگر انتخاب شده برای مکان‌نما است و ۴ حالت دارد: ۱- TRK که در پارامترهای ac کاربرد داشته و با ثابت نگه داشتن مکان‌نمای اول، مکان‌نمای دوم را جابجا می‌کند. ۲- $\blacktriangleleft \blacktriangleright$ برای جابجایی مکان‌نما به راست و چپ، ۳- MAX برای جابجایی بالاترین منحنی در جهت عمودی و ۴- MIN برای جابجایی پایین‌ترین منحنی در جهت عمودی
- ۸- تنظیم موقعیت مکان‌نما را برای ولتاژ و جریان مدنظر همراه با اعمال عملگرهای ۷
- ۹- انتخاب نوع عملگر توصیفی در ۷
- ۱۰- تنظیم وضوح روشنایی نمایشگر LED
- ۱۱- تنظیم موقعیت عمودی صفحه نمایش CRT
- ۱۲- تنظیم موقعیت افقی صفحه نمایش CRT
- ۱۳- تنظیم زاویه منحنی‌ها نسبت به محور افقی
- ۱۴- شروع و پایان اندازه‌گیری پارامترها
- ۱۵- انتخاب نوع ترانزیستور BJT/FET
- ۱۶- انتخاب ترتیب نیم‌رسانا NPN/PNP
- ۱۷- پایانه ورودی برای پایه قطعه
- ۱۸- نشانگر بیشترین جریان انتخاب شده
- ۱۹- کلید انتخاب بیشترین جریان برای مقیاس محور عمودی منحنی مشخصه در صفحه CRT
- ۲۰- نشانگر بیشترین ولتاژ انتخاب شده
- ۲۱- کلید انتخاب بیشترین ولتاژ برای مقیاس محور افقی منحنی مشخصه در صفحه CRT
- ۲۲- نشانگر بیشترین توان انتخاب شده
- ۲۳- کلید انتخاب بیشترین توان اعمالی به قطعه

❖ آزمایش ۶

«تثبیت کننده‌های ولتاژ»^۱

هدف: در جلسات قبل دیدیم که برای ساخت منابع تغذیه DC می‌توان ولتاژ AC را یکسو کرده و سپس با استفاده از فیلترهای مختلف ریپل آن را کاهش داد. اما در اکثر موارد به منابع تغذیه با ریپل بسیار کم نیاز است. در این گونه موارد از تثبیت کننده‌ها استفاده می‌شود. در این جلسه چند نمونه از تثبیت کننده های ولتاژ را که در آنها از دیود زبر و ترانزیستور بعنوان المان اصلی تثبیت کننده استفاده شده است، مورد بررسی قرار می‌دهیم

وسایل مورد نیاز:

- | | |
|---|---------------------------------|
| ۱- اسیلوسکوپ: ۱ دستگاه | ۲- منبع تغذیه ۱۵ ولتی: ۱ دستگاه |
| ۳- آمپر متر: ۱ عدد | ۴- برد بُرد: ۱ عدد |
| ۵- رگلاتور ۵ ولتی: ۱ عدد | ۶- ترانزیستور npn: ۱ عدد |
| ۷- دیود زبر 3.3V: ۱ عدد | ۸- خازن $0.1 \mu F$: ۱ عدد |
| ۹- پتانسیومترهای $500, 1k \Omega$ | |
| ۱۰- مقاومت‌های $(39, 47, 120, 220, 10k) \Omega$ | |

نحوه آزمایشات:

در جلسه‌های سوم و چهارم مشاهده کردیم که منابع ولتاژ ساخته شده بوسیله ترانسفورماتور و یکسو کننده در خروجی دارای ریپل هستند. علاوه بر آن ولتاژ DC خروجی با تغییر مقاومت بار تغییر می‌کرد. در این آزمایش چندین مدار طراحی شده است که عمل تثبیت ولتاژ را در حد مطلوبی برآورده می‌سازند. برای بررسی بهتر منابع تغذیه تثبیت شده و مقایسه آنها با یکدیگر ضرابی تعریف می‌شوند که میزان تغییرات ولتاژ خروجی را نسبت به عوامل مختلف بیان می‌کنند. سه عامل اصلی تغییرات ولتاژ خروجی در منابع تغذیه عبارتند از:

۱- تغییرات بار خروجی

۲- تغییرات احتمالی ولتاژ شبکه

۳- تغییرات درجه حرارت

بنابراین تغییرات ولتاژ خروجی (V_o) را می‌توان با رابطه زیر بیان کرد.

$$\Delta V_o = \left(\frac{\partial V_o}{\partial I_L} \right) \Delta I_L + \left(\frac{\partial V_o}{\partial V_i} \right) \Delta V_i + \left(\frac{\partial V_o}{\partial T} \right) \Delta T = S_I \Delta I_L + S_V \Delta V_i + S_T \Delta T \quad (1-6)$$

که در این رابطه ضرایب تثبیت S_I ، S_V و S_T بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$S_I \triangleq \left. \frac{\partial V_o}{\partial I_L} \right|_{V_i=cte, T=cte} \approx \left. \frac{\Delta V_o}{\Delta I_L} \right|_{V_i=cte, T=cte} \quad (2-6) \text{ ضریب تثبیت جریان:}$$

$$S_V \triangleq \left. \frac{\partial V_o}{\partial V_i} \right|_{I_L=cte, T=cte} \approx \left. \frac{\Delta V_o}{\Delta V_i} \right|_{I_L=cte, T=cte} \quad (3-6) \text{ ضریب تثبیت ولتاژ:}$$

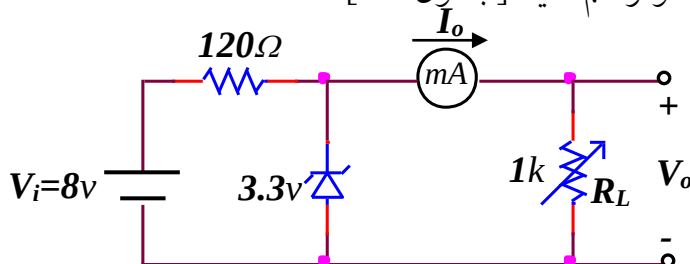
$$S_T \triangleq \left. \frac{\partial V_o}{\partial T} \right|_{V_i=cte, I_L=cte} \approx \left. \frac{\Delta V_o}{\Delta T} \right|_{V_i=cte, I_L=cte} \quad (4-6) \text{ ضریب تثبیت حرارتی:}$$

برای بدست آوردن ضرایب S_I ، S_V ابتدا باید مدار را حول نقطه کار خود خطی نموده و سپس با استفاده از مدار معادل خطی شده، این ضرایب را محاسبه کرد. برای بدست آوردن S_T باید ولتاژ خروجی را بصورت تابعی از درجه حرارت بدست آورد و سپس نسبت به حرارت مشتق جزئی گرفت.

آزمایش (۱): تثبیت کننده ولتاژ زنری

شکل ۱-۶ یک نمونه ساده تثبیت کننده ولتاژ با استفاده از دیود زنر را نشان می‌دهد.

۱-۱- مدار شکل ۱-۶ را بروی برد بُرد بسته و با تغییر R_L منحنی مشخصه V_o - I_o را برای این تثبیت کننده بدست آورده و رسم کنید [جدول ۱-۶].

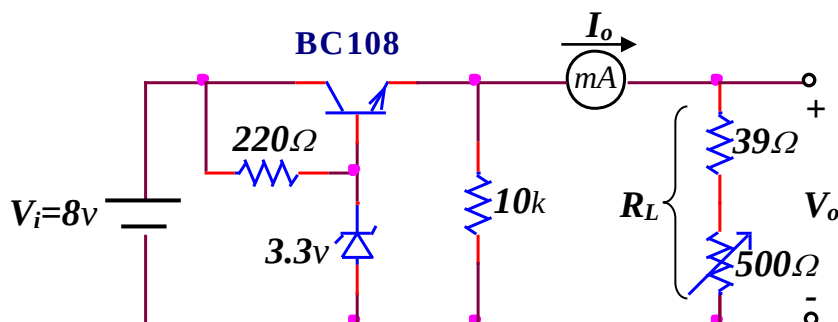


شکل ۱-۶: تثبیت کننده زنری

۱-۲- در حالت بی باری ($I_o=0$) با تغییر ولتاژ ورودی به میزان $\pm 10\%$ V_o را اندازه‌گیری کنید.

آزمایش (۲): تثبیت کننده ترانزیستوری

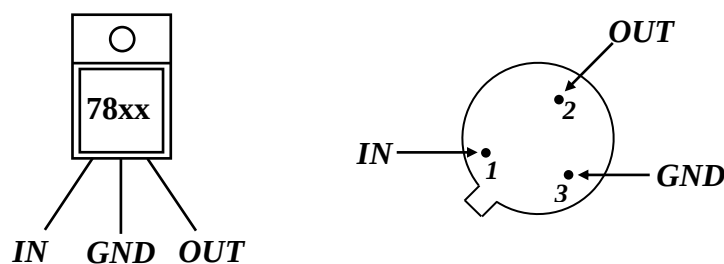
شکل ۶-۲ یک نمونه ساده تثبیت کننده ولتاژ ترانزیستوری را نشان می‌دهد. مدار شکل ۶-۲ را بروی برد بُرد بسته و مراحل ۱ و ۲ آزمایش (۱) را برای آن تکرار نمایید. نتایج را در جدول ۶-۱ یادداشت کنید.



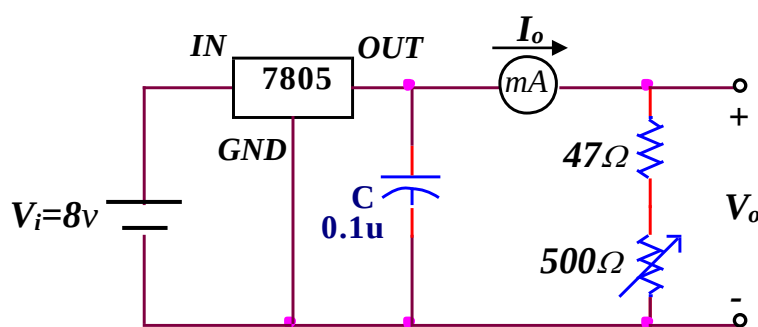
شکل ۶-۲: تثبیت کننده ساده ترانزیستوری

آزمایش (۳): تثبیت کننده ولتاژ با استفاده از رگلاتور سری 7805

مدار شکل ۶-۳ یک تثبیت کننده ولتاژ را نشان می‌دهد که بصورت یک مدار مجتمع می‌باشد. این رگلاتورها دارای ۳ پایه هستند که عبارتند از: پایه ورودی، پایه زمین (مشترک) و پایه خروجی. رگلاتورهای ۵ ولتی موجود در آزمایشگاه از نوع مثبت و از سری 7805، LM140، LM340 و ... می‌باشند که مشخصات پایه‌های آنها بشکل زیر است.



شکل ۶-۳: مشخصات پایه‌های دو نوع رگلاتور ولتاژ



شکل ۶-۴: رگلاتور ۵ ولتی

مدار شکل ۶-۴ را بروی برد بُرد بسته و مراحل ۱ و ۲ آزمایش (۱) را برای آن تکرار نمایید.
نتایج را در جدول ۶-۲ یادداشت کنید.

$I_o(mA)$ V_o	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
مدار شکل ۶-۱											
مدار شکل ۶-۲											

جدول ۶-۱

$I_o(mA)$ V_o	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
مدار شکل ۶-۳											

جدول ۶-۲

سوالات و محاسبات:

۱- با استفاده از نتایج بدست آمده در حالت بی باری، ضریب تثبیت ولتاژ S_V را برای سه آزمایش این جلسه بدست آورده و با هم مقایسه کنید.

۲- با استفاده از ولتاژ خروجی در نقاط $I_o=0$ و $I_o=20mA$ ضریب تثبیت جریان S_I را برای مدارهای شکل های ۶-۱ و ۶-۲ محاسبه کنید. این ضریب را برای مدار شکل ۶-۴ در نقاط $I_o=0$ و $I_o=50mA$ محاسبه نمایید.

۳- حداکثر جریانی را که می توان از مدار شکل ۶-۲ کشید به طوری که ولتاژ خروجی دارای تغییرات ناچیزی باشد، محاسبه کنید.

❖ آزمایش ۷

«آشنایی با بایاس ترانزیستور در تقویت کننده امیتر مشترک»

هدف: بعضی از مشخصات تقویت کننده‌ها همواره تابعی از پارامترها و مقادیر المان‌های مدار هستند. این پارامترها و مقادیر المان‌ها خود وابسته به عوامل مختلفی هستند. یکی از عامل‌های مهم، درجه حرارت و تغییرات آن است. از آنجایی که تغییرات درجه حرارت در محدوده نسبتاً وسیعی در محیط تقویت کننده‌ها امکان پذیر است. لذا می‌بایست این عامل در طراحی در نظر گرفته شود. یعنی مدار را به گونه‌ای طراحی نمود که حساسیت مشخصات و کمیت‌های مورد نظر نسبت به درجه حرارت کاهش یابد. در این جلسه دو نوع تقویت کننده امیتر مشترک با بایاس مختلف ارائه می‌شود و اثر درجه حرارت بروی بهره ولتاژ و ماکزیمم سوئینگ ولتاژ خروجی بررسی می‌گردد. مشاهده خواهید کرد که توپولوژی مدار نقش بسیار مهمی را در حساسیت مدار به حرارت ایفاء می‌کند.

وسایل مورد نیاز:

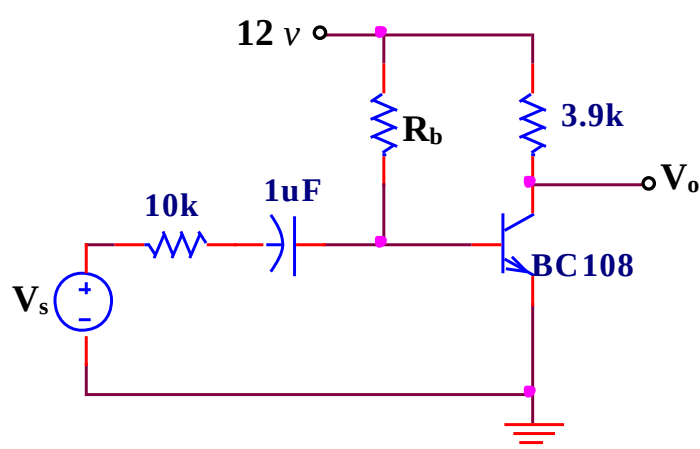
- ۱- اسیلوسکوپ: ۱ دستگاه
- ۲- مولد سیگنال: ۱ دستگاه
- ۳- منبع تغذیه ۱۵ ولتی: ۱ دستگاه
- ۴- مولتی متر دیجیتال: ۱ عدد
- ۵- برد بُرد: ۱ عدد
- ۶- ترانزیستور npn: ۲ عدد
- ۷- خازن $1\mu F$: ۱ عدد
- ۸- مقاومت‌های (مقاومت‌هایی که محاسبه می‌کنید) $+ (100, 2.7k, 3.9k, 10k) \Omega$
- ۹- هویه (یا سشوار): ۱ دستگاه

نحوه آزمایشات:

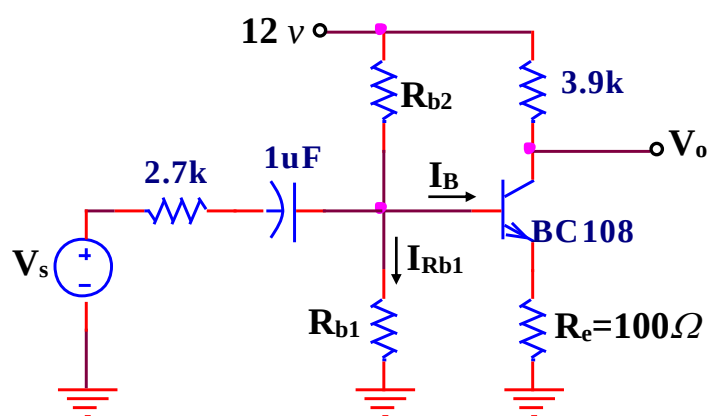
در جلسات گذشته مشخصه‌های ورودی و خروجی و انتقالی ترانزیستورها مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته‌اند. با توجه به مباحث تئوری و آزمایشات عملی می‌توان برای ترانزیستور

یک مدل AC از نظر سیگنال‌های کوچک ارائه داد و در بررسی‌های کمی از این مدل بهره جست.

مدارهای شکل ۱-۷ و ۲-۷ تقویت کننده‌های امیتر مشترک را نشان می‌دهند. وجه تمایز این تقویت کننده‌ها در طراحی مدار بایاس DC آن‌ها است. توجه داشته باشید که داشتن مشخصات ترانزیستورها برای انجام آزمایش ضروری بوده و همچنین در تمامی مراحل این آزمایش سیگنال ورودی را سینوسی با فرکانس 1kHz اختیار کنید. مراحل ۱ تا ۵ را برای هریک از این دو مدار انجام دهید.



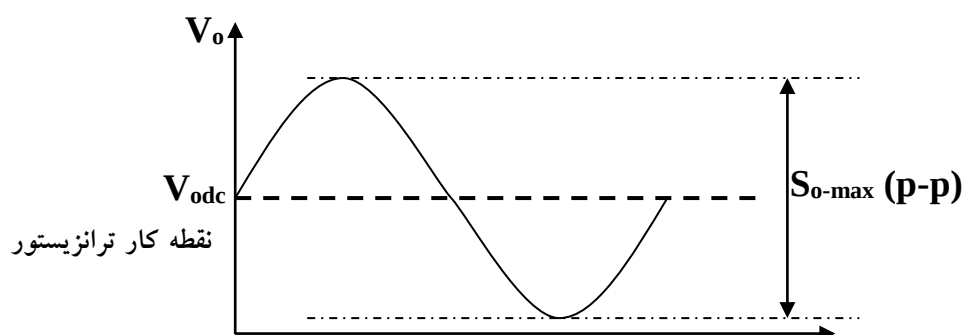
شکل ۱-۷: بایاس ثابت (تثبیت I_B)



شکل ۲-۷: بایاس با فیدبک جریان (تثبیت I_C)

۱- مقاومت‌های مجهول مدار تقویت کننده را به گونه‌ای انتخاب کنید که حداکثر سوئیچینگ ولتاژ را در خروجی تقویت کننده داشته باشیم. سپس نقاط کار ترانزیستور و حداکثر سوئیچینگ ولتاژ خروجی را محاسبه نمایید [جدول ۷-۱].

تذکره ۱: حداکثر سوئیچینگ ولتاژ خروجی به حداکثر ولتاژ خروجی متقارن حول نقطه کار گویند بطوری که شکل موج خروجی بدون اعوجاج و یا بریده شدن باشد. توجه کنید که یکسان بودن ولتاژ خروجی در دو سوی نقطه کار برای محاسبه سوئیچینگ ولتاژ الزامی است (شرط تقارن).



شکل ۷-۳: سوئیچینگ خروجی

تذکره ۲: در محاسبه مقاومت‌های شکل ۷-۲ سعی کنید که شرط $I_{R_{b1}} \geq 10I_B$ برقرار باشد. لزوم برقراری این شرط را بیان کنید.

۲- بهره ولتاژ تقویت کننده را محاسبه کنید [جدول ۸-۱].

۳- مدارهای شکل‌های ۷-۱ و ۷-۲ را به نوبت بروی برد بُرد بسته و نقطه کار ترانزیستور، حداکثر سوئیچینگ ولتاژ خروجی و بهره ولتاژ تقویت کننده را اندازه‌گیری نمایید [جدول ۷-۱].

تذکره ۳: در هنگام اندازه‌گیری سوئیچینگ ماکزیمم ولتاژ خروجی، آنقدر دامنه سیگنال ورودی را افزایش دهید تا شکل موج خروجی در آستانه بریده شدن واقع شود.

تذکره ۴: در هنگام اندازه‌گیری بهره ولتاژ بهتر است سوئیچینگ ولتاژ در حد ۱ الی ۲ ولت باشد تا شرایط سیگنال کوچک برقرار باشد. همچنین در هنگام اندازه‌گیری نقاط کار تقویت کننده، بهتر است که مولد سیگنال خاموش باشد.

۴- توسط یک سیستم حرارتی (فرضاً یک هویه و یا سشوار) درجه حرارت مدار را افزایش دهید. سپس بهره ولتاژ و حداکثر سوئیچینگ ولتاژ خروجی را اندازه‌گیری نمایید [جدول ۷-۲].

۵- ترانزیستور مدار تقویت کننده را تعویض کنید و سپس بهره ولتاژ و حداکثر سوئینگ ولتاژ خروجی را بدست آورید [جدول ۷-۲].

۶- با توجه به نتایج حاصل، این دو مدار تقویت کننده را با یکدیگر مقایسه نمائید.

مدار	پارامترها		$I_{CQ} (mA)$	$V_{CEQ} (V)$	$S_{O \max} (V)$	A_v
	R_b					
شکل ۱-۷			محاسبه			
			آزمایش			
شکل ۲-۷	R_{b1}	R_{b2}	محاسبه			
			آزمایش			

جدول ۷-۱: نتایج محاسبات و اندازه گیری های آزمایش

مدار	پارامترها		A_v	S_o
	اثر			
شکل ۱-۷	افزایش درجه حرارت			
	تعویض ترانزیستور			
شکل ۲-۷	افزایش درجه حرارت			
	تعویض ترانزیستور			

جدول ۷-۲: نتایج آزمایشات مربوط به تغییر پارامترها و شرایط مدار

❖ آزمایش ۸

«آشنایی با تقویت کننده کلکتور مشترک (امیتر پیرو)»

هدف: در این جلسه می‌خواهیم پارامترهای AC تقویت کننده کلکتور مشترک از قبیل ضریب تقویت، ماکزیمم ولتاژ بدون اعوجاج خروجی را بدست آوریم. البته باید توجه داشت که این پارامترها برای ناحیه کار خطی ترانزیستور محاسبه می‌شوند.

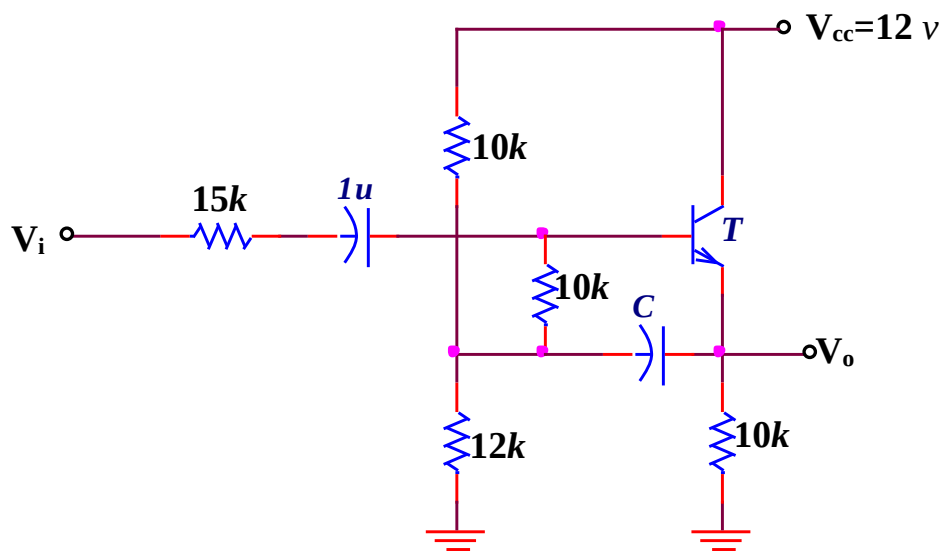
وسایل مورد نیاز:

- ۱- اسیلوسکوپ: ۱ دستگاه
- ۲- مولد سیگنال: ۱ دستگاه
- ۳- منبع تغذیه ۱۵ ولتی: ۱ دستگاه
- ۴- مولتی متر دیجیتال: ۱ عدد
- ۵- برد بُرد: ۱ عدد
- ۶- ترانزیستور npn: ۱ عدد
- ۷- خازن‌های $(2 \times 1, 10) \mu F$
- ۸- مقاومت‌های $(15k, 12k, 3 \times 10k) \Omega$

نحوه آزمایشات:

در جلسه گذشته با تقویت کننده امیتر مشترک آشنا شدیم. در این جلسه یک تقویت کننده کلکتور مشترک یا امیتر پیرو را بررسی خواهیم کرد. در این تقویت کننده سیگنال ورودی به پایه بیس ترانزیستور اعمال شده و سیگنال خروجی نیز از امیتر گرفته می‌شود. این تقویت کننده‌ها ولتاژ را تقویت نمی‌کنند (بهره ولتاژی کمتر از واحد)، بلکه جریان را بخوبی تقویت خواهند کرد. در این نوع تقویت کننده ولتاژ ورودی و خروجی هم‌فاز هستند. از مزایای دیگر این نوع تقویت کننده‌ها امپدانس ورودی بالای آن‌ها است لذا معمولاً در طراحی مدارات تقویت کننده چند طبقه از این مدار بعنوان طبقه بافر جهت غلبه بر اثر بارگذاری طبقه بعدی بر طبقه قبل و کاهش بهره تقویت کننده استفاده می‌گردد.

مدار شکل ۸-۱ یک تقویت کننده کلکتور مشترک را نشان می‌دهد. توجه داشته باشید که داشتن مشخصات ترانزیستور برای انجام آزمایش ضروری است و همچنین در تمامی مراحل این آزمایش سیگنال ورودی را سینوسی با فرکانس 1kHz اختیار کنید.



شکل ۸-۱: تقویت کننده کلکتور مشترک

- ۱- نقاط کار تقویت کننده شکل ۸-۱ را محاسبه کنید ($C=0$) [جدول ۸-۱].
- ۲- ضریب تقویت ولتاژ $A_v = \frac{V_o}{V_i}$ تقویت کننده را محاسبه کنید [جدول ۸-۱].
- ۳- مدار شکل ۸-۱ را بروی برد بُرد بسته و نقطه کار ترانزیستور و بهره ولتاژ تقویت کننده را اندازه‌گیری نمایید [جدول ۸-۱].
- ۴- به ازای $C=10\mu F$ مراحل ۱ تا ۳ را تکرار کنید و نتایج را با حالت $C=0$ مقایسه کنید [جدول ۸-۱].
- ۵- عملکرد خازن C را در مدار تقویت کننده شکل ۸-۱ توضیح دهید.

مدار	پارامترها موضوع	I_{CQ} (mA)	V_{CEQ} (V)	I_B (μA)	A_v
	محاسبه				
C=0	آزمایش				
	محاسبه				
C=10μF	آزمایش				
	محاسبه				

جدول ۸-۱: نتایج محاسبات و اندازه‌گیری‌های آزمایش

❖ آزمایش ۹

«بررسی تقویت کننده‌های عملیاتی»^۱

هدف: در این جلسه می‌خواهیم بعضی از مشخصات تقویت کننده عملیاتی را بدست آوریم و همچنین چند مدار عملی که در آن‌ها از تقویت کننده‌های عملیاتی استفاده شده است را مورد بررسی قرار دهیم.

وسایل مورد نیاز:

- ۱- اسیلوسکوپ: ۱ دستگاه
- ۲- منبع تغذیه ۱۵ ولتی: ۲ دستگاه
- ۳- مولتی متر دیجیتال: ۱ عدد
- ۴- برد بُرد: ۱ عدد
- ۵- مولد سیگنال سینوسی و مربعی
- ۶- آی سی "741" یا "Op-07"
- ۷- پتانسیومتر $10k\Omega$: ۱ عدد
- ۸- مقاومت‌های $(3.3k, 3 \times 10k, 100k) \Omega$
- ۹- خازن‌های $(330n, 1\mu) F$

نحوه آزمایشات:

آزمایش (۱): بدست آوردن بعضی از مشخصات تقویت کننده‌های عملیاتی

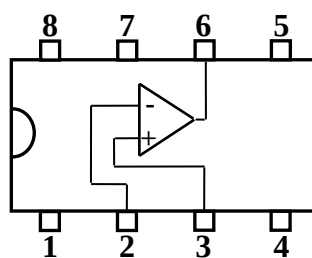
تقویت کننده‌های عملیاتی دارای مشخصاتی هستند که توسط کارخانه سازنده ارائه می‌شوند. کاربرد این تقویت کننده‌ها در مدارهای عملی بسیار زیاد است. در طراحی این مدارها، مشخصات تقویت کننده عملیاتی بکار رفته دارای اهمیت خاصی است. در این آزمایش، بعضی از مشخصات تقویت کننده عملیاتی را بدست می‌آوریم. این مشخصات عبارتند از:

الف- V_{OS} (ولتاژ آفست ورودی)^۲: ولتاژی که باید بین پایه‌های مثبت و منفی opamp اعمال شود تا ولتاژ خروجی صفر شود.

1. Operational Amplifiers (Op amp)
2. Input offset voltage

ب- SR (سرعت چرخش^۱): ماکزیمم تغییرات زمانی ولتاژ خروجی تقویت کننده عملیاتی را سرعت چرخش می نامند.

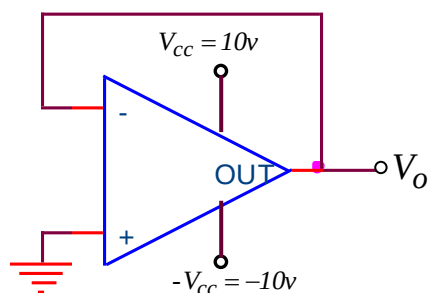
تقویت کننده عملیاتی موجود در آزمایشگاه از نوع «741» است که در بسته بندی مختلف (پلاستیکی و فلزی) است. شکل ۹-۱ نمای از بالای مدل پلاستیکی این آی سی را نشان می دهد (بطور کلی هر آی سی تقویت کننده ۸ پایه).



شکل ۹-۱: بسته بندی پلاستیکی آی سی «741»

پایه های این آی سی به شکل زیر است:

- پایه (۱) و (۵): تنظیم ولتاژ صفر خروجی^۲
- پایه (۲): ورودی معکوس (V^-)
- پایه (۳): ورودی مستقیم (V^+)
- پایه (۴): منبع تغذیه منفی ($-V_{CC}$)
- پایه (۶): خروجی آی سی (V_O)
- پایه (۷): منبع تغذیه مثبت (V_{CC})
- پایه (۸): به جایی وصل نیست^۳



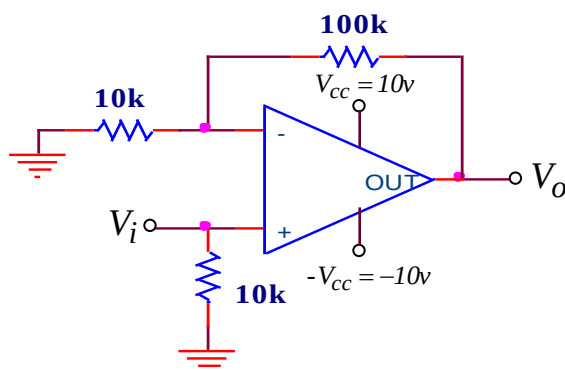
شکل ۹-۲

۱-۱- مدار شکل ۹-۲ را بروی برد برد بسته و ولتاژ خروجی را اندازه گیری کنید. این ولتاژ نمایانگر چه پارامتری است؟ [جدول ۹-۱]

۱-۲- در آی سی «741» پایه های (۱) و (۵) برای از بین بردن اثر ولتاژ آفست ورودی و تنظیم ولتاژ خروجی در نظر گرفته شده است. بدین طریق که دو سر یک پتانسیومتر (مثلاً $10k$) را به پایه های (۱) و (۵) وصل می کنیم و سر وسط را به ولتاژ پایه (۴) متصل می کنیم و در حالی که ورودی تقویت کننده صفر است با تنظیم پتانسیومتر، ولتاژ خروجی را صفر می کنیم. مدار

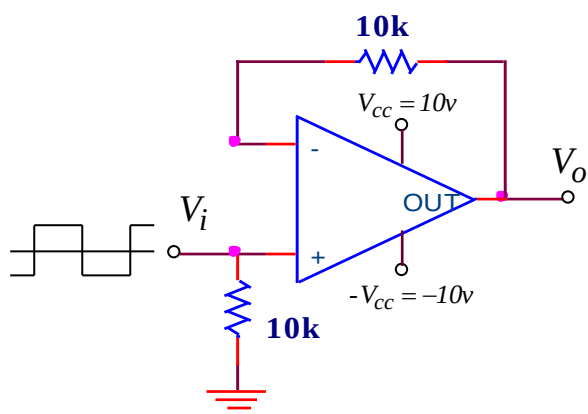
1. Slew Rate
2. Offset null
3. No connected (NC)

شکل ۳-۹ یک تقویت کننده «معکوس نکننده» را نشان می‌دهد. ولتاژ ورودی V_i را زمین کنید و ولتاژ خروجی را اندازه‌گیری کنید. سپس توسط یک پتانسیومتر $10k$ ولتاژ خروجی را صفر نمایید [جدول ۹-۱].



شکل ۳-۹

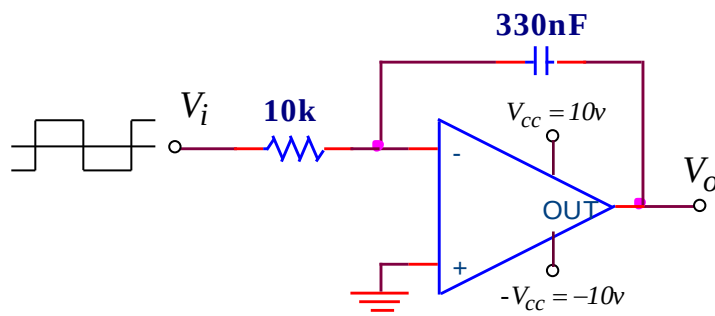
۳-۱- مدار شکل ۴-۹ را در نظر بگیرید. برای اندازه‌گیری ماکزیمم تغییرات زمانی ولتاژ خروجی (SR) تقویت کننده عملیاتی، به ورودی این تقویت کننده یک موج مربعی با دامنه $3V$ و فرکانس $35kHz$ اعمال کرده و شکل موج خروجی را رسم کنید. سرعت چرخش (SR) را از روی شکل موج خروجی محاسبه کنید [شکل ۷-۹ و جدول ۹-۱].



شکل ۴-۹

۴-۱- مدار شکل ۵-۹ را در نظر بگیرید. برای این مدار رابطه زیر را تحقیق کنید.

$$V_o(t) = \frac{-1}{RC} \int V_i(t) dt \quad (۹-۱)$$



شکل ۵-۹

- به نظر شما اگر یک ولتاژ مربعی با دامنه 1v و فرکانس 2kHz به ورودی مدار اعمال کنید چه شکل موجی را در خروجی مدار انتظار دارید؟
- مدار شکل ۹-۵ را بروی برد بُرد بسته و شکل موج خروجی را مشاهده نمایید. آیا این شکل موج را انتظار داشتید؟ علت را توضیح دهید.
- یک پیشنهاد عملی برای رفع این اشکال ارائه دهید.

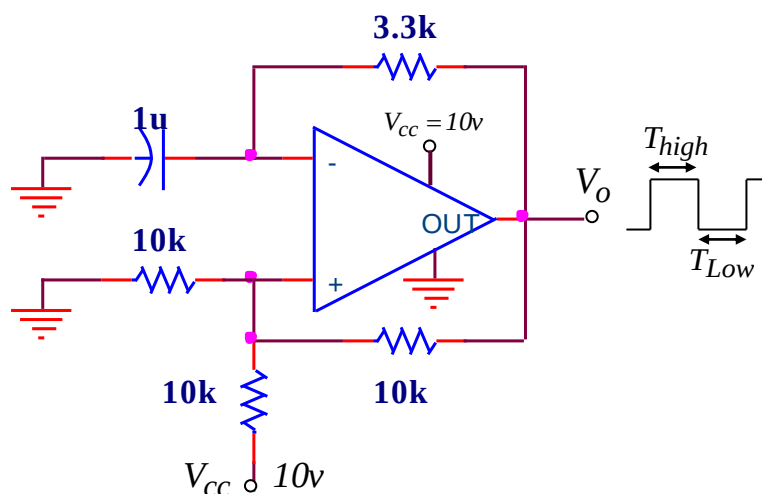
آزمایش (۲): مولد موج مربعی

تقویت کننده های عملیاتی دارای کاربردهای متنوعی هستند. در این قسمت تنها یک کاربر آنها را مورد بررسی قرار می دهیم. مدار شکل ۹-۶ یک مبدل موج مربعی را که از تقویت کننده عملیاتی در آن استفاده شده است را نشان می دهد.

۲-۱- عملکرد مدار شکل ۹-۶ را بطور کیفی توضیح دهید.

۲-۲- شکل موج ولتاژ خروجی V_o بصورت مربعی است. مقادیر T_{high} ، T_{Low} و $f = 1/T$ را برای این شکل موج مدار محاسبه کنید [جدول ۹-۲].

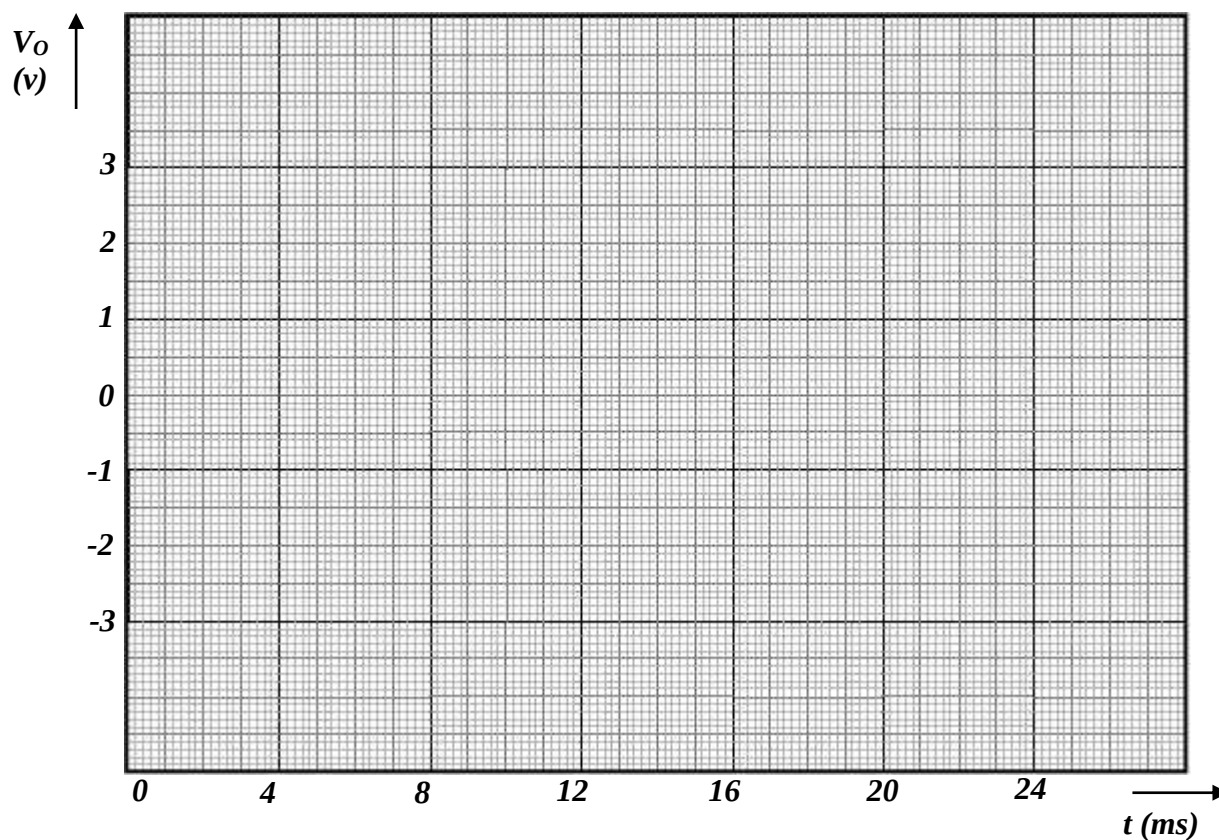
۲-۳- مدار را بروی برد بُرد بسته و شکل موج خروجی را رسم کنید. از روی آن T_{high} ، T_{Low} و f را بدست آورید [جدول ۹-۲ و شکل ۹-۸].



شکل ۹-۶

V_o (مدار شکل ۹-۱)	V_o (مدار شکل ۹-۲)	SR

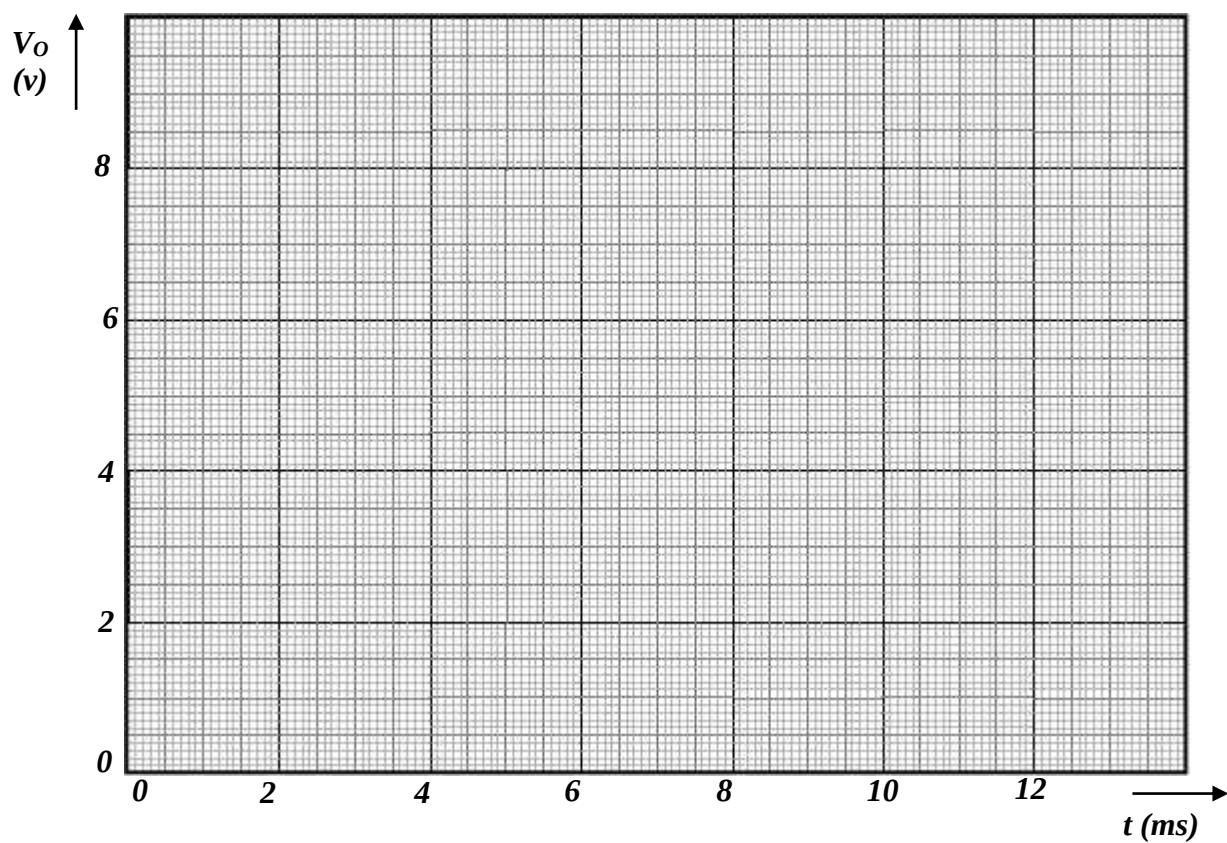
جدول ۹-۱



شکل ۹-۷: اندازه‌گیری سرعت چرخش (SR)

	T_{high}	T_{Low}	$f=1/T$
محاسبه			
آزمایش			

جدول ۹-۲: مشخصات شکل موج خروجی مولد ولتاژ مربعی



شکل ۹-۸: شکل موج خروجی مولد مربعی