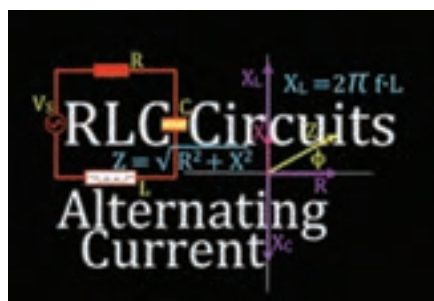


# پودمان ۵

## محاسبه مقادیر AC در مدارهای الکترونیکی



قطعات R، L و C در مدارهای الکترونیکی و سامانه‌های مخابراتی نقشی کلیدی بر عهده دارند. در مدارهای الکترونیکی دستگاه‌هایی مانند رادیو، تلویزیون، فرستنده‌های رادیویی و تلویزیونی و مدارهای مکالمه، ترکیب متنوعی از R، L و C با اتصال سری و موازی وجود دارد. مثلاً در یک نوسان‌ساز که قلب یک دستگاه فرستنده است، ترکیبی از قطعات R، L و C به کار گرفته شده است. تنظیم ایستگاه در فرستنده‌ها و دریافت یک سیگنال با فرکانس معین در گیرنده‌ها بر عهده این قطعات است. در یک واحد صنعتی، الکتروموتورهای پر قدرت، تأمین انرژی مکانیکی واحد صنعتی را بر عهده دارند. این سامانه‌های را می‌توان با یک مدار معادل ساده سری یا موازی مانند مدار RL، RC یا RLC مدل‌سازی کرد. لذا آموزش مدارهای ترکیبی سری و موازی با قطعات R، L و C در جریان متناوب امری ضروری است. با حل مثال‌های متعدد و شبیه‌سازی مدارها توسط نرم‌افزار می‌توان به آموزش عمق بیشتری بخشید.

# واحد یادگیری ۹

## کسب شایستگی در تحلیل انواع فیلترها، نوسان سازها و انجام محاسبات ساده مدارهای تک فاز و سه فاز

### آیا تا به حال فکر کرده‌اید:

- مدار معادل یک سلف واقعی از چه عناصری تشکیل شده است؟
- مدار معادل یک خازن واقعی را با چه عناصری می‌توان معادل سازی کرد؟
- مدارهای سری و موازی RL یا RC در جریان متناوب چه رفتاری دارند؟
- قوانین حاکم بر حل مدارهای جریان DC چه مشابهت‌هایی با قوانین مدارهای جریان AC دارد؟
- با استفاده از اعداد مختلط چگونه می‌توان مدارهای جریان متناوب را حل نمود؟
- با قطعات R، L و C چه فیلترهایی می‌توان ساخت؟
- چه روش‌هایی برای حل مدارهای جریان متناوب وجود دارد؟
- مدارهای سه فاز با مدارهای تک فاز چه تفاوتی دارد؟

در اغلب مدارهای الکترونیکی و مدارهای قدرت، قطعاتی مانند مقاومت، سلف و خازن به کار گرفته شده‌اند. در پایه دهم و یازدهم با این قطعات تا حدودی آشنا شده‌اید و در پروژه‌های مربوطه عملاً آنها را به کار برده‌اید. رفتار برخی از این قطعات در جریان متناوب با جریان مستقیم متفاوت است. برای گسترش توانایی و افزایش مهارت در محاسبات، لازم است به بررسی دوباره و تمرین در این زمینه پرداخته شود. به همین دلیل کاربرد این قطعات به عنوان فیلتر و انجام محاسبات در فیلترها نیز ضروری است. در این واحد یادگیری مدارهای ترکیبی شامل مقاومت، سلف و خازن و محاسبه کمیت‌های مدار در حد مورد نیاز توضیح داده شده است. در بخشی از این واحد استفاده از اعداد مختلط برای حل مسائل توصیه شده است، زیرا استفاده از این اعداد حل مدارهای برداری الکترونیکی را ساده تر می‌کند. به دلیل کاربرد مدارهای سه فاز در صنایع و ارتباط آن با الکترونیک، این مبحث نیز در حد مورد نیاز توضیح داده شده است. برای درک بهتر مطالب، استفاده از نرم افزار مناسب و شبیه سازی مدارها و مقایسه نتایج حاصل شده از نرم افزار با محاسبات، توصیه می‌شود.

### استاندارد عملکرد

تحلیل انواع فیلترها، مدارهای تک فاز و سه فاز

## ۹-۱- یادآوری عملکرد راکتانس سلفی و خازنی در مدار AC

در پایه دهم در مبحث مدارهای جریان متناوب با مدار اهمی خالص، سلفی خالص و خازنی خالص آشنا شده‌اید. همچنین دریافتید که جریان و ولتاژ در دو سر مقاومت اهمی خالص هم‌فاز هستند. در سلف خالص جریان از ولتاژ دو سر آن ۹۰ درجه عقب‌تر است و در خازن خالص جریان از ولتاژ دو سر آن ۹۰ درجه جلوتر است. سلف خالص در جریان متناوب، دارای عکس‌العمل یا راکتانس القایی است که آن را با  $X_L$  نشان می‌دهیم. مقدار  $X_L$  از رابطه  $X_L = 2\pi f L = \omega L$  به دست می‌آید. با صرف نظر کردن از مقاومت اهمی کم سیم‌پیچ، در جریان DC، مقدار  $f=0$  است و  $X_L=0$  می‌شود. خازن خالص نیز در جریان متناوب دارای راکتانس خازنی است که آن را با  $X_C$  نشان می‌دهیم. مقدار  $X_C$  از رابطه  $X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{\omega C}$  به دست می‌آید. در جریان DC  $f=0$  و  $X_C$  به سمت بی‌نهایت میل می‌کند، (خازن مانند مدار باز عمل می‌کند).

**مثال ۱-** راکتانس القایی سلفی با ضریب خودالقایی ۲۰mH را در جریان سینوسی با فرکانس ۵۰۰۰ هرتز محاسبه کنید.

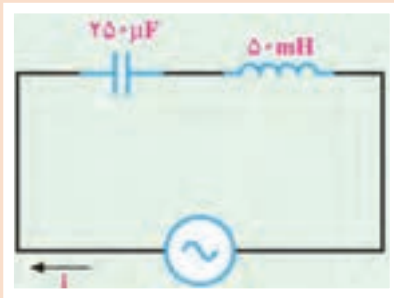
$$X_L = 2\pi f L = 2 \times 3.14 \times 5000 \times 20 \times 10^{-3} = 628 \Omega$$

**حل:**

**مثال ۲-** راکتانس خازنی با ظرفیت ۱۰۰ nF را در جریان سینوسی با فرکانس ۱۰۰۰ هرتز محاسبه کنید.

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 1000 \times 100 \times 10^{-9}} = \frac{1000000}{628} = 1592.3 \Omega$$

**حل:**



شکل ۹-۱

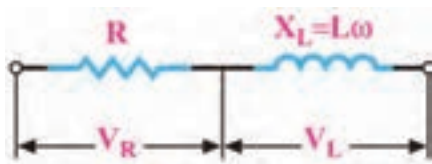
در مدار شکل ۹-۱،  $X_L$  و  $X_C$  را محاسبه کنید. فرکانس منبع ۱۰۰۰ هرتز است.

فعالیت

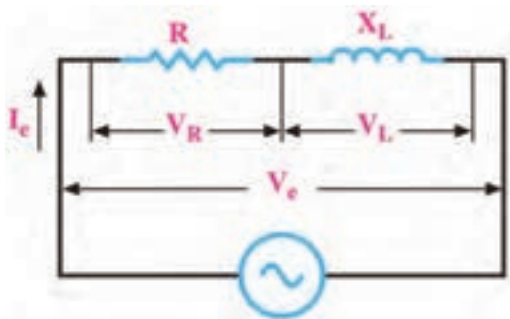


## ۹-۲- روش‌های حل مدارهای جریان متناوب

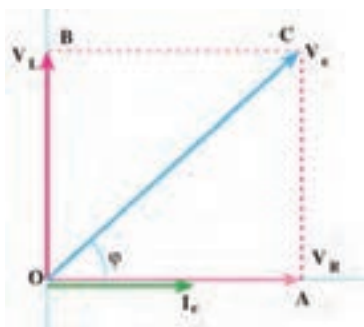
برای به دست آوردن کمیت‌های مختلف در مدارهای جریان متناوب، روش‌های مختلفی وجود دارد. استفاده از رسم دیاگرام برداری کمیت‌ها و انجام محاسبات با به کارگیری قوانین حاکم بر بردارها، یکی از روش‌های متداول است. این روش به دلیل رسم بردارها از پیچیدگی خاص خود برخوردار است. استفاده از اعداد مختلط برای حل مدارهای جریان متناوب روشی ساده‌تر به شمار می‌آید. در این پیمانچه از شرح انجام محاسبات و اثبات فرمول‌ها با استفاده از ترسیم کمیت‌های برداری تقریباً صرف نظر کرده‌ایم و فقط با فرمول‌های مورد نیاز، مسائل را حل خواهیم کرد. استفاده از اعداد مختلط برای حل مدارهای جریان متناوب با زبانی ساده شرح داده می‌شود و مسائل ساده‌ای از مدارهای الکتریکی جریان متناوب با استفاده از اعداد مختلط حل خواهد شد.



شکل ۹-۲- مدار معادل سلف حقیقی



شکل ۹-۳- مدار RL سری



شکل ۹-۴- دیاگرام برداری مدار RL

مدار معادل الکتریکی یک سلف واقعی، به صورت راکتانس القایی ( $X_L$ ) و یک مقاومت اهمی سری با آن در شکل ۹-۲ رسم شده است. سلف واقعی در جریان متناوب دارای مقاومت ظاهری یا امپدانس ظاهری (Impedance) است که آن را با  $Z$  نشان می‌دهند. امپدانس مانند مقاومت اهمی و راکتانس سلفی و خازنی برحسب اهم محاسبه می‌شود.

■ محاسبه امپدانس مدار RL سری: در مدار RL سری شکل ۹-۳، جریان  $I_e$  (جریان مؤثر مدار) از  $R$  و راکتانس القایی ( $X_L$ ) عبور می‌کند. بنابراین ولتاژهای دو سر مقاومت و سلف از روابط  $V_L = X_L \cdot I_e = 2\pi f L \cdot I_e = L\omega I_e$  و  $V_R = R \cdot I_e$  به دست می‌آید. با جریان  $I_e$  هم‌فاز و  $V_L$  از جریان  $I_e$  به اندازه  $90^\circ$  درجه، جلوتر یا پیش‌فاز است. لذا می‌توانیم جریان مدار و ولتاژ دو سر  $V_L$  و  $V_R$  را مطابق شکل ۹-۴ به صورت برداری نشان دهیم. با توجه به بردارها و قضیه فیثاغورث، مقدار امپدانس مدار RL از رابطه  $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$  به دست می‌آید.

☑ زاویه یا فاز  $\phi$  اختلاف فاز بین جریان و ولتاژ کل مدار یا  $V_e$  است که از رابطه  $\phi = \tan^{-1} \frac{X_L}{R}$  به دست می‌آید.

☑ ضریب قدرت ( $\cos \phi$ ) از رابطه  $\cos \phi = \frac{R}{Z}$  قابل محاسبه است.

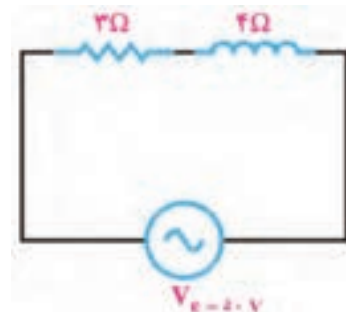
مثال ۳- در مدار شکل ۹-۵ مقادیر امپدانس مدار، جریان مؤثر مدار و ضریب قدرت ( $\cos \phi$ ) را محاسبه کنید.

پاسخ:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{3^2 + 4^2} = \sqrt{25} = 5 \Omega$$

$$I_e = \frac{V_e}{Z} = \frac{50}{5} = 10 \text{ A}$$

$$\cos \phi = \frac{R}{Z} \Rightarrow \cos \phi = \frac{3}{5} = 0.6$$



شکل ۹-۵- مدار RL

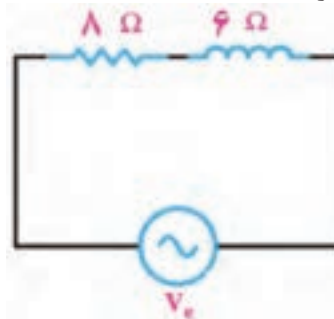
**مثال ۴-** در مدار شکل ۹-۶ از مدار جریان مؤثر ۲ آمپر عبور می‌کند، مقادیر ولتاژ مؤثر مدار و ضریب قدرت (COSφ) مدار را محاسبه کنید.

پاسخ:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{8^2 + 6^2} = \sqrt{100} = 10 \Omega$$

$$V_e = Z \times I_e = 10 \times 2 = 20 \text{ V}$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} \Rightarrow \cos \varphi = \frac{8}{10} = 0.8$$



شکل ۹-۶

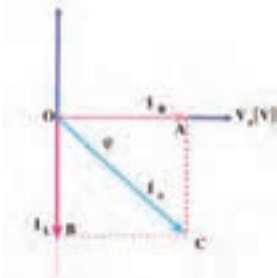
با توجه به روابط توان که در پایه دهم آموختید، توان ظاهری، توان حقیقی و ضریب قدرت را برای مثال‌های حل شده بالا به دست آورید. نتایج را با مقادیر محاسبه شده در مثال‌ها مقایسه کنید و نتیجه را در قالب یک گزارش ارائه دهید.

فعالیت

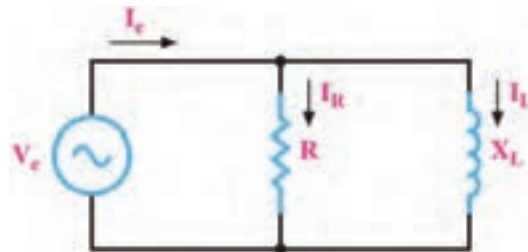


### ■ مدار RL موازی

مدار RL موازی در شکل ۹-۷ رسم شده است. با توجه به شکل ۹-۷ می‌توان گفت، جریان  $I_e$  از دو جریان  $I_R$  و  $I_L$  تشکیل شده است. در مدار موازی ولتاژ دو سر  $R$  و راکتانس القایی ( $X_L$ ) با هم برابرند ولی دو جریان  $I_R$  و  $I_L$  ۹۰ درجه اختلاف فاز دارند. اگر ولتاژ را مبنا قرار دهیم مطابق شکل ۹-۸ اختلاف فاز بین جریان و ولتاژ مدار برابر  $\varphi$  درجه است. جریان کل مدار ( $I_e$ ) از رابطه  $I_e = \sqrt{I_R^2 + I_L^2}$  به دست می‌آید.



شکل ۹-۸- دیاگرام برداری RL موازی



شکل ۹-۷- مدار RL موازی

### □ محاسبه امپدانس و ضریب قدرت در مدار RL موازی

در مدار RL موازی با معلوم بودن  $I_e$  (جریان مؤثر مدار) و  $V_e$  (ولتاژ مؤثر کل مدار) می‌توان از رابطه  $Z = \frac{V_e}{I_e}$  امپدانس مدار را محاسبه کرد. اگر مقدار  $R$  و  $X_L$  معلوم باشد از رابطه  $Z = \frac{R \cdot X_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$  امپدانس قابل محاسبه است. ضریب قدرت (COSφ) از رابطه  $\cos \varphi = \frac{Z}{R}$  به دست می‌آید.

**مثال ۵-** در مدار شکل ۹-۹ ولتاژ مؤثر مدار ۲۴۰ ولت است. مقادیر جریان مؤثر، امپدانس و ضریب قدرت (COSφ) مدار را محاسبه کنید.

$$I_L = \frac{V_e}{X_L} = \frac{240}{60} = 4A$$

پاسخ:

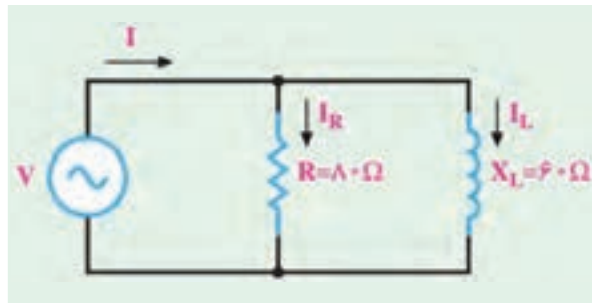
$$I_R = \frac{V_e}{R} = \frac{240}{80} = 3A$$

$$I_e = \sqrt{I_R^2 + I_L^2} = \sqrt{3^2 + 4^2} = \sqrt{25} = 5A$$

$$Z = \frac{V_e}{I_e} = \frac{240}{5} = 48 \Omega$$

$$\cos \phi = \frac{Z}{R}$$

$$\cos \phi = \frac{48}{80} = 0.6$$



شکل ۹-۹

مثال ۶- در مدار شکل ۹-۱۰ مقادیر  $V_e$ ،  $I_R$ ،  $I_e$  و امپدانس مدار را محاسبه کنید.

پاسخ:

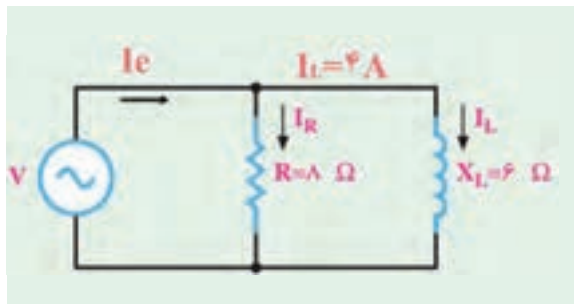
$$V_e = X_L \times I_e = 6 \times 4 = 24V$$

$$I_R = \frac{V_e}{R} = \frac{24}{8} = 3A$$

$$I_e = \sqrt{I_R^2 + I_L^2}$$

$$I_e = \sqrt{3^2 + 4^2} = \sqrt{25} = 5A$$

$$Z = \frac{V_e}{I_e} = \frac{24}{5} = 4.8 \Omega$$

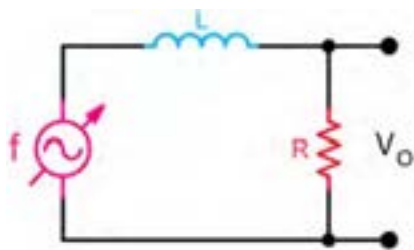


شکل ۹-۱۰

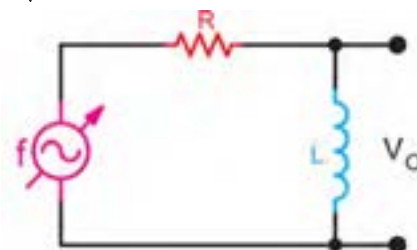
☑ مدار **RL** به عنوان فیلتر: با ساختمان فیلترها در پایه یازدهم در درس ساخت پروژه آشنا شده‌اید. در شکل الف و ب ۹-۱۱ دو نوع فیلتر بالاگذر و پایین گذر رسم شده است. با تغییر فرکانس منبع، مقدار  $X_L$  تغییر می‌کند.

در فرکانس قطع،  $X_L$  با  $R$  برابر می‌شود.  $R = X_L = 2\pi fL \rightarrow f = f_C = \frac{R}{2\pi L}$

در فرکانس قطع، مقدار ولتاژ خروجی برابر  $V_O = \frac{V_i}{\sqrt{2}}$  است.



ب) فیلتر پایین گذر



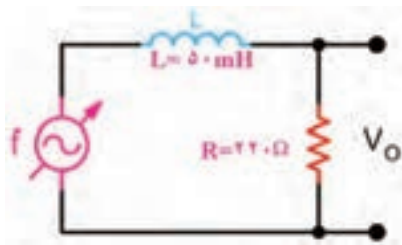
الف) فیلتر بالاگذر

شکل ۹-۱۱- فیلترهای RL



تحقیق کنید به چه دلیل در فرکانس قطع رابطه  $V_O = \frac{V_i}{\sqrt{2}}$  برقرار است؟

در ساعات غیر درسی با استفاده از نرم افزار مولتی سیم، فیلترهای بالاگذر و پایین گذر را شبیه سازی کنید، سپس با تغییر فرکانس، مقدار ولتاژ خروجی را اندازه بگیرید و منحنی پاسخ فرکانسی فیلترها را رسم کنید و نتیجه را در قالب یک گزارش ارائه دهید.



شکل ۹-۱۲- فیلتر RL

**مثال ۷-** در مدار فیلتر شکل ۹-۱۲ مطلوب است: الف) نوع فیلتر ب) محاسبه فرکانس قطع فیلتر پاسخ: نوع فیلتر پایین گذر است.

$$f_c = \frac{R}{2\pi L} = \frac{220}{2 \times 3.14 \times 50 \times 10^{-3}} = \frac{2200}{3.14} \cong 700 \text{ Hz}$$

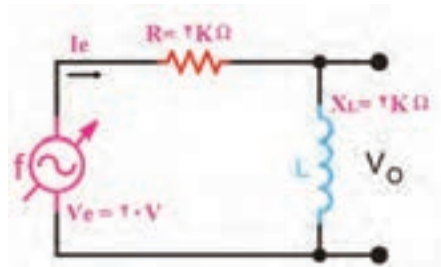
**مثال ۸-** در مدار شکل ۹-۱۳ مقادیر امپدانس، جریان مؤثر، ولتاژ خروجی  $V_O$  را محاسبه کنید. بین  $V_O$  و  $V_e$  چه رابطه‌ای وجود دارد؟

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{2^2 + 2^2} = \sqrt{8} = 2\sqrt{2} \text{ K}\Omega$$

$$I_e = \frac{V_e}{Z} = \frac{20}{2\sqrt{2}} = 5\sqrt{2} \text{ mA}$$

$$V_O = X_L \times I_e = 2 \times 5\sqrt{2} = 10\sqrt{2} \text{ V}$$

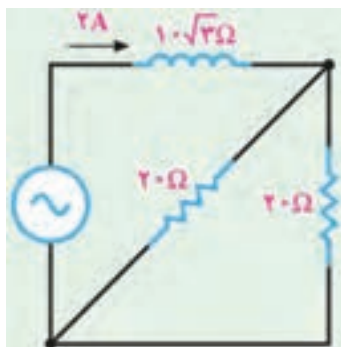
$$V_O = \frac{V_i}{\sqrt{2}} = \frac{20}{\sqrt{2}} = 10\sqrt{2}$$



شکل ۹-۱۳- فیلتر RL

پاسخ:

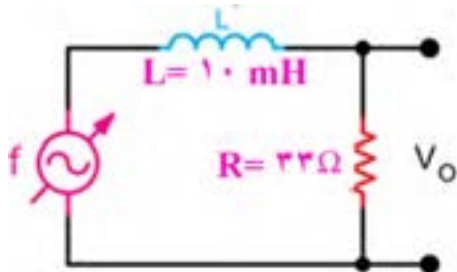
کار با نرم افزار در ساعات غیر درسی: مثال‌های حل شده را در نرم افزار مولتی سیم یا هر نرم افزار دیگر ببینید و جریان مدار و سایر کمیت‌ها را اندازه بگیرید و با محاسبات انجام شده مقایسه کنید.



شکل ۹-۱۴

### الگوی پرسش

- ۱- در جریان DC، سلف خالص مانند ..... و خازن خالص مانند ..... عمل می کند.
- ۲- در مدار RL سری، جریان مدار نسبت به ولتاژ منبع ۹۰ درجه اختلاف فاز دارد.  غلط  صحیح
- ۳- در مدار شکل ۹-۱۴ مطلوب است محاسبه الف) امپدانس مدار ب) ولتاژ مؤثر مدار پ) ضریب قدرت ( $\cos\phi$ )



شکل ۹-۱۵

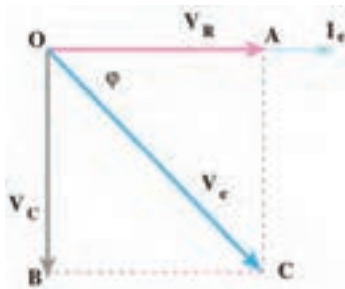
۴- در مدار فیلتر شکل ۹-۱۵ مطلوب است:  
 الف) نوع فیلتر  
 ب) محاسبه فرکانس قطع فیلتر

### ۹-۴- مدار RC

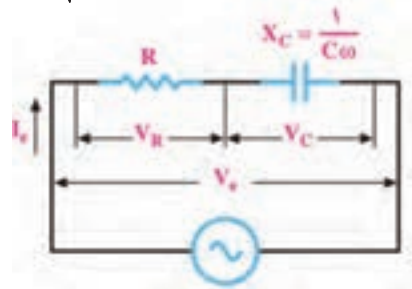
ترکیب عناصر مقاومتی و خازنی در مدارهای الکترونیکی، مخابراتی، الکترونیک صنعتی و شبکه‌های قدرت مانند فیلترها، تایمرها و تصحیح کننده ضریب قدرت کاربرد فراوان دارند.

☑ محاسبه امپدانس و ضریب قدرت در مدار RC سری: در مدار RC سری شکل ۹-۱۶، جریان  $I_e$  (جریان مؤثر مدار) از R و راکتانس خازنی ( $X_C$ ) عبور می‌کند. بنابراین  $V_R$  با جریان هم‌فاز و  $V_C$  از جریان  $I_e$  به اندازه ۹۰ درجه، عقب‌تر (پس‌فاز) است. لذا می‌توانیم جریان مدار و ولتاژ  $V_R$  و  $V_C$  را مطابق شکل برداری ۹-۱۷ نشان دهیم.

امپدانس مدار RC از رابطه  $Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$  به دست می‌آید.



شکل ۹-۱۷- دیاگرام برداری مدار RC سری



شکل ۹-۱۶- مدار RC سری

زاویه فاز  $\phi$  اختلاف فاز بین جریان و ولتاژ کل مدار ( $V_e$ ) است. ضریب قدرت ( $\cos\phi$ ) از رابطه  $\cos\phi = \frac{R}{Z}$  قابل محاسبه است.

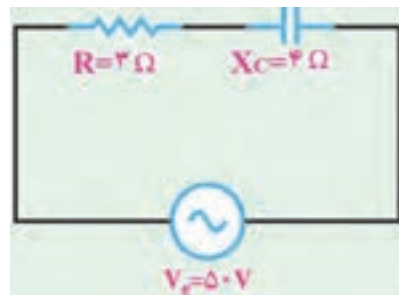
مثال ۹- در مدار شکل ۹-۱۸ مقادیر امپدانس، جریان مؤثر و ضریب قدرت ( $\cos\phi$ ) مدار را محاسبه کنید.

پاسخ:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{3^2 + 4^2} = \sqrt{25} = 5 \Omega$$

$$I_e = \frac{V_e}{Z} = \frac{50}{5} = 10 \text{ A}$$

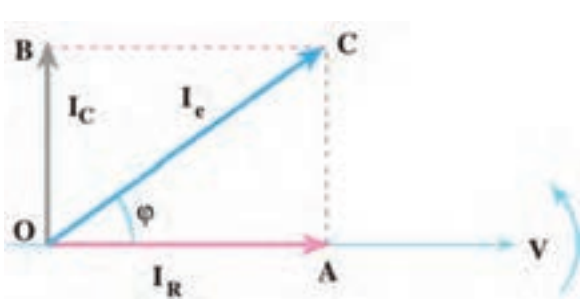
$$\cos\phi = \frac{R}{Z} = \frac{3}{5} = 0.6$$



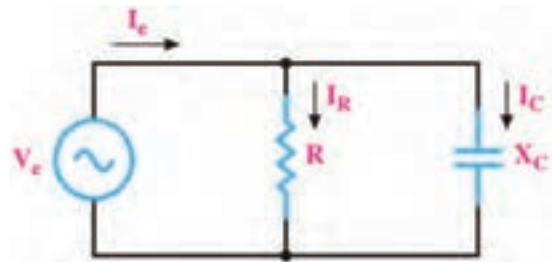
شکل ۹-۱۸- مدار RC سری



■ مدار RC موازی: یک خازن واقعی، عملاً به صورت یک خازن ایده آل و یک مقاومت اهمی موازی با آن عمل می کند. مقاومت اهمی موازی شده، همان مقاومت نشتی خازن است. علت تخلیه شدن خازن به مرور زمان، وجود همین مقاومت است. مدار RC موازی در شکل ۹-۱۹ رسم شده است. با توجه به شکل ۹-۱۹ می توان گفت جریان  $I_e$  از دو جریان  $I_R$  و  $I_C$  تشکیل شده است. در مدار موازی ولتاژ دو سر  $R$  و راکتانس خازنی ( $X_C$ ) با هم برابرند ولی دو جریان  $I_C$  و  $I_R$ ،  $90^\circ$  درجه اختلاف فاز دارند. اگر ولتاژ را مبنا قرار دهیم مطابق شکل ۹-۲۰ اختلاف فاز بین جریان و ولتاژ مدار برابر  $\phi$  درجه است.



شکل ۹-۲۰- دیاگرام برداری مدار RC موازی



شکل ۹-۱۹- مدار RC موازی

#### ☑ روابط مورد نیاز در مدار RC موازی

□ جریان کل مدار ( $I_e$ ) از رابطه  $I_e = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}$  به دست می آید.

□ اگر جریان  $I_e$  (جریان مؤثر مدار) و  $V_e$  (ولتاژ مؤثر کل مدار) معلوم باشد امپدانس مدار از رابطه  $Z = \frac{V_e}{I_e}$  قابل محاسبه است.

□ اگر مقدار  $R$  و  $X_C$  معلوم باشد از رابطه  $Z = \frac{R \cdot X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}$  نیز می توان امپدانس را محاسبه کرد.

□ ضریب قدرت ( $\cos \phi$ ) از رابطه  $\cos \phi = \frac{Z}{R}$  به دست می آید.

مثال ۱۰- در مدار شکل ۹-۲۱ (مطلوب است محاسبه الف) جریان مؤثر مدار (ب) امپدانس مدار (پ) ضریب قدرت ( $\cos \phi$ )

پاسخ:

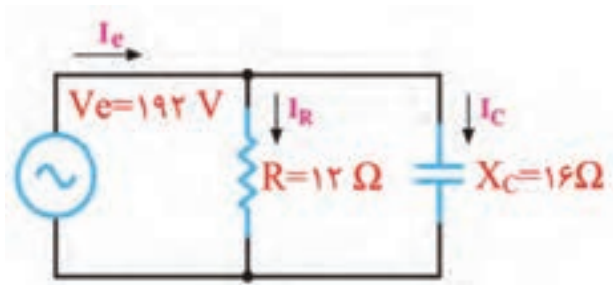
$$I_C = \frac{V_e}{X_C} = \frac{192}{16} = 12 \text{ A}$$

$$I_R = \frac{V_e}{R} = \frac{192}{12} = 16 \text{ A}$$

$$I_e = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} = \sqrt{16^2 + 12^2} = \sqrt{400} = 20 \text{ A}$$

$$Z = \frac{V_e}{I_e} = \frac{192}{20} = 9.6 \Omega$$

$$\cos \phi = \frac{Z}{R} = \frac{9.6}{12} = 0.8$$



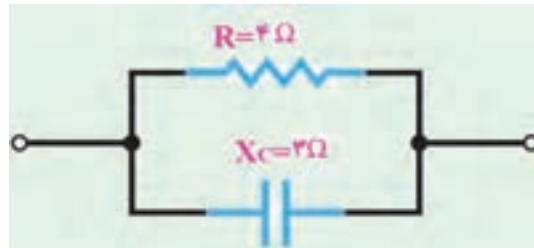
شکل ۹-۲۱

مثال ۱۱- در مدار شکل ۹-۲۲، امپدانس مدار و ضریب قدرت ( $\cos\phi$ ) را محاسبه کنید.

پاسخ:

$$Z = \frac{R \times X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} = \frac{4 \times 3}{\sqrt{4^2 + 3^2}} = \frac{12}{5} = 2.4 \Omega$$

$$\cos \phi = \frac{Z}{R} = \frac{2.4}{4} = 0.6$$



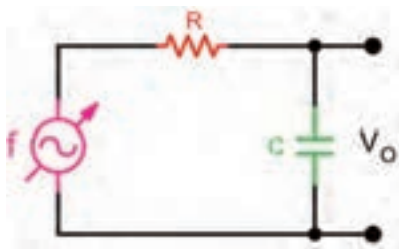
شکل ۹-۲۲

✓ مدار RC به عنوان فیلتر

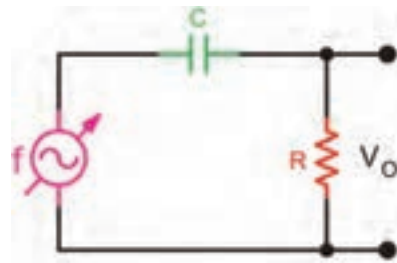
در شکل الف و ب ۹-۲۳ مدار دو نوع فیلتر بالاگذر و پایین گذر RC رسم شده است. با تغییر فرکانس منبع، مقدار  $X_C$  تغییر می کند.

□ در فرکانس قطع  $X_C$  با  $R$  برابر می شود.  $R = X_C = \frac{1}{2\pi f C} \Rightarrow f = f_C = \frac{1}{2\pi RC}$

□ در فرکانس قطع، مقدار ولتاژ خروجی برابر  $V_O = \frac{V_i}{\sqrt{2}}$  است.



(ب) فیلتر پایین گذر



(الف) فیلتر بالاگذر

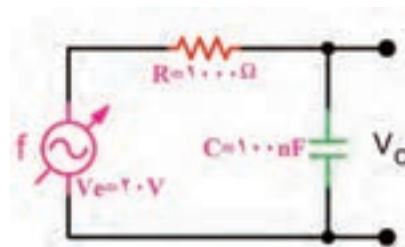
شکل ۹-۲۳- فیلترهای RC

مثال ۱۲- در مدار فیلتر شکل ۹-۲۴ فرکانس قطع فیلتر و مقدار ولتاژ خروجی را محاسبه کنید و نوع فیلتر را مشخص نمایید.

پاسخ: نوع فیلتر پایین گذر است.

$$f_C = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 1000 \times 100 \times 10^{-9}} = \frac{10000}{6.28}$$

$$f_C \cong 1592 \text{ HZ}$$

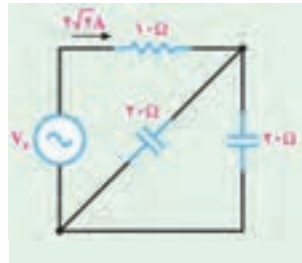


شکل ۹-۲۴ فیلتر RC

در فرکانس قطع، مقدار ولتاژ خروجی برابر  $V_O = \frac{V_i}{\sqrt{2}} = \frac{2.0}{\sqrt{2}} = 1.41 \text{ V}$  است.



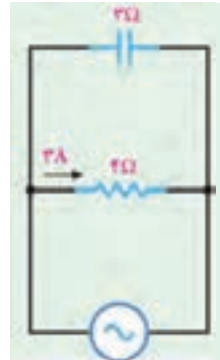
شکل ۹-۲۶



شکل ۹-۲۵



شکل ۹-۲۸



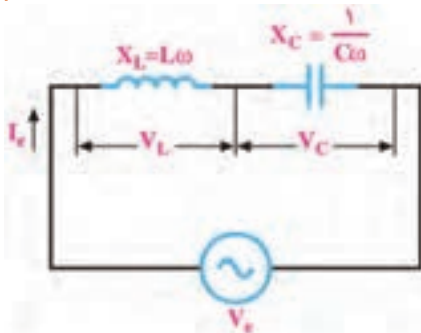
شکل ۹-۲۷

کار با نرم افزار در ساعات غیر درسی: مثال های حل شده را در نرم افزار مولتی سیم یا هر نرم افزار مناسب دیگر ببینید و جریان مدار و سایر کمیت ها را اندازه بگیرید و با محاسبات انجام شده مقایسه کنید.

### الگوی پرسش

- ۱- افزایش فرکانس بر روی راکتانس خازنی چه اثری دارد؟ شرح دهید.
- ۲- در مدار شکل ۹-۲۵ مقادیر امپدانس و ولتاژ ورودی ( $V_e$ ) را محاسبه کنید.
- ۳- در مدار شکل ۹-۲۶ مقادیر  $V_e$ ،  $I_R$ ،  $I_e$  و امپدانس مدار را محاسبه کنید.
- ۴- در مدار شکل ۹-۲۷ مقادیر  $V_e$ ،  $I_C$ ،  $I_e$  و امپدانس مدار را محاسبه کنید.
- ۵- در مدار فیلتر شکل ۹-۲۸ (مطلوب است الف) نوع فیلتر ب) محاسبه فرکانس قطع فیلتر

## ۹-۵- مدار LC



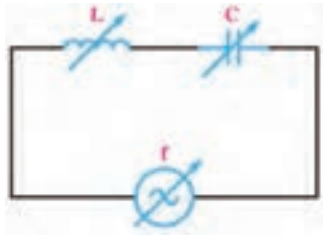
شکل ۹-۲۹

در بررسی مدارهای با سلف و خازن آموختیم که در سلف جریان از ولتاژ ۹۰ درجه عقب تر است در صورتی که در خازن جریان از ولتاژ ۹۰ درجه جلوتر است. این امر سبب می شود که این دو عنصر رفتار متقابل داشته باشند. چون هر دو قطعه در شبکه توان را کتیو مبادله می کنند، در این حالت به دلیل اثر متقابل آنها، توان را کتیو شبکه کاهش می یابد و مقدار آن می تواند به صفر برسد.

■ **مدار LC سری:** در شکل ۹-۲۹ مدار LC سری رسم شده است. در صورتی که  $V_L > V_C$  باشد، مقدار امپدانس مدار از رابطه  $Z = X_L - X_C$  به دست می آید. در این حالت  $V_e = V_L - V_C$  است اگر  $V_C > V_L$  باشد، امپدانس مدار از رابطه  $Z = X_C - X_L$  به دست می آید. در این حالت  $V_e = V_C - V_L$  است.

☑ **تشدید (رزونانس) در مدار LC سری:** با تغییر فرکانس منبع یا تغییر مقدار  $L$  یا  $C$ ، مقدار  $X_L$  و  $X_C$  تغییر می کنند. در فرکانس خاصی  $X_L = X_C$  می شود و اثر یکدیگر را خنثی می کنند. در این حالت اندازه کمیت  $Z$  برابر صفر شده و حداکثر جریان از مدار عبور می کند. این جریان، جریان ناشی از اتصال کوتاه و بی اثر شدن مدار LC است. این حالت را تشدید یا رزونانس گویند.

$\sqrt{}$  فرکانس تشدید از رابطه  $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  به دست می آید.



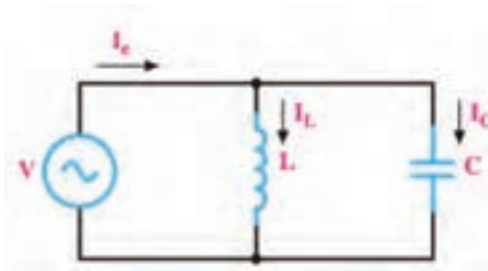
شکل ۹-۳۰

**مثال ۱۳-** در شکل ۹-۳۰ هر سه کمیت  $L$  و  $C$  و فرکانس منبع قابل تغییر است. اگر  $L=10\text{mH}$  و  $C=1\mu\text{F}$  باشد، فرکانس تشدید را به دست آورید. در این فرکانس امپدانس مدار چقدر است؟

**پاسخ:**

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2 \times 3.14 \sqrt{10 \times 10^{-3} \times 1 \times 10^{-6}}} = \frac{10000}{6.28} = 1592/23 \text{ HZ}$$

در فرکانس رزونانس  $Z=0$  است.



شکل ۹-۳۱

**مدار LC موازی:** در شکل ۹-۳۱ مدار LC موازی رسم شده است.

در صورتی که  $I_L > I_C$  باشد، جریان کل مدار از رابطه  $I_e = I_L - I_C$  به دست می آید. اگر  $I_C > I_L$  باشد، جریان مدار از رابطه  $I_e = I_C - I_L$  محاسبه می شود. به هر صورت امپدانس مدار از رابطه  $Z = \frac{V_e}{I_e}$  قابل محاسبه است.

اگر مقدار  $X_L$  و  $X_C$  معلوم باشد، امپدانس از رابطه  $Z = \frac{X_L \cdot X_C}{X_L - X_C}$  یا  $Z = \frac{X_L \cdot X_C}{X_C - X_L}$  قابل محاسبه است.

با توجه به مقادیر موجود در مخرج کسرهای داده شده در روابط امپدانس، مشخص کنید مقادیر به دست آمده از دو رابطه بالا دارای چه خاصیتی (سلفی - خازنی) هستند و چه تفاوتی با هم دارند.

بارش فکری



در فرکانس تشدید  $X_L = X_C$  است در نتیجه  $I_L = I_C$  شده و  $I_e$  برابر صفر می شود در این حالت خاصیت سلفی به وسیله خاصیت خازنی کاملاً خنثی می شود.

✓ در این مدار هم فرکانس تشدید از رابطه  $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  به دست می آید.  
✓ امپدانس مدار در حالت تشدید، بی نهایت ( $\infty$ ) است.

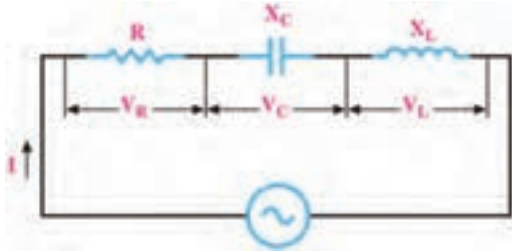
**مثال ۱۴-** در مدار شکل ۹-۳۱ اگر ضریب خودالقایی سلف برابر ۲ میلی هانری و ظرفیت خازن ۱۰۰ میکروفاراد باشد، فرکانس تشدید را به دست آورید. در این فرکانس امپدانس مدار چقدر است؟

**پاسخ:**

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2 \times 3.14 \sqrt{2 \times 10^{-3} \times 100 \times 10^{-6}}} = \frac{1000}{6.28 \sqrt{0.2}} = 357 \text{ HZ}$$

در فرکانس رزونانس  $Z=\infty$  است.

## ۹-۶- مدار RLC سری



شکل ۹-۳۲

در شکل ۹-۳۲ مدار RLC سری رسم شده است.  
 ✓ در صورتی که  $X_L > X_C$  باشد، مدار در مجموع دارای خاصیت اهمی و سلفی است (مدار معادل RL سری است).  
 ✓ اگر  $X_C > X_L$  باشد، مدار در مجموع دارای خاصیت اهمی و خازنی است (مدار معادل RC سری است).

- ✓ امپدانس مدار از رابطه  $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$  محاسبه می‌شود. به هر صورت می‌توان  $X = X_L - X_C$  یا  $X = X_C - X_L$  را در رابطه امپدانس قرار داد و امپدانس را از رابطه  $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$  محاسبه نمود.
- ✓ ضریب قدرت ( $\cos \phi$ ) از رابطه  $\cos \phi = \frac{R}{Z}$  به دست می‌آید.
- ✓ اگر  $X_L = X_C$  باشد مدار کاملاً خاصیت اهمی دارد (حالت تشدید) و  $Z = R$  است.
- ✓ فرکانس در حالت تشدید از رابطه  $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  قابل محاسبه است.

**مثال ۱۵-** در مدار شکل ۹-۳۳ اگر  $V_e = 100\text{ V}$  باشد، مقادیر امپدانس، جریان مؤثر و ضریب قدرت ( $\cos \phi$ ) مدار را محاسبه کنید.

پاسخ:

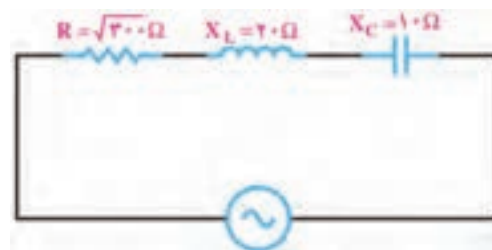
$$X = X_L - X_C$$

$$X = 20 - 10 = 10\ \Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{300 + 100} = 20\ \Omega$$

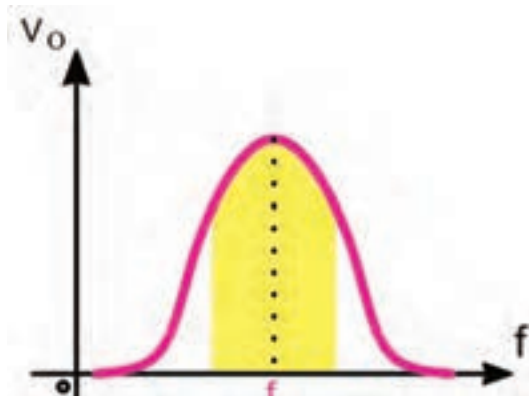
$$I_e = \frac{V_e}{Z} = \frac{100}{20} = 5\ \text{A}$$

$$\cos \phi = \frac{R}{Z} = \frac{\sqrt{300}}{20} = 0.866$$

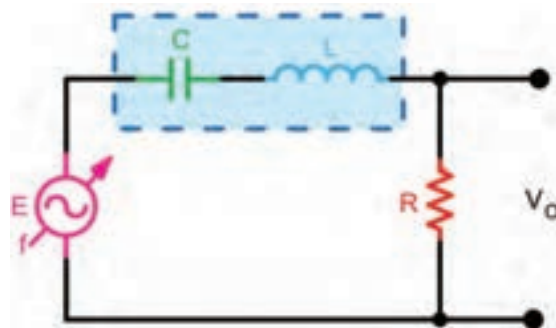


شکل ۹-۳۳

■ **مدار RLC سری به عنوان فیلتر:** مدار RLC سری را به عنوان فیلتر عبور باند و حذف باند به کار می‌برند. شکل‌های الف و ب ۹-۳۴ فیلتر عبور باند (میان‌گذر) و منحنی پاسخ فرکانسی آن را نشان می‌دهد. در شکل‌های الف و ب ۹-۳۵ فیلتر حذف باند (میان‌نگذر) و منحنی پاسخ فرکانسی آن رسم شده است.  
**فعالیت در ساعات غیردرسی:** در ساعات غیر درسی مبحث فیلترها که در پایه یازدهم آمده است را مرور کنید تا در ارتباط با درک این مباحث با مشکلی مواجه نشوید.

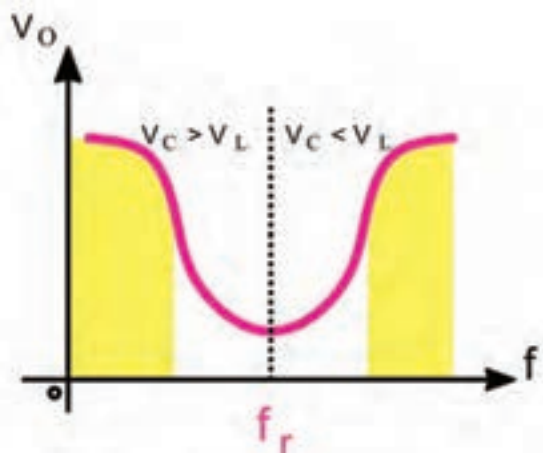


(ب) منحنی پاسخ فرکانسی

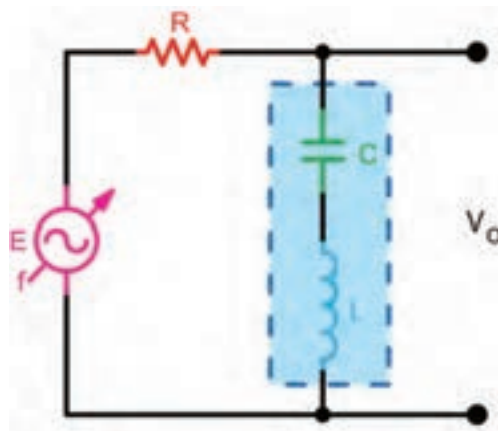


(الف) مدار فیلتر عبور باند

شکل ۹-۳۴- فیلتر عبور باند و منحنی پاسخ فرکانسی آن



(ب) منحنی پاسخ فرکانسی



(الف) مدار فیلتر حذف باند

شکل ۹-۳۵- فیلتر حذف باند و منحنی پاسخ فرکانسی آن

### ☑ مشخصه‌های فیلتر میان‌گذر و حذف باند:

به‌طور کلی برای فیلترهای میان‌گذر سه مشخصه به شرح زیر تعریف می‌شود.

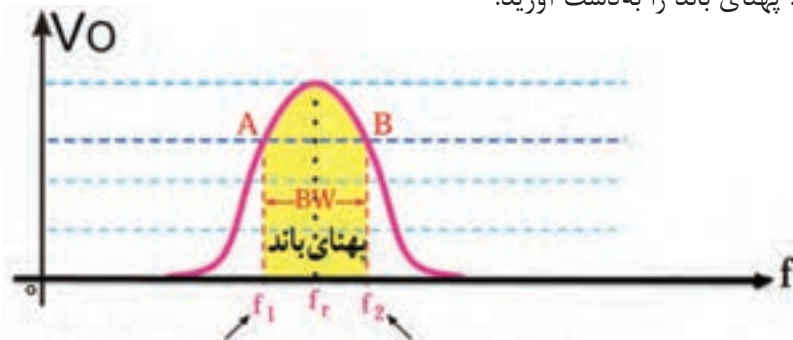
(الف) فرکانس رزونانس ( $f_r$ ) (ب) پهنای باند (BW) (پ) ضریب کیفیت (Q)

☐ فرکانس رزونانس فیلتر از رابطه  $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  قابل محاسبه است.

☐ پهنای باند (Band Width): پهنای باند فیلتر، فاصله بین فرکانس قطع بالا و قطع پایین است:

$$BW = f_2 - f_1$$

مثال ۱۶- در شکل ۹-۳۶ فرکانس قطع بالا ( $f_2$ ) برابر ۶۱۰ کیلوهرتز و فرکانس قطع پایین ( $f_1$ ) برابر ۵۸۰ کیلوهرتز است. پهنای باند را به دست آورید.



فرکانس قطع بالا  
فرکانس قطع پایین  
شکل ۹-۳۶- منحنی پاسخ فرکانسی فیلتر عبور باند

پاسخ:  $BW = f_2 - f_1 = 610 - 580 = 30 \text{ KHZ}$

□ ضریب کیفیت ( $Q = \text{Quality Factor}$ ):

این ضریب میزان تیزی منحنی مشخصه و پهنای باند را تعیین می کند. رابطه بین مقدار  $Q$ ،  $BW$  و  $f_r$  به صورت  $Q = \frac{f_r}{BW}$  است. هرچه ضریب کیفیت کوچک تر باشد، پهنای باند بیشتر است. در مدار RLC سری مقدار  $Q$  از رابطه  $Q = \frac{X_L}{R}$  قابل محاسبه است.

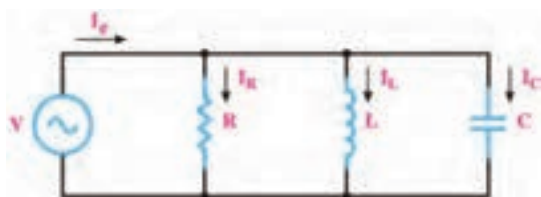
مثال ۱۷- در صورتی که در شکل الف) ۹-۳۴ مقدار  $X_L = 10 \text{ K}\Omega$  و  $R = 100 \Omega$  باشد، مقدار  $Q$  را به دست آورید.

پاسخ:

$$Q = \frac{X_L}{R} = \frac{10000}{100} = 100$$

در مورد نقش  $Q$  در فیلترهای عبور باند و حذف باند تحقیق کنید و نتیجه را در قالب یک گزارش ارائه دهید.

پژوهش



شکل ۹-۳۷- مدار RLC موازی

■ مدار RLC موازی: در مدار RLC موازی، ولتاژ دو سر شاخه ها با هم برابر است ولی جریان هر شاخه متناسب با راکتانس آن شاخه محاسبه می شود. در شکل ۹-۳۷ مدار RLC موازی رسم شده است.

☑ روابط مورد نیاز برای حل مدار RLC موازی

☐ برای محاسبه جریان کل مدار از رابطه  $I_e = \sqrt{I_R^2 + (I_C - I_L)^2}$  استفاده می‌کنیم. در صورتی که  $I_L > I_C$  باشد، رابطه به صورت  $I_e = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2}$  نوشته می‌شود.

☐ امپدانس مدار برابر  $Z = \frac{V_e}{I_e}$  است. امپدانس مدار را می‌توان از فرمول  $\frac{1}{Z^2} = \frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L}\right)^2$  نیز محاسبه نمود.

☐ ضریب قدرت از رابطه  $\cos \phi = \frac{Z}{R}$  به دست می‌آید.

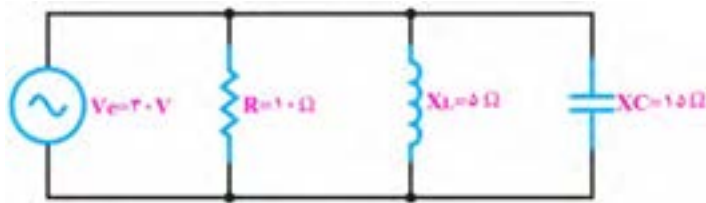
مثال ۱۸- در شکل ۹-۳۸ مطلوب است محاسبه الف) جریان هر شاخه ب) جریان کل پ) امپدانس مدار

پاسخ:

$$I_R = \frac{V_e}{R} = \frac{30}{10} = 3 \text{ A}$$

$$I_C = \frac{V_e}{X_C} = \frac{30}{15} = 2 \text{ A}$$

$$I_L = \frac{V_e}{X_L} = \frac{30}{5} = 6 \text{ A}$$



شکل ۹-۳۸- مدار RLC موازی

$$I_e = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2} = \sqrt{3^2 + (6 - 2)^2} = \sqrt{25} = 5 \text{ A}$$

$$Z = \frac{V_e}{I_e} = \frac{30}{5} = 6 \Omega$$

■ تشدید در مدار RLC موازی:

☑ اگر  $X_L = X_C$  باشد، جریان‌های دو شاخه L و C اثر یکدیگر را خنثی می‌کنند و معادل مدار باز عمل کرده و مدار کاملاً خاصیت اهمی دارد (حالت تشدید). در این حالت  $Z = R$  است.

☑ فرکانس در حالت تشدید از رابطه  $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  قابل محاسبه است.

☑ جریان کل مدار از رابطه  $I_e = \frac{V_e}{R}$  قابل محاسبه است.

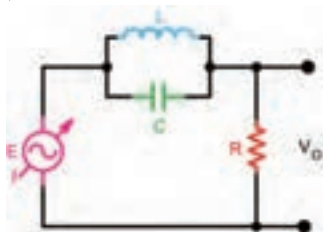
با توجه به شکل ۹-۳۸ اگر  $X_L = X_C$  باشد، مدار را به بحث بگذارید و شرایط آن را بررسی و نتیجه‌گیری کنید.

بحث گروهی

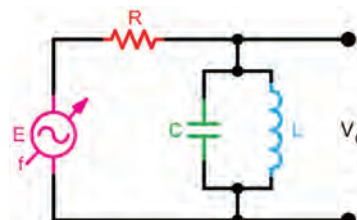


■ LC موازی به عنوان فیلتر: از مدار LC موازی به عنوان فیلتر عبور باند و حذف باند نیز استفاده می‌کنند. شکل

۹-۳۹ فیلتر عبور باند (میان‌گذر) را نشان می‌دهد. در شکل ۹-۴۰ فیلتر حذف باند (میان‌نگذر) رسم شده است.

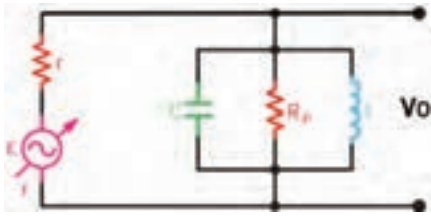


شکل ۹-۴۰- مدار فیلتر حذف باند



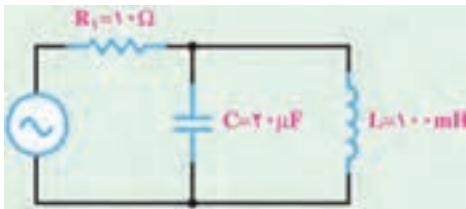
شکل ۹-۳۹- مدار فیلتر عبور باند





شکل ۹-۴۱- مدار فیلتر عبور باند

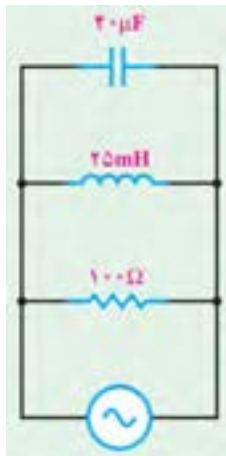
□ ضریب کیفیت (Q) در مدار رزونانس موازی: در فیلتر موازی شکل ۹-۴۱ مقدار Q به مقاومت موازی مدار بستگی دارد و مقدار آن از رابطه  $Q_P = \frac{R_P}{X_L}$  محاسبه می شود.



شکل ۹-۴۲- مدار LC موازی

مثال ۱۹- مطلوب است محاسبه فرکانس تشدید در مدار شکل ۹-۴۲  
پاسخ:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2 \times 3.14 \sqrt{100 \times 10^{-3} \times 20 \times 10^{-6}}} = \frac{1000}{6/28 \times \sqrt{2}} = 112/6 \text{ HZ}$$



شکل ۹-۴۳

مثال ۲۰- در مدار RLC شکل ۹-۴۳ مقادیر فرکانس رزونانس، ضریب کیفیت و پهنای باند را محاسبه کنید.  
پاسخ:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2 \times 3.14 \sqrt{25 \times 10^{-3} \times 40 \times 10^{-6}}} = \frac{1000}{6/28} = 160 \text{ HZ}$$

$$Q_P = \frac{R_P}{X_L} = \frac{100}{2\pi f L} = \frac{100}{2\pi \times 160 \times 25 \times 10^{-3}} \cong 4$$

$$BW = \frac{f_r}{Q} = \frac{160}{4} = 40 \text{ HZ}$$

### الگوی پرسش

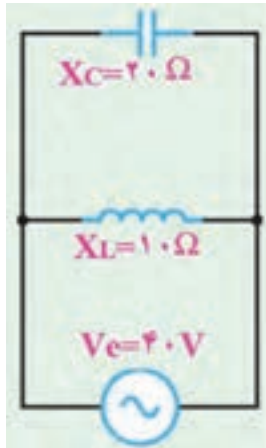
- ۱- در شکل ۹-۴۴ امپدانس مدار را محاسبه کنید.
- ۲- در شکل ۹-۴۵ امپدانس و جریان کل مدار را محاسبه کنید.
- ۳- در مدار شکل ۹-۴۶ مقادیر  $Z$ ،  $I_e$  و  $\cos\phi$  را محاسبه کنید.
- ۴- در مدار شکل ۹-۴۷ مقادیر  $V_e$  و جریان کل مدار را محاسبه کنید.
- ۵- LC سری در حالت تشدید مانند یک سیم اتصال کوتاه و LC موازی مانند مدار باز عمل می کند.

□ غلط □ صحیح

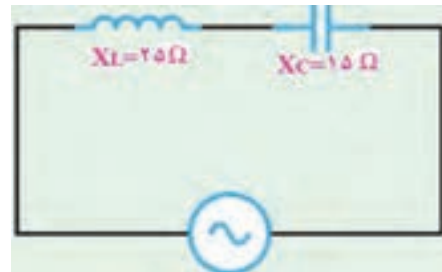
- ۶- دو نمونه مدار فیلتر میان گذر را رسم کنید و طرز کار آنها را بنویسید.
- ۷- فیلتر شکل ۹-۴۸ از نوع ..... باند و با مدار رزونانسی ..... است.

الف) عبور - موازی      ب) حذف - سری      پ) حذف - موازی      ت) عبور - سری

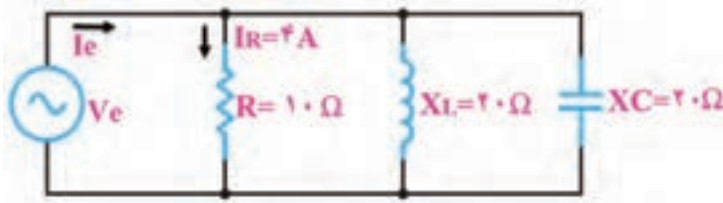
۸- در فیلتر شکل ۹-۴۹ اگر  $R_p$  افزایش یابد، مقدار  $Q$  ..... می شود و  $BW$  ..... می یابد.  
 الف) زیاد - کاهش      ب) زیاد - افزایش      پ) کم - افزایش      ت) کم - کاهش



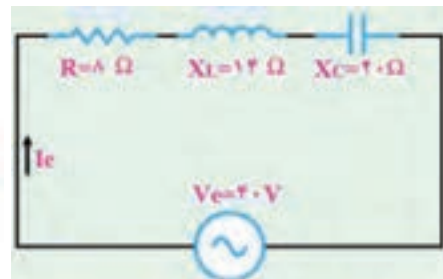
شکل ۹-۴۵



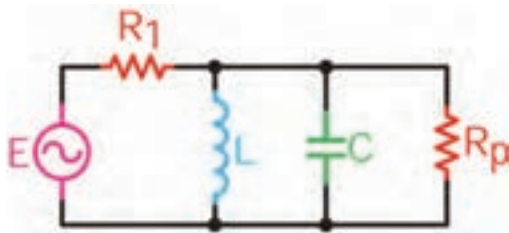
شکل ۹-۴۴



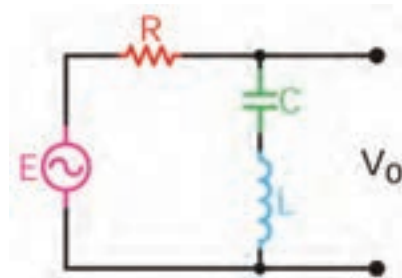
شکل ۹-۴۷



شکل ۹-۴۶



شکل ۹-۴۹



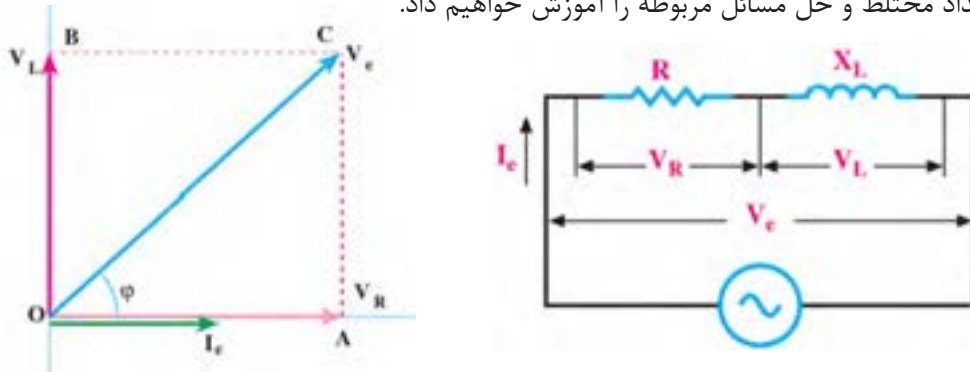
شکل ۹-۴۸

کار با نرم افزار در ساعات غیردرسی: مثال های حل شده و سؤالات الگوی پرسش را در ساعات غیردرسی در نرم افزار مولتی سیم شبیه سازی کنید و نتایج به دست آمده را با محاسبات خود مقایسه کنید.

## ۷-۹- حل مدارهای جریان متناوب با استفاده از اعداد مختلط

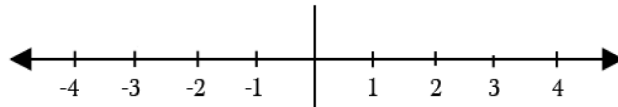
می دانیم در مدارهای الکتریکی  $RL$  و  $RC$  جریان متناوب، جریان با ولتاژ اختلاف فاز دارد. اختلاف فاز بین جریان و ولتاژ در مدار  $RC$  به گونه ای است که جریان به اندازه  $\phi$  درجه از ولتاژ جلو می افتد یا به عبارت دیگر پیش فاز است. در مدار  $RL$  جریان به اندازه  $\phi$  درجه از ولتاژ عقب تر یا پس فاز است. اگر مقادیر جریان یا ولتاژ را با بردار نمایش دهیم، ولتاژ معادل در مدار  $RL$  مطابق شکل ۹-۵۰ وتر مثلثی خواهد بود که دو

انتهای بردارهای ولتاژ، دو سر مقاومت و ولتاژ دو سر سلف را به هم وصل می‌کند. برای به دست آوردن ولتاژ معادل باید از محاسبات هندسی یعنی قضیه فیثاغورث استفاده کنیم. در این حالت ولتاژ معادل برابر است با  $V_e^2 = V_L^2 + V_R^2$ . در صورتی که مدار ترکیبی از چند  $R$ ، چند  $X_L$  یا چند  $X_C$  یا ترکیبی از  $R$ ،  $X_L$  و  $X_C$  به صورت سری و موازی باشد، استفاده از روش برداری بسیار پیچیده می‌شود. برای سادگی کار و دسترسی به روش ساده‌تر، اعداد موهومی را در کنار اعداد حقیقی تعریف کرده‌اند که از این مجموعه یک عدد مختلط ساخته می‌شود. در این مبحث به یادآوری و آموزش این مفاهیم می‌پردازیم. در ادامه مبحث، چگونگی استفاده از اعداد مختلط و حل مسائل مربوطه را آموزش خواهیم داد.



شکل ۹-۵۰- مدار RL جریان متناوب

**اعداد حقیقی:** مجموعه‌ای از اعداد صحیح مانند ۱، ۲ و ۳ و اعداد گویا مانند  $\frac{5}{7}$  یا  $\frac{9}{11}$  را اعداد حقیقی می‌گویند. اعداد حقیقی را روی محور افقی مانند شکل ۹-۵۱ نشان می‌دهند.



شکل ۹-۵۱- نمایش اعداد حقیقی روی محور

■ **اعداد موهومی (Imaginary):** چون اعداد مثبت و منفی طبق قرارداد به وجود آمده‌اند، ریاضی‌دانان علامتی را تعریف کرده‌اند که مجذور آن  $-1$  است. این علامت را با  $j$  یا  $i$  نشان می‌دهند. بنابراین  $j = \sqrt{-1}$  و  $j^2 = -1$  خواهد بود. بنابراین تعریف جذر عدد  $-1$ ، یک عدد گنگ است که آن را  $\sqrt{-1}$  می‌نامیم. این عدد را موهومی یا گنگ می‌نامند زیرا می‌دانیم اعداد منفی جذر ندارند.

با توجه به اینکه  $j = \sqrt{-1}$  است، مقادیر  $j^2$ ،  $j^3$  و  $j^4$  را بر حسب  $j$  به دست آورید.

**مثال ۲۱-** مقدار  $J^9$  و  $4J^2$  را محاسبه کنید.

$$j^9 = j^8 \times j, \quad j^8 = (\sqrt{-1})^8 = 1 \rightarrow j^9 = j^8 \times j = (1) \times j = j$$

مقادیر  $7j^3$  و  $5j^2$  را به دست آورید.

فعالیت در کلاسی



فعالیت

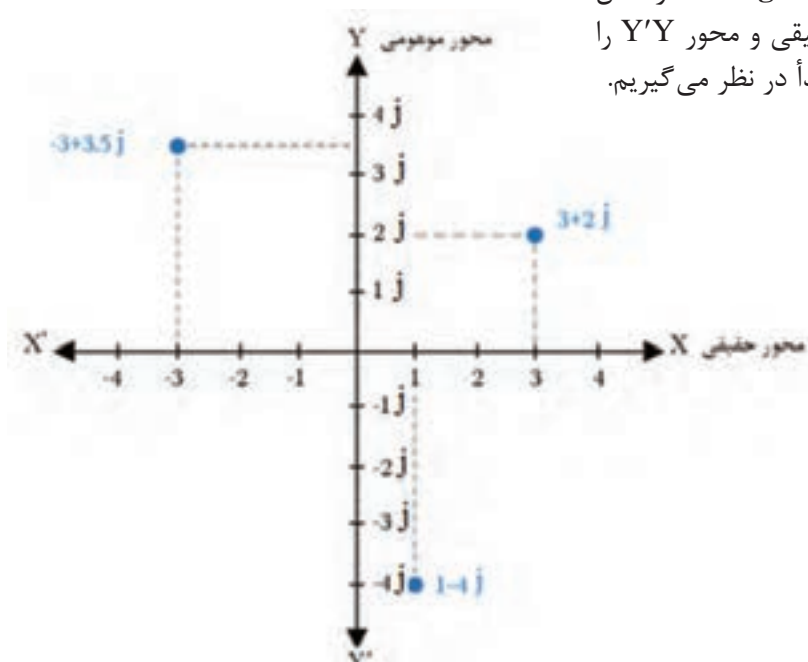




ریشه‌های معادله  $X^2+1=0$  را برحسب  $j$  به دست آورید.

■ نمایش اعداد موهومی (Imaginary): در شکل

۹-۵۲ محور  $X'X$  را محور حقیقی و محور  $Y'Y$  را محور موهومی و نقطه  $O$  را مبدأ در نظر می‌گیریم.



شکل ۹-۵۲- نمایش چند عدد حقیقی و موهومی روی محورهای مختصات

در هر یک از چهار ربع محورهای مختصات، اعداد مختلط به نمایش در می‌آید ولی در حل مدارهای الکتریکی به دلیل مثبت بودن مقدار حقیقی فقط از ربع اول و چهارم استفاده می‌شود زیرا عناصر موجود در مدارهای الکتریکی مانند مقاومت، عناصر واقعی هستند بنابراین جزء حقیقی همیشه مثبت است.

نکته

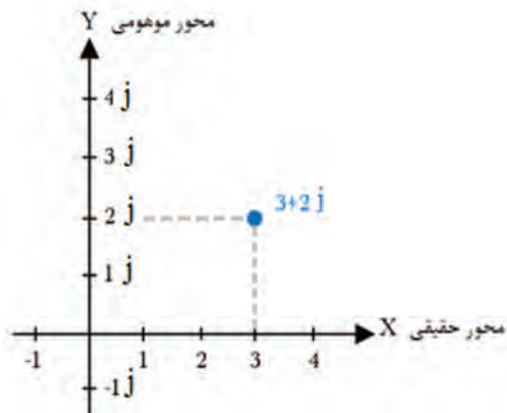


در ریاضیات علامت موهومی را معمولاً به صورت  $i$  نشان می‌دهند. در مباحث الکتریکی به خاطر اشتباه نشدن با جریان  $i$ ، حرف  $j$  کوچک یا  $J$  بزرگ را به کار می‌برند در این قسمت از  $j$  کوچک استفاده کرده‌ایم.

نکته

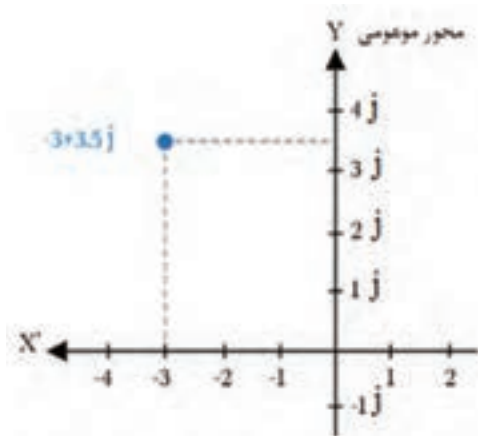


■ اعداد مختلط (Complex): اگر عددی مانند  $Z=a+jb$  را در نظر بگیریم، این عدد از دو بخش حقیقی  $a$  و بخش موهومی  $jb$  تشکیل شده است، که یک عدد مختلط را تشکیل می‌دهد. جزء موهومی عدد قسمت  $j$  و اندازه عدد موهومی برابر با  $b$  است. مثلاً اگر عددی به صورت  $3j$  نوشته شود،  $j$  عامل موهومی و  $3$  اندازه عدد موهومی است. اگر قسمت حقیقی  $a$  برابر صفر باشد، عدد مختلط را موهومی محض و اگر اندازه عدد موهومی  $b$  برابر با صفر باشد، عدد را حقیقی محض می‌گویند.



شکل ۹-۵۳

■ نمایش اعداد مختلط: با توجه به اینکه اعداد مختلط دارای دو جزء حقیقی و موهومی است، باید جزء موهومی و حقیقی را روی محورهای مختصات نشان دهیم. مثلاً  $Z=3+j2$  را در نظر بگیرید. برای نشان دادن این عدد باید جزء حقیقی آن یعنی  $a=3$  را روی محور  $X$  و عدد موهومی آن یعنی  $2j$  را روی محور قائم ترسیم کنیم، ( $b=2$ ). ترسیم این اعداد روی محورهای مختصات نشان داده شده است، شکل ۹-۵۳.



شکل ۹-۵۴

مثال ۲۲- عدد مختلط  $Z=-3+j3/5$  را روی محور مختصات نشان دهید و مختصات نقطه انتهایی  $Z$  را تعیین کنید.

پاسخ: جزء حقیقی برابر با  $-3$  است، به اندازه  $3$  واحد روی محور  $X$  در جهت منفی انتخاب می‌کنیم، اندازه عدد موهومی برابر با  $3/5$  است، لذا  $3/5$  واحد روی محور  $Y$  انتخاب می‌کنیم و محل  $b$  را تعیین می‌کنیم. از دو نقطه به دست آمده دو خط موازی با محورهای  $X$  و  $Y$  می‌کشیم. محل تقاطع این دو خط، نقطه  $Z$  به مختصات  $Z(-3, 3/5)$  است، شکل ۹-۵۴.

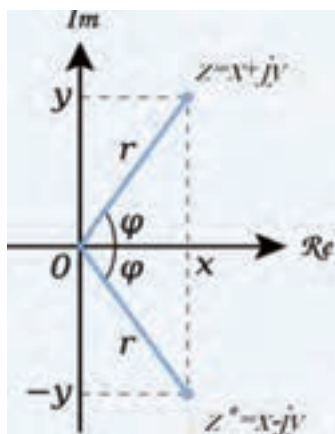
جزء حقیقی و جزء موهومی اعداد مختلط زیر را روی محور مختصات مشخص کنید، سپس مختصات نقطه  $Z$  را روی محورهای مختصات مشخص نمایید.

$$Z_1 = -5 - j2$$

$$Z_2 = -3 + j1$$

$$Z_3 = +2 + j3$$

فعالیت



شکل ۹-۵۵

■ اندازه (مقدار، قدر مطلق - Modulus) و زاویه عدد مختلط: عدد مختلط  $Z=x+jy$  را در نظر بگیرید. در شکل ۹-۵۵ روی محورهای مختصات مقادیر  $x$  و  $y$  را نشان داده‌ایم. قدر مطلق عدد مختلط برابر با طول بردار یا مقدار  $Z$  است، که آن را با  $|Z|$  نشان می‌دهند. زاویه  $\phi$  با توجه به زاویه بردار عدد مختلط با محور افقی بیان می‌شود.

بحث کنید



رابطه بین بردار  $Z$  و  $Z^*$  را مشخص کنید. آیا در مباحث ریاضی مفهومی برای آن وجود دارد؟ موضوع را به بحث بگذارید و نتیجه‌گیری کنید.

□ قضیه فیثاغورث: طول بردار  $Z$  از رابطه  $|Z| = \sqrt{x^2 + y^2}$  به دست می‌آید. زاویه  $\varphi$  را فاز عدد مختلط

گویند که از رابطه  $\tan \varphi = \frac{y}{x} = \frac{\text{مقدار موهومی}}{\text{مقدار حقیقی}}$  به دست می‌آید.

**مثال ۲۳-** اندازه (دامنه یا مدول) و زاویه عدد مختلط  $Z = 3 + j4$  را به دست آورید.

$$|Z| = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5 \rightarrow \tan \varphi = \frac{4}{3} = 1/33 \rightarrow \varphi = 53/13^\circ$$

در صورتی که زاویه  $\varphi = -53/13$  درجه باشد، بردار عدد مختلط در کدام ربع قرار می‌گیرد؟ مفهوم  $\tan \varphi$  را به بحث بگذارید. این کمیت با چه کمیتی برابری می‌کند؟

بحث کنید



فعالیت



اندازه و زاویه اعداد مختلط زیر را به دست آورید.

$$Z_1 = 4 + j3$$

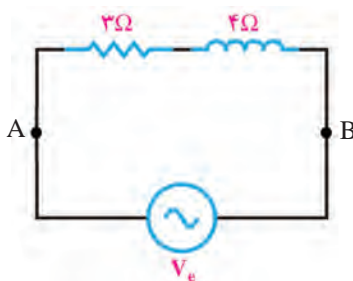
$$Z_2 = 2 + j2$$

$$Z_3 = 4 + j8$$

■ کاربرد اعداد مختلط در حل مدارهای سری **RL** و **RC**: در مدارهای جریان متناوب اگر مقاومت، سلف و خازن به صورت سری قرار گیرد، با توجه به اینکه در سیم‌پیچ و خازن، جریان و ولتاژ با هم  $90^\circ$  درجه اختلاف فاز دارد می‌توانیم مقدار را با استفاده از اعداد مختلط به دست آوریم. در این حالت با توجه به رابطه  $Z = a + jb$  می‌توانیم به جای مقدار  $a$  مقاومت و به جای  $b$  مقدار  $X_C$  یا  $X_L$  را قرار دهیم. در این حالت رابطه به صورت  $Z = R + jX_L$  یا  $Z = R - jX_C$  درمی‌آید.

چرا در رابطه  $Z = R - jX_C$  ضریب  $j$  برابر  $-1$  است؟ می‌خواهیم با حل مثال‌هایی، کاربرد اعداد مختلط در این نوع مدارها را آموزش دهیم.

فکر کنید



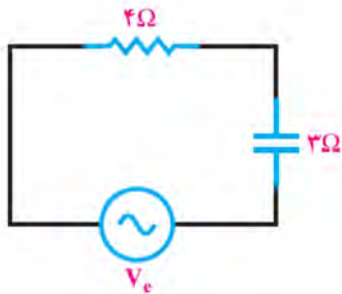
شکل ۹-۵۶- مدار **RL** سری

**مثال ۲۴-** امپدانس مدار شکل ۹-۵۶ که یک **RL** سری است را با استفاده از اعداد مختلط محاسبه کنید.

**حل:**  $X_L$  و  $R$  با هم سری هستند لذا با استفاده از اعداد مختلط مقدار امپدانس کل مدار از رابطه  $Z_{AB} = 3 + j4$  به دست می‌آید. در این رابطه  $X_L = b = 4 \Omega$  و  $R = a = 3 \Omega$  است.

$$|Z_{AB}| = \sqrt{3^2 + 4^2} = \sqrt{25} = 5 \Omega$$

در محاسبه  $Z_{AB}$  مقدار  $X_L$  برابر با عدد ۴ است. علامت حاصل از  $j4$  مشخص‌کننده زاویه پیش‌فاز یا پس‌فاز است.



شکل ۹-۵۷- مدار RC سری

**مثال ۲۵-** امپدانس مدار شکل ۹-۵۷ را که یک مدار RC سری است با استفاده از اعداد مختلط محاسبه کنید.

**حل:** با استفاده از اعداد مختلط رابطه امپدانس را می نویسیم، مقدار قدر مطلق  $Z$  برابر است با:

$$Z = \sqrt{4^2 + 3^2} = \sqrt{25} = 5$$

**مثال ۲۶-** در مثال ۲۴ و ۲۵ مقدار اختلاف فاز  $\phi$  را به دست آورید.

**حل:** با توجه به رابطه  $\tan \phi = \frac{b}{a}$  مقدار  $\phi$  را محاسبه می کنیم.

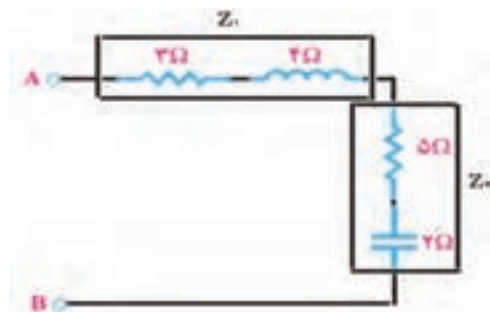
در مثال ۲۴ مقدار تانژانت زاویه  $\phi_1$  را محاسبه می کنیم.  $\tan \phi_1 = \frac{X_L}{R} = \frac{4}{3} = 1/33$ ، با استفاده از ماشین حساب زاویه  $\phi_1$  را به دست می آوریم،  $\phi_1 = 56/3^\circ$ . علامت مثبت نشان دهنده این است که ولتاژ کل مدار به اندازه  $\phi_1$  از ولتاژ دو سر مقاومت جلوتر است. به عبارت دیگر، ولتاژ دو سر مقاومت به اندازه زاویه  $\phi_1$  از ولتاژ کل مدار عقب تر یا پس فاز است.

در مثال ۲۵ مقدار تانژانت زاویه  $\phi_2$  را محاسبه می کنیم.  $\tan \phi_2 = \frac{-X_C}{R} = \frac{-3}{4} = -0/75$ ، با استفاده از ماشین حساب زاویه  $\phi_2$  را به دست می آوریم،  $\phi_2 = -37^\circ$ . علامت منفی نشان دهنده این است که ولتاژ کل مدار از ولتاژ دو سر مقاومت عقب تر است. به عبارت دیگر، ولتاژ دو سر مقاومت به اندازه  $37^\circ$  درجه از ولتاژ کل مدار جلوتر است.

■ **جمع و تفریق اعداد مختلط و کاربرد آن در مدارهای ترکیبی امپدانس:** جمع و تفریق اعداد مختلط در محاسبه امپدانس در مدارهای ترکیبی امپدانس ها به کار می رود. در فرایند جمع اعداد مختلط، قسمت های حقیقی با هم و قسمت های موهومی با هم به صورت جداگانه جمع جبری می شوند. در فرایند تفریق، عدد مختلطی که باید تفریق شود را در یک علامت منفی ضرب می کنیم سپس عمل جمع را انجام می دهیم.

☑ **جمع اعداد مختلط**

**مثال ۲۷-** در مدار شکل ۹-۵۸، الف) امپدانس  $Z_1$ ، ب) امپدانس  $Z_2$ ، پ) امپدانس کل دو سر A و B را محاسبه کنید.



شکل ۹-۵۸

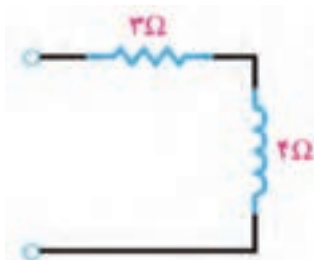
**حل:** الف) امپدانس  $Z_1$  را بر حسب اعداد مختلط می نویسیم.  $Z_1 = 3 + j4$

ب) امپدانس  $Z_2$  را نیز بر حسب اعداد مختلط می نویسیم.  $Z_2 = 5 - j2$

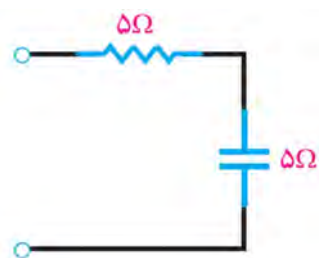
پ) امپدانس های  $Z_1$  و  $Z_2$  را با هم جمع می کنیم و امپدانس ها را جایگزین می کنیم.

پس از جایگزینی، مقادیر موهومی را با هم و مقادیر حقیقی را با هم جمع می کنیم.

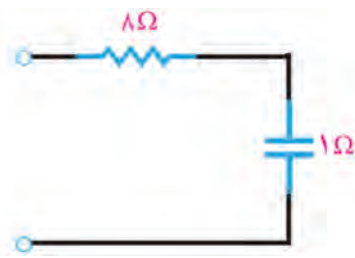
$$Z_{AB} = Z_1 + Z_2 = (3 + j4) + (5 - j2) = (3 + 5) + j(4 - 2) = 8 + j2$$



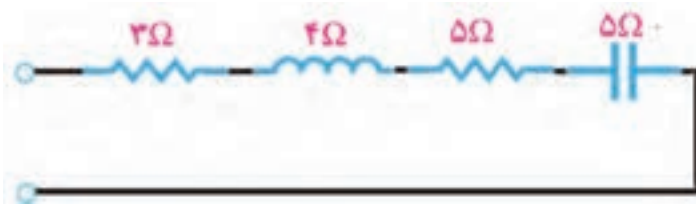
شکل ۹-۵۹- مدار معادل  $Z_1$



شکل ۹-۶۰- مدار معادل  $Z_2$



ب) مدار معادل  $Z_2$



الف) مدار ترکیبی تفکیک شده  $Z_1 + Z_2$  شکل ۹-۶۱

**مثال ۲۸-** با استفاده از مقادیر مربوط به امپدانس های  $Z_1$ ،  $Z_2$  و  $Z_3$ ، نقشه مدار را با ذکر مقادیر آن رسم کنید.

الف)  $Z_1 = 3 + j4$ ، ب)  $Z_1 = 5 - j5$  و پ)  $Z_3 = Z_1 + Z_2$  است.

**حل:** الف) چون علامت  $Z$  مثبت است پس مدار سلفی بوده و جزء حقیقی آن ۳ و اندازه موهومی آن ۴ است، شکل ۹-۵۹.

ب) چون علامت  $Z$  منفی است پس مدار خازنی است، شکل ۹-۶۰. پ) برای محاسبه  $Z = Z_1 + Z_2$  مقادیر  $Z_1$  و  $Z_2$  را در رابطه جایگزین می کنیم، شکل الف ۹-۶۱.

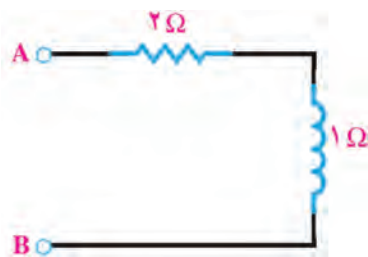
$$Z = Z_1 + Z_2 = 3 + j4 + 5 - j5$$

سپس اجزای حقیقی و موهومی را با هم جمع می کنیم،  $Z = 8 - j1$ ، شکل ب ۹-۶۱.

برای ترسیم مدار نیز ابتدا  $Z_1$  و  $Z_2$  را به صورت تفکیک شده رسم می کنیم، سپس مدار معادل آن را به دست می آوریم در شکل الف ۹-۶۱ مدار ترکیبی تفکیک شده و در شکل ب ۹-۶۱ مدار معادل ترسیم شده است.

☑ **تفریق دو عدد مختلط:** تفاضل دو عدد مختلط، عددی مختلط است که قسمت حقیقی آن تفاضل قسمت حقیقی دو عدد و قسمت موهومی آن نیز تفاضل دو جزء موهومی است. برای انجام تفریق کافی است، عدد مختلطی که باید تفریق شود را در علامت منفی ضرب کنیم سپس دو عدد را با هم جمع نماییم.

**مثال ۲۹-** دو عدد مختلط  $Z_1 = 6 + j3$  و  $Z_2 = 4 + j2$  را به صورت  $Z_1 - Z_2$  از هم تفریق کنید.



شکل ۹-۶۲

**حل:** در رابطه  $Z_1 - Z_2$ ، مقادیر عدد مختلط را جایگزین می کنیم،  $Z = (6 + j3) - (4 + j2)$  سپس علامت منفی را در عبارت دوم ضرب می کنیم و عبارت را جزء به جزء با هم جمع می کنیم.  $Z = 6 + j3 - 4 - j2 = 2 + j1$ . مدار معادل به صورت شکل ۹-۶۲ درمی آید.



### الگوی پرسش:

- ۱- اگر  $Z_1 = 4 + j6$  و  $Z_2 = 6 - j3$  باشد، امپدانس معادل  $Z_1 + Z_2$ ،  $Z_1 - Z_2$  و  $Z_2 - Z_1$  را محاسبه کنید.
  - ۲- اگر  $Z_1 = 4 + j6$ ،  $Z_2 = 6 - j3$  و  $Z_3 = 2 + j3$  باشد،
- الف) امپدانس‌های زیر را محاسبه کنید.

$$\begin{aligned} Z_4 &= Z_1 + Z_2 + Z_3 & Z_5 &= Z_1 + Z_2 - Z_3 & Z_6 &= Z_1 + Z_3 \\ Z_7 &= Z_2 + Z_3 & Z_8 &= Z_2 - Z_3 & Z_9 &= Z_2 - Z_1 & Z_{10} &= Z_1 - Z_2 - Z_3 \end{aligned}$$

ب) با توجه به علامت ضریب موهومی  $Z$ ، خاصیت سلفی و خازنی هر یک از مدارها را تعیین کنید، مدار معادل هریک را ترسیم نموده و نتایج را در یک جدول خلاصه نمایید.

- روش جمع و تفریق امپدانس‌ها با استفاده از اعداد مختلط را با روش به‌دست آوردن مدارهای معادل RLC ترکیبی به روش برداری مقایسه کنید و بررسی کنید کدام روش ساده‌تر است.
- اگر در حاصل تفریق دو عدد مختلط، جزء حقیقی منفی شود، چه مفهومی دارد؟ آیا برای آن می‌توان مدار معادل رسم کرد؟

فکر کنید



- ضرب، تقسیم و مزدوج یک عدد مختلط و کاربرد آن: ضرب دو عدد مختلط مانند عملیات ضرب جبری دو عبارت داخل پرانتز در ریاضی است. در این فرایند باید جزء به جزء دو عدد را در یکدیگر ضرب کنیم.
- مثال ۳۰- اگر  $Z_1 = 4 + j3$  و  $Z_2 = 8 + j6$  باشد مقدار  $Z = Z_1 \cdot Z_2$  را به‌دست آورید و مدار معادل  $Z$  را رسم کنید.

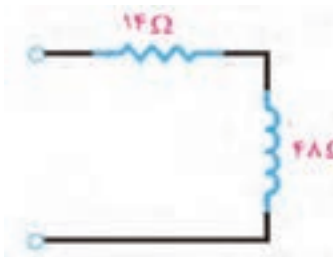
حل: ابتدا دو عبارت را درهم ضرب می‌کنیم.

$$Z = Z_1 \cdot Z_2 = (4 + j3)(8 + j6) = 32 + j24 + j24 + j^2 18$$

$$Z = 32 + j48 + (-1)(18) = 14 + j48$$

سپس عبارت را ساده می‌کنیم.

چون ضریب  $Z$  مثبت است، پس امپدانس  $Z = 14 + j48$  معادل مدار RL است، شکل ۹-۶۳.



شکل ۹-۶۳

- کاربرد عملیات ضرب را در حل مدارهای جریان متناوب بیابید و نتایج حاصل را جمع‌بندی کنید و در قالب یک گزارش ارائه دهید.

بحث گروهی



- مزدوج یک عدد مختلط و مفهوم آن: مزدوج یک عدد مختلط  $Z$  یعنی علامت جزء موهومی را عوض کنیم و آن را با  $Z^*$  نشان دهیم. یعنی اگر  $Z = a + jb$  باشد،  $Z^* = a - jb$  می‌شود.

آیا تعریف مزدوج یک عدد مختلط با بردارهای شکل ۹-۵۵ انطباق دارد؟ توضیح دهید.

پژوهش



مثال ۳۱- اگر امپدانس  $Z_1$  برابر با  $Z_1 = 3 + j4$  باشد:

الف) مزدوج  $Z_1$  را محاسبه کنید و مدار معادل آن را رسم کنید.

ب) حاصل جمع  $Z_1 + Z_1^*$  را به دست آورید.

پ) مدار معادل  $Z_1 + Z_1^*$  را رسم کنید.

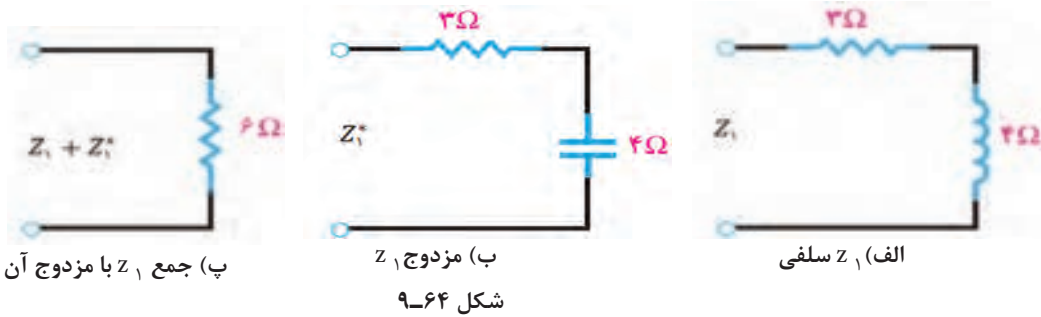
حل: الف) مزدوج

ب) حاصل جمع  $Z_1 + Z_1^*$

پ) رسم مدارهای مرتبط با مزدوج اعداد مختلط، (شکل ۹-۶۴).

$$Z_1^* = (3 + j4)^* = 3 - j4$$

$$Z_1 + Z_1^* = (3 + j4) + (3 - j4) = 6$$



بحث کنید



با توجه به مثال ۳۱، آیا  $a + jb$  مزدوج  $a - jb$  است؟ چرا؟ جمع بندی کنید و نتیجه را ارائه دهید.

☑ در تقسیم دو عدد مختلط باید صورت و مخرج عبارت تقسیم را در مزدوج مخرج ضرب کنیم.

مثال ۳۲- اگر  $Z_1 = 3 + j4$  و  $Z_2 = 4 + j3$  باشد، حاصل تقسیم  $Z = \frac{Z_1}{Z_2}$  را محاسبه کنید.

نکته

برای حل این نوع مسائل از روابط ریاضی زیر استفاده می کنیم.

$$(a+b)(a-b) = a^2 - b^2 \quad \text{و} \quad (a+b)(a+c) = a^2 + ac + ba + bc$$



حل:

- عبارت تقسیم را به صورت کسری می نویسیم.

$$Z = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{3 + j4}{4 + j3}$$

- صورت و مخرج کسر را در مزدوج مخرج ضرب می کنیم

$$Z = \frac{3 + j4}{4 + j3} \times \frac{4 - j3}{4 - j3} = \frac{12 - 9j + 16j - 12j^2}{16 - 9j^2}$$

- عبارت به دست آمده را ساده می کنیم. توجه داشته

باشید  $j^2 = -1$  و  $-j^2 = 1$  می شود.

$$Z = \frac{12 - 9j + 16j + 12}{16 + 9} = \frac{24 + j7}{25} = \frac{24}{25} + j\frac{7}{25}$$

- عبارت حاصل می تواند به صورت کسر بالا باشد یا

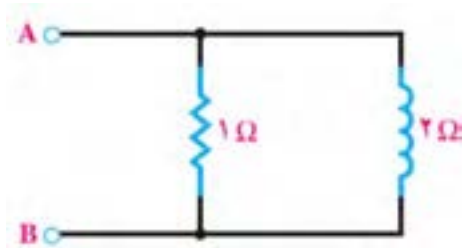
به صورت اعشاری زیر ساده شود.

$$Z = 0.96 + j0.28$$

مدار حاصل از تقسیم، یک مدار سلفی RL است.

■ محاسبات مربوط به مدارهای موازی **RL** و **RC**: برای درک بهتر، این محاسبات را با یک مثال تشریح می‌کنیم.

مثال ۳۳- امپدانس مدار معادل دو سر A و B را در شکل ۹-۶۵



محاسبه کنید و مدار معادل سری را رسم کنید.

شکل ۹-۶۵

حل:

☑ رابطه محاسبه امپدانس مدار موازی را به دو صورت می‌توان نوشت:

$$\begin{cases} \frac{1}{Z_{AB}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{Z_L} & \text{الف} \\ Z_{AB} = \frac{R \cdot Z_L}{R + Z_L} & \text{ب} \end{cases}$$

$$\frac{1}{Z_{AB}} = \frac{1}{R} + \frac{1}{jX_L} \Rightarrow Z_{AB} = \frac{R \cdot jX_L}{R + jX_L}$$

☑ مقادیر را در الگوی «ب» جایگزین می‌کنیم.

$$Z_{AB} = \frac{(1)(j2)}{1 + j2} = \frac{j2}{1 + j2}$$

☑ صورت و مخرج کسر را در مزدوج مخرج ضرب می‌کنیم.

$$Z_{AB} = \frac{j2(1 - j2)}{(1 + j2)(1 - j2)} = \frac{j2 - (j2)(j2)}{1 - (j2)^2} = \frac{j2 - j^2 4}{1 + 4} = \frac{j2 + 4}{5} = 0.8 + j0.4$$

مدار معادل سری مشابه شکل ۹-۶۶ خواهد بود.

مثال ۳۴- امپدانس مدار معادل را در دو سر A و B در شکل ۹-۶۷ محاسبه کنید و مدار معادل سری آن را رسم کنید.

حل: محاسبات مشابه مثال قبل که مدار **RL** موازی بود، انجام می‌شود. با این تفاوت که در این مثال مدار

به صورت **RC** موازی است.

$$Z_{AB} = \frac{2(-j2)}{2 - j2} = \frac{-j4}{2(1 - j)} = \frac{-j2}{1 - j}$$

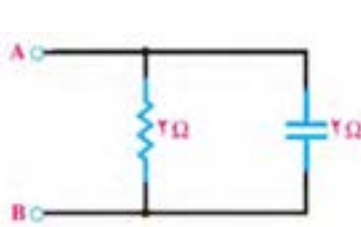
صورت و مخرج  $Z_{AB}$  را در مزدوج مخرج ضرب کرده و عبارت را ساده می‌کنیم.

$$Z_{AB} = \frac{-j2(1 + j)}{(1 - j)(1 + j)} = \frac{-j2 + 2}{1 - j^2} = \frac{2 - j2}{2} = 1 - j$$

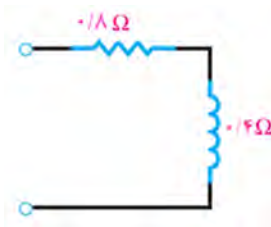
مدار معادل سری مشابه شکل ۹-۶۸ خواهد بود.



شکل ۹-۶۸- مدار **RC** سری



شکل ۹-۶۷- مدار **RC** موازی



شکل ۹-۶۶- مدار **RL** سری

### نکات مهم و ضروری:

□ اگر مدار امپدانسی به صورت RL باشد، مزدوج آن RC واگر به صورت RC باشد، مزدوج آن مدار RL خواهد بود.

□ حاصل جمع یک عدد مختلط با مزدوج خودش، یک عدد حقیقی است. به عبارت دیگر اگر امپدانسی با مزدوج خودش جمع شود، حاصل یک مدار مقاومتی خواهد بود، چرا؟ بررسی کنید و پاسخ دهید.

□ حاصل ضرب یک عدد مختلط در مزدوج خودش یک عدد حقیقی می شود.

□ حاصل تفریق یک امپدانس و مزدوج آن یک مدار خالص سلفی یا خازنی است.

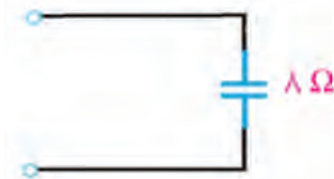
مثال ۳۵- اگر  $Z = 3 - j4$  باشد، الف) مقدار  $Z^*$ ،  $Z = Z$ ، ب)  $Z = Z - Z^*$  را محاسبه کنید.

حل: الف) شکل الف ۹-۶۹

$$Z = Z \cdot Z^* = (3 - j4)(3 + j4) = 9 + 16 = 25 \Omega$$

ب) شکل ب ۹-۶۹

$$Z = Z - Z^* = (3 - j4) - (3 + j4) = -j8$$



الف)



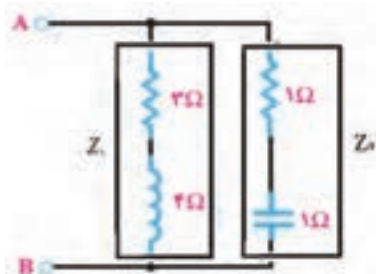
ب)

شکل ۹-۶۹

### ■ محاسبه امپدانس مدار معادل ترکیبی دو شاخه موازی

□ در مداری که دو امپدانس  $Z_1$  و  $Z_2$  موازی باشند، برای محاسبه امپدانس معادل از ضرب، تقسیم، مزدوج، جمع و تفریق اعداد مختلط استفاده می شود.

مثال ۳۶- امپدانس معادل مدار شکل ۹-۷۰ را از دو سر A و B محاسبه کنید و مدار معادل ساده شده را رسم کنید.



شکل ۹-۷۰

حل: برای حل مسئله ابتدا امپدانس شاخه های  $Z_1$  و  $Z_2$  را نوشته و سپس رابطه مربوط به مقاومت معادل در مدارهای موازی را می نویسیم.

$$\frac{1}{Z_{AB}} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \Rightarrow Z_{AB} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} \Rightarrow Z_{AB} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{(3 + j4)(1 - j)}{(3 + j4) + (1 - j)}$$

رابطه را ساده می کنیم.

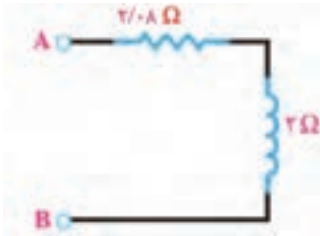
$$Z_{AB} = \frac{7 + j}{4 + j3}$$

صورت و مخرج را در مزدوج مخرج ضرب می کنیم. سپس رابطه را مانند مراحل قبل به ساده ترین شکل خود

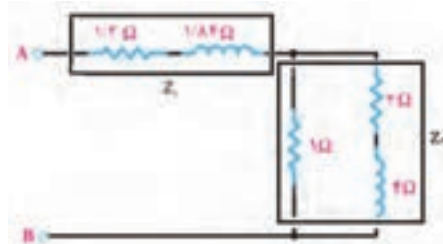
$$Z_{AB} = \frac{(7 + j)(4 - j3)}{(4 + j3)(4 - j3)} = \frac{31 - j17}{25} = \frac{31}{25} - j \frac{17}{25} = 1/24 - j 0/68$$

درمی آوریم.

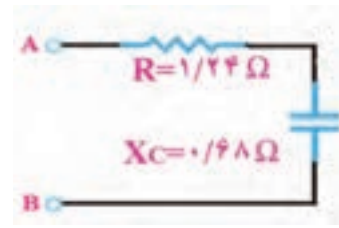
مدار معادل آن مشابه شکل ۹-۷۱ خواهد شد که RC است.



شکل ۹-۷۳



شکل ۹-۷۲



شکل ۹-۷۱

در مدار شکل ۹-۷۲ امپدانس را از دو سر A و B محاسبه کرده‌ایم و مدار معادل آن را در شکل ۹-۷۳ رسم کرده‌ایم. راه حل ارائه شده را به بحث بگذارید و روش حل مسئله را بررسی کنید و ببینید پاسخ‌ها صحیح است یا خیر؟

فعالیت گروهی



### حل مدار شکل ۹-۷۲:

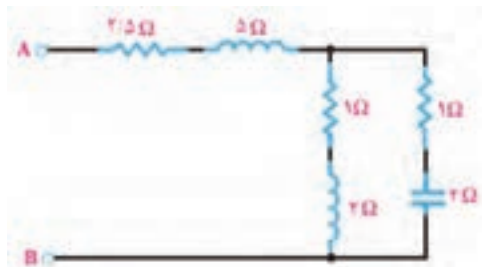
$$Z_1 = 1/2 + j1/0.8$$

$$Z_2 = \frac{1(2 + j4)}{1 + (2 + j4)} = \frac{2 + j4}{3 + j4} = \frac{(2 + j4)(3 - j4)}{(3 + j4)(3 - j4)} = \frac{22 + j4}{25} = 0.88 + j0.16$$

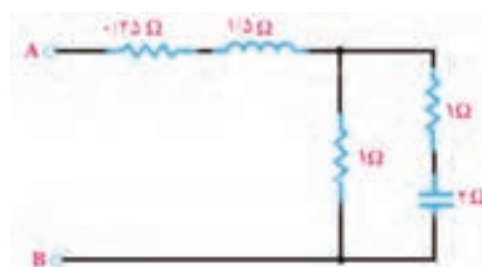
$$Z_{AB} = Z_1 + Z_2 = (1/2 + j1/0.8) + (0.88 + j0.16) = 2/0.8 + j2$$

### الگوی پرسش:

- ۱- در مدار شکل ۹-۷۴ امپدانس دو سر A و B را محاسبه کنید و مدار معادل ساده شده را رسم کنید.
- ۲- امپدانس دو سر A و B در مدار شکل ۹-۷۵ را محاسبه نموده و سپس مدار معادل ساده شده را رسم کنید.



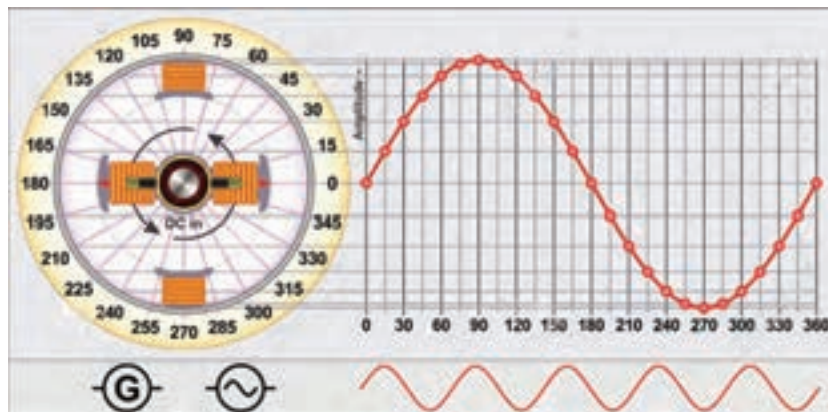
شکل ۹-۷۵



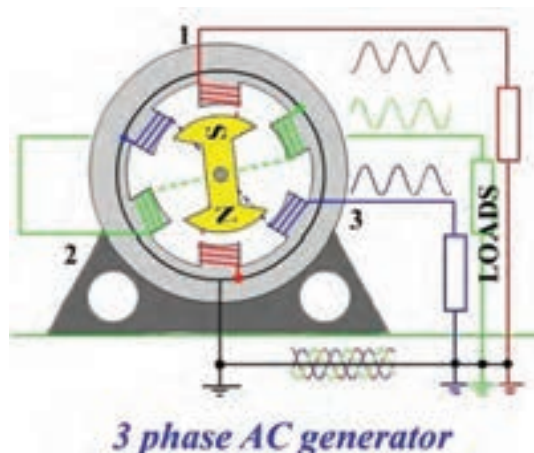
شکل ۹-۷۴

## ۹-۸- تشریح مدار تک فاز و سه فاز و محاسبه کمیت های آن

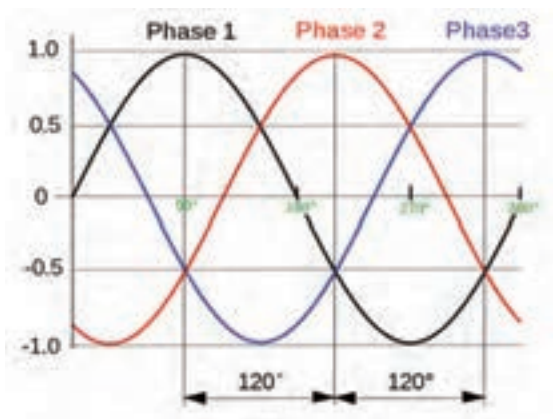
برق تک فاز دارای دو رشته سیم است که یکی فاز با ولتاژ ۲۲۰ ولت نسبت به سیم نول و دیگری سیم نول با ولتاژ صفر ولت نسبت به زمین است. در شکل ۹-۷۶ ژنراتور مولد موج سینوسی تک فاز نشان داده شده است. جریان یا ولتاژ سه فاز از سه موج سینوسی تشکیل می شود که به طور هم زمان تولید می شوند و با هم ۱۲۰ درجه اختلاف فاز زمانی دارند. در شکل ۹-۷۷ منحنی جریان یا ولتاژ سه فاز را مشاهده می کنید. در شکل ۹-۷۸ مولد سه فاز نشان داده شده است. در شکل ۹-۷۹ اتصال بار به صورت تک فاز و سه فاز نشان داده شده است.



شکل ۹-۷۶- موج تک فاز



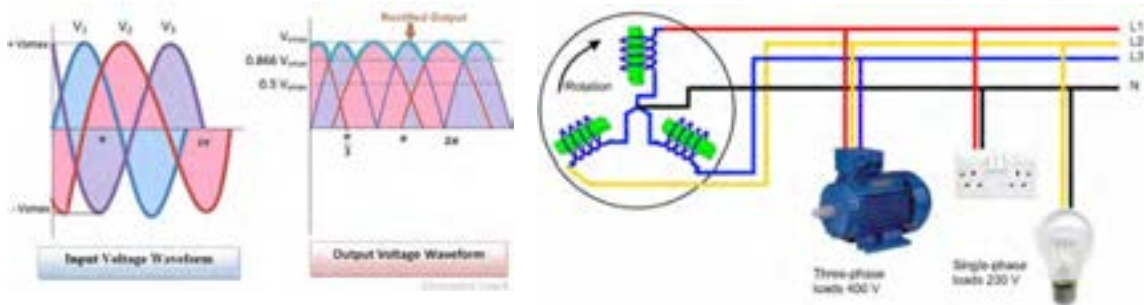
شکل ۹-۷۸- مولد سه فاز



شکل ۹-۷۷- جریان یا ولتاژ متناوب سه فاز

■ مزایای جریان سه فاز نسبت به تک فاز: ساختمان ساده مولدهای جریان متناوب سه فاز موجب شده است که انرژی الکتریکی سه فاز، راحت تر و ارزان تر تولید شود. مزایای دیگر جریان سه فاز نسبت به تک فاز عبارتند از:

- توان الکتریکی در مصرف کننده های سه فاز هیچ وقت صفر نمی شود زیرا با توجه به شکل ۹-۷۷ وقتی در یکی از فازها دامنه جریان یا ولتاژ صفر است مصرف کننده از دو فاز دیگر انرژی می گیرد.
- ضربان موج یکسو شده سه فاز نسبت به موج یکسو شده تک فاز بسیار کمتر است، شکل ۹-۸۰.



شکل ۹-۸۰- موج یکسو شده سه فاز

شکل ۹-۷۹- اتصال بار به صورت تک فاز و سه فاز

- راه اندازی موتورهای سه فاز نسبت به تک فاز راحت تر است.

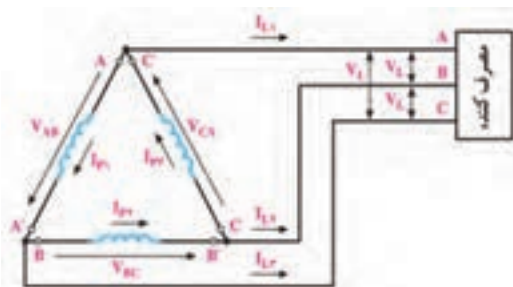
درباره مزایای سه فاز نسبت به تک فاز تحقیق کنید و نتایج آن را در قالب یک گزارش ارائه دهید.

پژوهش

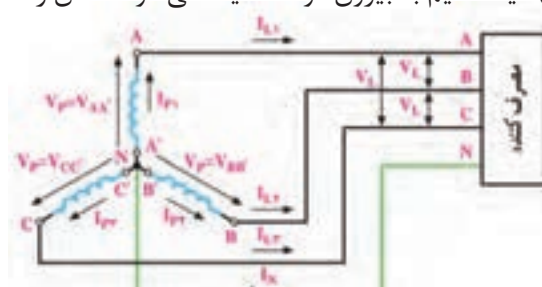


**انتقال انرژی تولید شده سه فاز به مصرف کننده ها:** در مولدهای سه فاز، سه گروه سیم پیچ وجود دارد که در داخل ماشین ۱۲۰ درجه نسبت به یکدیگر اختلاف فاز مکانی دارند. دو انتهای این سیم پیچ ها را به ترتیب با  $AA'$ ،  $BB'$  و  $CC'$  نشان می دهند. سیم پیچ ها با دو روش ستاره و مثلث به هم متصل می شوند، همچنین انرژی تولید شده در این سیم پیچ ها نیز با دو روش ستاره و مثلث به شبکه مصرف کننده انتقال می یابند.

☑ **اتصال ستاره:** در روش اتصال ستاره، سه سیم در انتهای  $A'$ ،  $B'$  و  $C'$  با هم یکی شده و از محل اتصال آنها، یک سیم به بیرون مولد هدایت می شود که آن را



شکل ۹-۸۲- اتصال مثلث، انتقال سه سیمه

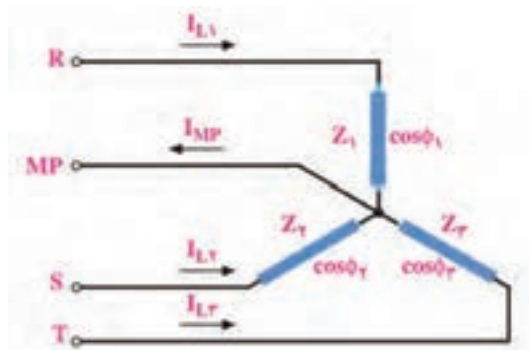


شکل ۹-۸۱- اتصال ستاره، انتقال چهارسیمه

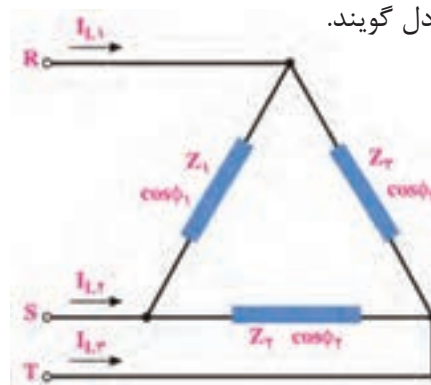
☑ ولتاژ فازی و جریان فازی: ولتاژ دو سر هر یک از سیم پیچ‌های  $AA'$ ،  $BB'$  و  $CC'$  را ولتاژ فازی می‌گویند و آن را با  $V_P$  نشان می‌دهند. جریان عبوری از داخل هر سیم پیچ را جریان فازی گویند و آن را با  $I_P$  می‌دهند، (شکل ۹-۸۱ و ۹-۸۲).

☑ ولتاژ و جریان خطی: ولتاژ بین خطوط  $A$  با  $B$  ( $V_{AB}$ ) یا  $B$  با  $C$  ( $V_{BC}$ ) یا  $C$  با  $A$  ( $V_{CA}$ ) را ولتاژ خطی گویند و آن را با  $V_L$  نشان می‌دهند. در واقع ولتاژ خطی اختلاف پتانسل بین دو فاز مختلف است. جریانی که از خطوط  $R$ ،  $S$  و  $T$  جاری می‌شود را جریان خطی گویند و آن را با  $I_L$  نشان می‌دهند، (شکل ۹-۸۱ و ۹-۸۲).

☑ بار متعادل و بار نامتعادل: سه امپدانس  $Z_1$ ،  $Z_2$  و  $Z_3$  را با اتصال مثلث یا ستاره مانند شکل‌های ۹-۸۳ و ۹-۸۴ به شبکه سه فاز وصل می‌کنیم. اگر همه مشخصه‌های امپدانس  $Z_1$ ،  $Z_2$  و  $Z_3$  از نظر، دامنه، زاویه فاز، پس فاز یا پیش فاز بودن با هم برابر باشند، شبکه سه فاز را با بار متعادل گویند. اگر یکی از مشخصه‌ها مثلاً دامنه، زاویه فاز، پس فاز و پیش فاز بودن در هر امپدانس با هم تفاوت داشته باشد، بار شبکه سه فاز را بار نامتعادل گویند.

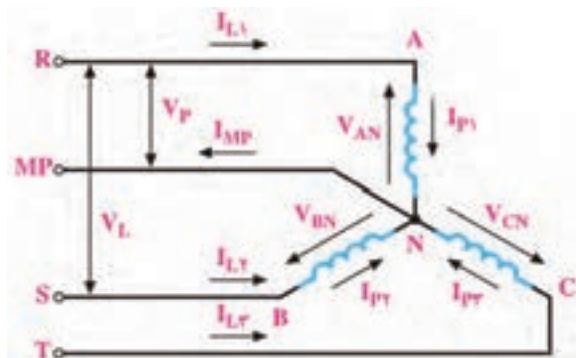


شکل ۹-۸۴- اتصال ستاره



شکل ۹-۸۳- اتصال مثلث

☑ روابط در اتصال ستاره با بار متعادل: در شکل ۹-۸۵ چون بارها متعادل هستند، جریان دریافتی از شبکه نیز با هم برابرند.



شکل ۹-۸۵- بار متعادل با اتصال ستاره

$$\text{جریان هر فاز} = I_P = I_{P_1} = I_{P_2} = I_{P_3} = I_P$$

$$\text{رابطه بین جریان فاز و جریان خط: } I_L = I_P = \frac{V_P}{Z}$$

$$\text{ولتاژ هر فاز: } V_P = V_{AN} = V_{BN} = V_{CN}$$

$$\text{رابطه بین ولتاژ خط و فاز: } V_L = \sqrt{3} V_P$$

نتیجه: در اتصال ستاره با بار متعادل

$$\lambda \begin{cases} I_L = I_P \\ V_L = \sqrt{3} V_P \end{cases}$$

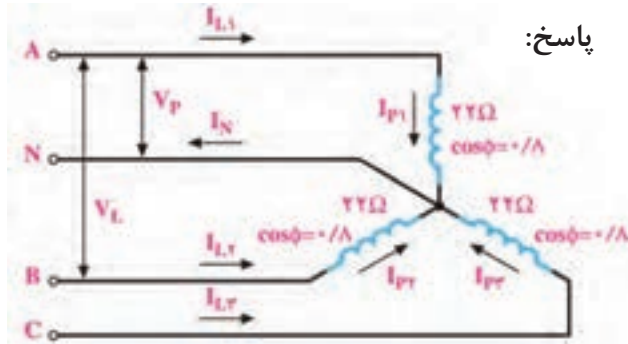


مثال ۱۶- در شکل ۹-۸۶ ولتاژ خط  $V_L=380V$  و بار متعادل است. مطلوب است محاسبه جریان هر فاز و هر خط

پاسخ:

$$V_L = \sqrt{3}V_P \Rightarrow V_P = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} \cong 220V$$

$$I_L = I_P = \frac{V_P}{Z} = \frac{220}{22} = 10A$$

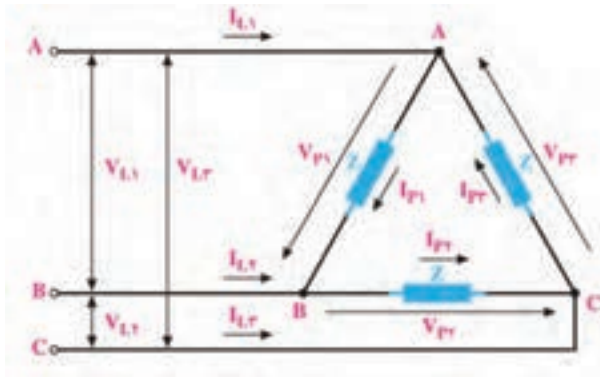


شکل ۹-۸۶- بار متعادل با اتصال ستاره

$$I_{P1} = I_{P2} = I_{P3} = I_{L1} = I_{L2} = I_{L3} = 10A$$

تحقیق کنید و اثبات نمایید که جریان عبوری از سیم نول در مدار شکل ۹-۸۶ صفر است. نتیجه را در قالب یک گزارش ارائه دهید.

پژوهش



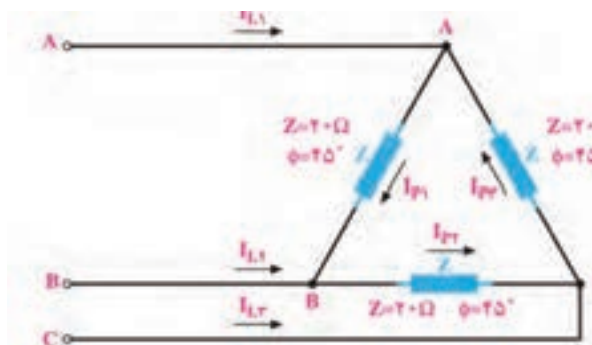
شکل ۹-۸۷- بار متعادل با اتصال مثلث

روابط در اتصال مثلث با بار متعادل: در شکل ۹-۸۷ اتصال مثلث با بار متعادل رسم شده است. ولتاژهای فازی و خطی با هم برابرند. ولتاژ هر فاز به صورت  $V_{AB} = V_{BC} = V_{CA}$  است. بنابراین  $V_{AB} = V_{BC} = V_{CA} = V_L = V_P$  و جریان هر فاز  $I_{P1} = I_{P2} = I_{P3} = I_P$

رابطه بین جریان فاز و جریان خط:  $I_L = \sqrt{3}I_P$

نتیجه: در اتصال مثلث با بار متعادل  $\Delta \begin{cases} V_P = V_L \\ I_L = \sqrt{3} I_P \end{cases}$

$$\Delta \begin{cases} V_P = V_L \\ I_L = \sqrt{3} I_P \end{cases} \text{ نتیجه: در اتصال مثلث با بار متعادل}$$



شکل ۹-۸۸- بار متعادل با اتصال مثلث

مثال ۱۷- در شکل ۹-۸۸ ولتاژ خط  $V_L=100V$  و بار متعادل است. مطلوب است محاسبه جریان هر فاز و هر خط

پاسخ:

$$V_L = V_P = 100V$$

$$I_{P1} = \frac{V_{P1}}{Z_1} = \frac{100}{20} = 5A$$

$$I_{L1} = I_{L2} = I_{L3} = \sqrt{3} \times 5 = 8.66A$$



کار با نرم افزار در ساعات غیر درسی: مدار اتصال بار متعادل به صورت ستاره و مثلث را در نرم افزار مولتی سیم شبیه سازی کنید و ولتاژ و جریان خطی و خطی و فاز را اندازه بگیرید و نتایج را با اطلاعات کسب شده مقایسه کنید.

در پایه دهم در مورد خواندن پلاک موتور توضیح داده شده است. چند نمونه پلاک موتورهای سه فاز و اطلاعات نوشته شده روی آن را بیابید، درباره محتوای آن تحقیق کنید و نتیجه را در قالب یک گزارش ارائه دهید.

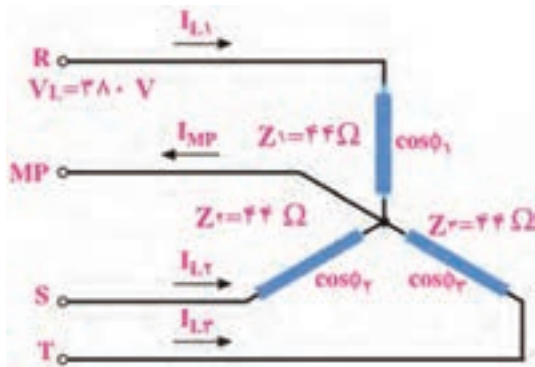
**الگوی پرسش:**

۱- در اتصال بار متعادل به صورت ستاره به شبکه سه فاز، جریان خطی ( $I_L$ ) چه رابطه ای با جریان فازی ( $I_P$ ) دارد؟

الف)  $I_L = I_P$       ب)  $I_L = \sqrt{3} I_P$

پ)  $I_P = \sqrt{3} I_L$       ت)  $I_L = 2 I_P$

۲- در اتصال بار متعادل به صورت مثلث به شبکه سه فاز، رابطه ولتاژ خطی  $V_{AB}$  و ولتاژ  $V_P$  به صورت ..... است.

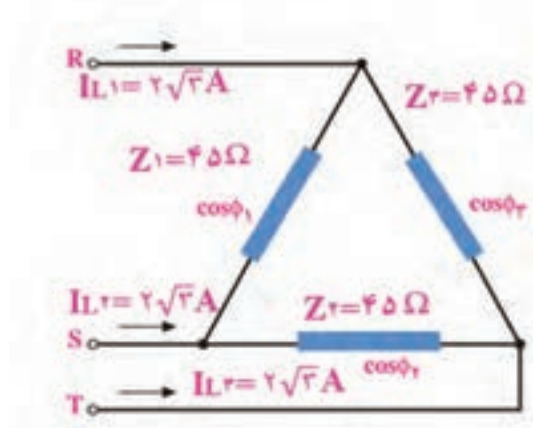


شکل ۸۹-۹- بار متعادل ستاره

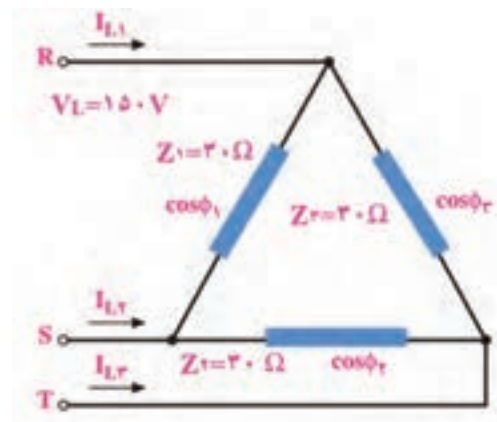
۳- در شکل ۸۹-۹ ولتاژ خط  $V_L = 380 V$  و بار متعادل است. مطلوب است محاسبه جریان هر فاز و هر خط

۴- در شکل ۹۰-۹ ولتاژ خط  $V_L = 150 V$  و بار متعادل است. مطلوب است محاسبه جریان هر فاز و هر خط

۵- در بار متعادل شکل ۹۱-۹ جریان و ولتاژ هر فاز و ولتاژ هر خط را محاسبه کنید.



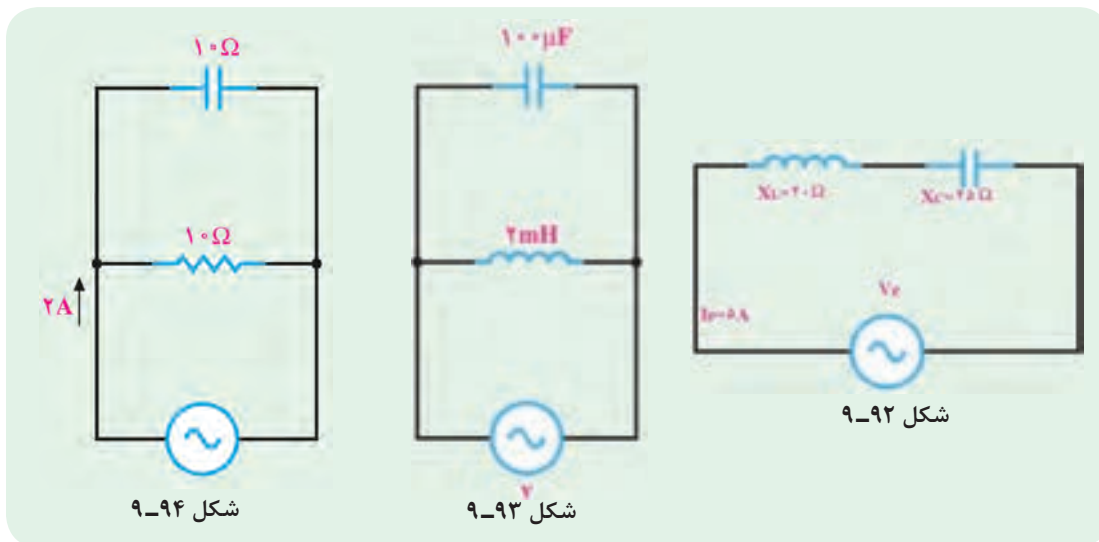
شکل ۹۱-۹



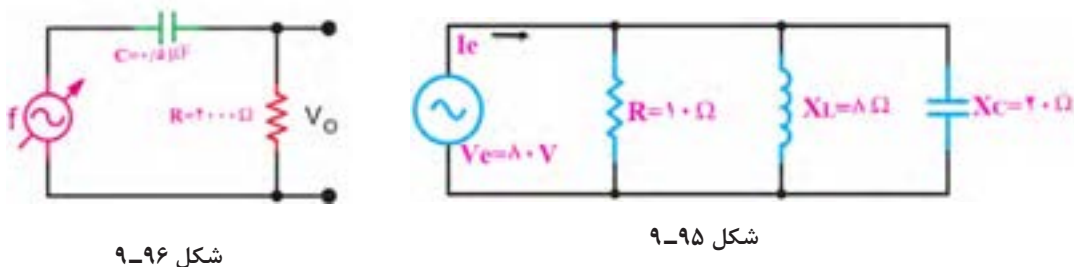
شکل ۹۰-۹- بار متعادل مثلث

### آزمون نظری پایان واحد یادگیری

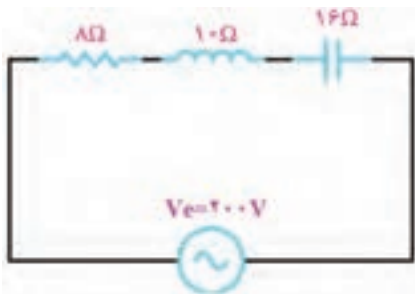
- ۱- در یک مدار شامل خازن، اگر فرکانس منبع جریان متناوب افزایش یابد، راکتانس خازنی افزایش می‌یابد.  
 غلط       صحیح
- ۲- در مدار شکل ۹-۹۲ امپدانس مدار و ولتاژ مؤثر مدار را محاسبه کنید.
- ۳- در شکل ۹-۹۳ اگر فرکانس منبع ۱۰۰۰ هرتز باشد مطلوب است الف) مقدار راکتانس خازن و سلف در این فرکانس  
 ب) در چه فرکانسی این مدار رزونانس می‌کند؟
- ۴- در مدار شکل ۹-۹۴ امپدانس مدار و ولتاژ مؤثر منبع را محاسبه کنید.



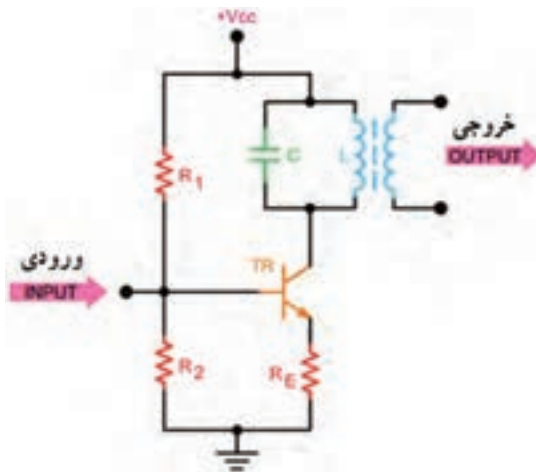
- ۵- در مدار شکل ۹-۹۵ ابتدا جریان هر شاخه را نام‌گذاری کنید، سپس جریان هر شاخه، جریان کل مدار و امپدانس کل را محاسبه کنید.
- ۶- نوع فیلتر شکل ۹-۹۶ را بنویسید و فرکانس قطع آن را محاسبه کنید.



- ۷- مدار یک فیلتر حذف باند را رسم کنید و فرمول فرکانس رزونانس و پهنای باند آن را بنویسید.
- ۸- نوع فیلتر به کار رفته در شکل ۹-۹۷ کدام گزینه است؟  
 الف) بالاگذر      ب) پایین‌گذر      پ) میان‌گذر      ت) میان‌نگذر
- ۹- در شکل ۹-۹۸ امپدانس و جریان کل مدار را با استفاده از اعداد مختلط محاسبه کنید.



شکل ۹-۹۸



شکل ۹-۹۷

۱۰- مدار معادل الکتریکی هریک از امپدانس‌های  $Z_1$  و  $Z_2$  را رسم کنید.

$$Z_1 = 10 + j15 \quad Z_2 = 8 - j6$$

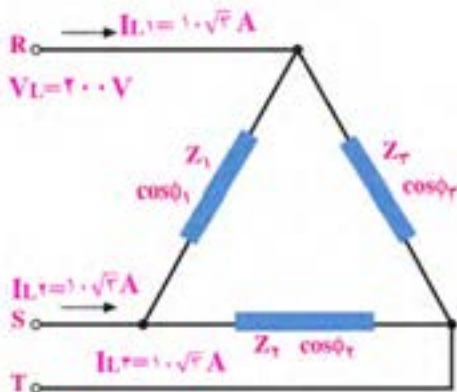
۱۱- در اتصال بار متعادل به صورت مثلث کدام گزینه صحیح است؟

الف)  $V_L = V_P$       ب)  $V_L = \sqrt{3} V_P$       پ)  $V_P = \sqrt{3} V_L$       ت)  $V_L = 2V_P$

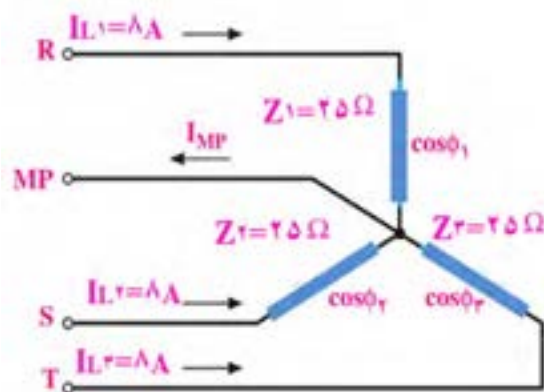
۱۲- مزایای برق سه‌فاز را در مقایسه با تک‌فاز بنویسید.

۱۳- در شکل ۹-۹۹ جریان و ولتاژ هر یک از فازها و خط‌ها را محاسبه کنید، (بار متعادل است).

۱۴- در شکل ۹-۱۰۰ با توجه به متعادل بودن بارها، مقدار جریان، ولتاژ و امپدانس هر فاز را محاسبه کنید.



شکل ۹-۱۰۰



شکل ۹-۹۹

### ارزشیابی واحد یادگیری ۹: کسب شایستگی در تحلیل انواع فیلترها، نوسان سازها و مدارهای تک فاز و سه فاز ساده

#### شرح کار:

۱- تشریح مدارهای RL و RC سری و موازی و حل مسائل آن ۲- تشریح مدارهای RL و RC به عنوان فیلتر و حل مسائل آن  
۳- تشریح مدارهای RLC سری و موازی و حل مسائل آن ۴- تشریح مدارهای فیلتر عبور باند و حذف باند و حل مسائل آن  
۵- استفاده از اعداد مختلط برای حل مسائل جریان متناوب ۶- مدارهای تک فاز و سه فاز و حل مسائل آن

#### استاندارد عملکرد:

تحلیل انواع فیلترها و مدارهای تک فاز و سه فاز و مدل سازی تقویت کننده و بررسی مدار نوسان ساز

#### شاخص ها:

تشریح مدارهای RL و RC سری و موازی و حل مسائل آن (۱۰ دقیقه) ۲- تشریح مدارهای RL و RC به عنوان فیلتر و حل مسائل (۱۰ دقیقه) ۳- تشریح مدارهای RLC سری و موازی و حل مسائل آن (۱۵ دقیقه) ۴- تشریح مدارهای فیلتر عبور باند و حذف باند و حل مسائل آن (۱۰ دقیقه) ۵- استفاده از اعداد مختلط برای حل مسائل جریان متناوب (۱۵ دقیقه) ۶- مدارهای تک فاز و سه فاز و حل مسائل آن (۱۰ دقیقه)

شرایط انجام کار و ابزار و تجهیزات: کلاس درس یا کارگاه یا سایت مجهز به رایانه - نور مناسب - ابعاد حداقل ۶ مترمربع و دارای تهویه یا پنجره - دمای طبیعی ( $27^{\circ}\text{C}$  -  $18^{\circ}\text{C}$ ) و مجهز به وسایل اطفای حریق - رایانه - نرم افزارهای مرتبط - لوازم التحریر - ماشین حساب

#### معیار شایستگی:

ردیف	مراحل کار	حداقل نمره قبولی از ۳	نمره هنرجو
۱	تشریح مدارهای RL و RC سری و موازی و حل مسائل آن	۲	
۲	تشریح مدارهای RL و RC به عنوان فیلتر و حل مسائل	۲	
۳	تشریح مدارهای RLC سری و موازی و حل مسائل آن	۲	
۴	تشریح مدارهای فیلتر عبور باند و حذف باند و حل مسائل آن	۲	
۵	استفاده از اعداد مختلط برای حل مسائل جریان متناوب	۲	
۶	مدارهای تک فاز و سه فاز و حل مسائل آن	۲	
	شایستگی های غیر فنی، ایمنی، بهداشت، توجهات زیست محیطی و نگرش:		
	۱- محافظت از تجهیزات و دستگاه ها ۲- دقت و مسئولیت پذیری ۳- شایستگی تفکر و یادگیری مادام العمر ۴- اخلاق حرفه ای ۵- رعایت نکات زیست محیطی ۶- به کارگیری فناوری نوین ۷- مستند سازی	۲	
	میانگین نمرات		*

\* حداقل میانگین نمرات هنرجو برای قبولی و کسب شایستگی، ۲ می باشد.

# واحد یادگیری ۱۰

## کسب شایستگی در تحلیل مدار معادل AC تقویت کننده‌های یک طبقه و دو طبقه

### آیا تا به حال فکر کرده‌اید:

- تحلیل مدار معادل AC تقویت کننده یک طبقه و دو طبقه به چه منظوری انجام می‌شود؟
  - در تقویت کننده امیتر مشترک چگونه می‌توان فیدبک منفی ایجاد کرد؟
  - وجود فیدبک منفی چه تأثیری روی مشخصات تقویت کننده می‌گذارد؟
  - چگونه می‌توان اثر فیدبک منفی را در تقویت کننده امیتر مشترک کاهش داد؟
  - برای ایجاد نوسان در مدارهای الکترونیکی از کدام اصل و فیدبک باید استفاده کرد؟
  - برای تحلیل یک مدار نوسان ساز، شناسایی فیلتر برای محاسبه فرکانس رزونانس مدار اهمیت دارد؟
- در تحلیل مدارهای تقویت کننده نیاز به شناخت رفتار قطعات داریم تا بتوانیم مدار معادل AC تقویت کننده را ترسیم و کمیت‌های مدار تقویت کننده یک طبقه و دو طبقه را محاسبه کنیم. نوع فیدبک در مقادیر کمیت‌ها تأثیر زیادی دارد، مثلاً فیدبک منفی، ضریب بهره تقویت ولتاژ را کاهش و مقاومت ورودی تقویت کننده را افزایش می‌دهد. در حالی که در فیدبک مثبت، بهره تقویت کننده زیاد شده و امپدانس ورودی آن کاهش می‌یابد و مدار به نوسان در می‌آید. برای ایجاد فیدبک مثبت به منظور پایداری نوسان‌ها لازم است نوع فیلتر در نوسان سازها مشخص شود تا بتوان فرکانس رزونانس مدار نوسان ساز را محاسبه کرد. در این واحد یادگیری با طرح مدارهای ساده تقویت کننده یک طبقه و دو طبقه و مدارهای نوسان سازها، چگونگی محاسبه کمیت‌های آنها شرح داده می‌شود. همچنین ضرورت دارد تمامی روابط مربوط به آنها به صورت تشریحی، محاسباتی، اجرایی و فعالیت‌های نرم‌افزاری در خارج از ساعت درسی به اجرا درآید. یادآوری می‌شود که از تمام این فعالیت‌ها باید ارزشیابی به عمل آید.

### استاندارد عملکرد

مدل سازی تقویت کننده و بررسی مدارهای نوسان ساز

## ۱۰-۱- محاسبات AC در مدارهای الکترونیکی

### ■ رفتار قطعات مدار تقویت کننده در سیگنال AC

- ☑ برای اینکه ترانزیستور به عنوان تقویت کننده عمل کند، باید پس از آنکه ترانزیستور در نقطه کار مناسب (Q) بایاس شد، یک سیگنال AC با دامنه کم (Small Signal) را به ورودی تقویت کننده اعمال کنیم.
- ☑ سیگنال AC با توجه به تغییراتی که دارد روی نقطه کار DC ترانزیستور اثر می‌گذارد. این تغییرات روی نقطه کار باعث تغییرات زیاد در جریان  $I_C$  می‌شود. در نهایت سیگنال را در خروجی ترانزیستور تقویت می‌کند.

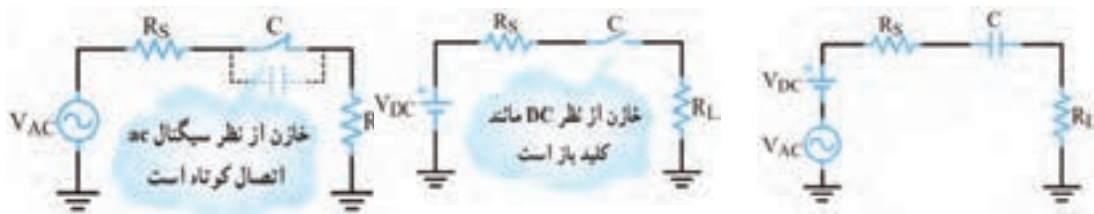
✓ چگونگی تقویت سیگنال AC در پایه دهم و یازدهم توضیح داده شده است. در این مبحث به بررسی رفتار قطعات مدار تقویت کننده در سیگنال AC و DC می پردازیم.

✓ همان طور که گفته شد، عکس العمل خازن در جریان DC و AC متفاوت است. در  $f=0$ ،  $X_C=\infty$  و در  $f=\infty$ ،  $X_C=0$  است. یعنی در شرایط DC، خازن به صورت مدار باز (کلید باز)، و در جریان AC، خازن به صورت مدار بسته (کلید بسته) عمل می کند.

✓ اگر فرکانس خیلی زیاد باشد، با انتخاب ظرفیت مناسب، مقدار  $X_C$  بسیار کم می شود، به طوری که می توان آن را تقریباً اتصال کوتاه در نظر گرفت. با توجه به این موضوع، خازن در مدارهای تقویت کننده به دو صورت کوپلاژ (Coupling) و بای پاس (By pass) مورد استفاده قرار می گیرد.

□ **خازن کوپلاژ:** خازنی است که سیگنال AC را از مداری به مدار دیگر منتقل می کند و مانع عبور سیگنال DC می شود. شکل ۱۰-۱ خازن کوپلاژ را در مداری ساده نشان می دهد. این خازن با مولد سیگنال متناوب و بار  $R_L$  به صورت سری قرار گرفته است.

□ می دانیم خازن در سیگنال DC به صورت مدار باز عمل می کند. در فرکانس های پایین نیز خازن تقریباً رفتاری مشابه مدار باز دارد و نمی تواند تمام سیگنال متناوب را به بار انتقال دهد. شکل ۱۰-۲ رفتار خازن در برابر سیگنال DC را نشان می دهد. برای آن که خازن کوپلاژ بتواند قسمت اعظم سیگنال متناوب (AC) را به بار  $R_L$  انتقال دهد، باید در پایین ترین فرکانس سیگنال AC تقریباً به صورت اتصال کوتاه عمل کند. بدیهی است هر قدر فرکانس بالاتر می رود، مقدار مقاومت خازنی کمتر و خازن به حالت اتصال کوتاه کامل نزدیک تر می شود. شکل ۱۰-۳ خازن را در مقابل سیگنال AC به صورت کلید بسته (تقریباً اتصال کوتاه) نشان می دهد.



شکل ۱۰-۳

شکل ۱۰-۲ خازن در برابر سیگنال DC

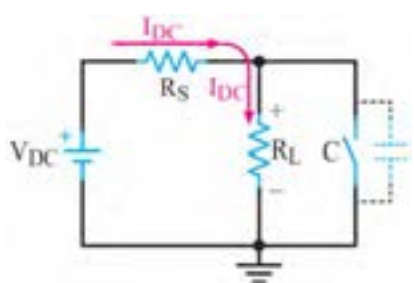
شکل ۱۰-۱ مدار ساده با خازن کوپلاژ

تحقیق کنید که برای پذیرفتن حالت اتصال کوتاه خازن در جریان متناوب، چه رابطه ای باید بین مقادیر  $R_L$  یا  $X_C$ ،  $R_S$  برقرار باشد.

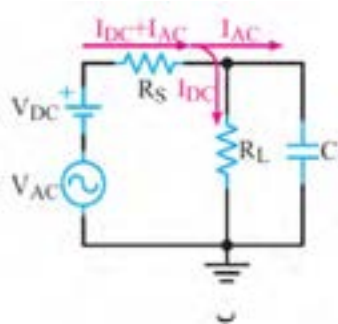
فعالیت



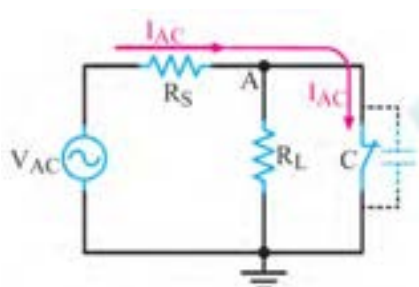
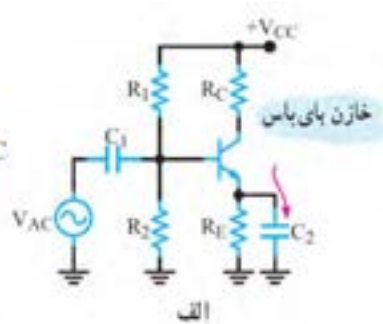
□ شکل الف و ب - ۱۰-۴ خازن بای پاس را در یک تقویت کننده بایاس سرخود و یک مدار ساده نشان می دهد. بر خلاف خازن کوپلاژ که با بار سری است، خازن بای پاس به صورت موازی با بار قرار می گیرد. نقش خازن در این مدار ساده، جلوگیری از عبور سیگنال متناوب از  $R_L$  و هدایت آن از طریق خازن به زمین است. در این مدار نیز از نظر DC خازن مانند کلید باز عمل می کند. بنابراین ولتاژ DC دو سر  $R_L$  ثابت باقی می ماند. شکل ۱۰-۵ رفتار خازن را در مقابل سیگنال DC نشان می دهد.



شکل ۱۰-۵- خازن بای پاس در مقابل سیگنال DC



شکل ۱۰-۴

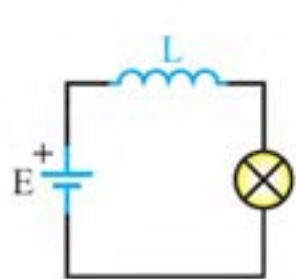


شکل ۱۰-۶- خازن C در مقابل جریان ac مانند اتصال کوتاه عمل می کند.

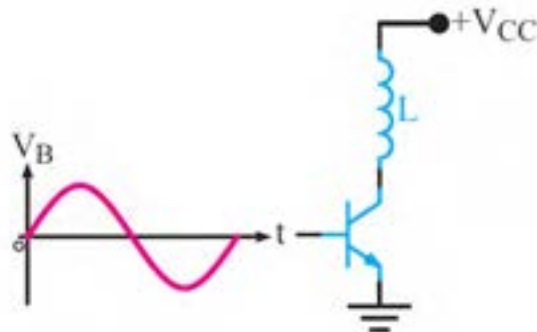
در سیگنال AC، ظرفیت خازن C باید طوری محاسبه شود که در حداقل فرکانس کار به صورت اتصال کوتاه عمل کند، در نتیجه نقطه A از نظر سیگنال AC مطابق شکل ۱۰-۶ به زمین اتصال کوتاه می شود. در این حالت گوییم در نقطه A، زمین AC یا AC Ground ایجاد شده است.

همان طور که قبلاً گفتیم، عکس العمل سیم پیچ در مدار از رابطه  $X_L = 2\pi fL$  محاسبه می شود. چون مقاومت اهمی سیم پیچ کم است، از آن صرف نظر می کنیم. بنابراین، مقاومت سیم پیچ در جریان DC

( $f=0$ ) برابر صفر است. یعنی سیم پیچ در مقابل سیگنال DC به صورت اتصال کوتاه عمل می کند. شکل الف - ۱۰-۷ قسمتی از یک تقویت کننده را نشان می دهد که سلف با کلکتور ترانزیستور سری شده است. شکل ب - ۱۰-۷ یک لامپ را نشان می دهد که با سلف به صورت سری قرار دارد و در حالت DC روشن است.



ب - لامپ با وجود سلف در مدار روشن است.

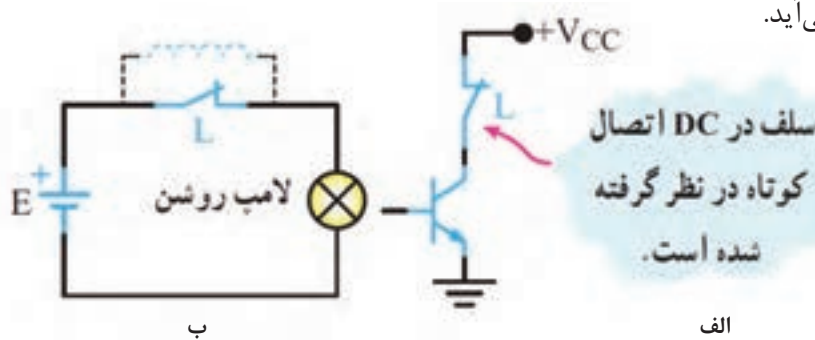


الف - سیگنال متناوب با فرکانس f

شکل ۱۰-۷

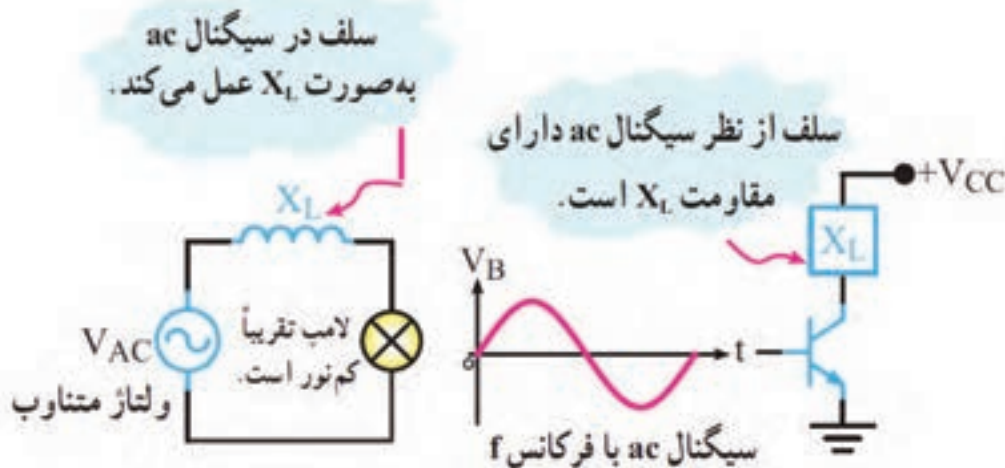


بنابراین در جریان مستقیم (DC) سلف به صورت اتصال کوتاه عمل می‌کند و مدار معادل آن به صورت شکل ۸-۱۰ در می‌آید.



شکل ۸-۱۰- معادل سلف در DC

☑ سیم‌پیچ در مقابل سیگنال متناوب (AC) بافرکانس  $f$  دارای مقاومتی برابر با  $X_L$  است. با توجه به رابطه  $X_L$ ، هر قدر فرکانس سیگنال متناوب بیشتر باشد،  $X_L$  نیز بزرگ‌تر می‌شود. در سیگنال متناوب سلف دارای مقاومت سلفی  $X_L$  است. شکل ۹-۱۰ را به صورت مقاومت معادل در سیگنال AC نشان می‌دهد.



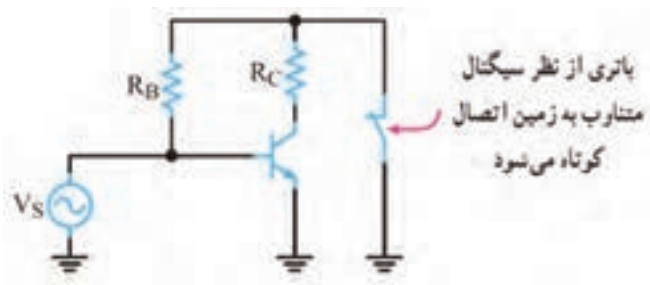
شکل ۹-۱۰- معادل سلف در سیگنال AC

### ☑ عکس‌العمل باتری در مدار:

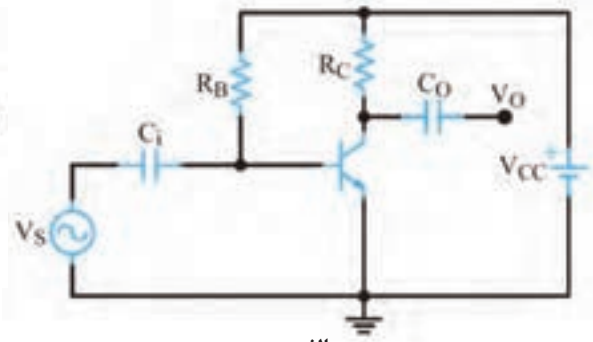
☐ اگر باتری را ایده‌آل در نظر بگیریم و از مقاومت داخلی آن صرف نظر کنیم، از نظر DC به عنوان یک منبع ولتاژ ایده‌آل، با ولتاژی برابر با  $V_{DC}$ ، مدار را تغذیه می‌کند.

☐ از طرفی می‌دانیم در داخل باتری یک خازن با ظرفیت بالا وجود دارد، این خازن در سیگنال AC به صورت اتصال کوتاه در می‌آید و اصطلاحاً می‌گویند باتری زمین AC یا AC Ground شده است، شکل ۱۰-۱۰.

☐ در سیگنال متناوب در صورت برقراری شرایط (فرکانس مناسب) خازن‌ها تقریباً اتصال کوتاه می‌شوند. باتری نیز به دلیل داشتن خازن داخلی تقریباً اتصال کوتاه خواهد شد. شکل ب- ۱۰-۱۰ مدار معادل تقویت‌کننده را در سیگنال متناوب نشان می‌دهد.



ب



الف

شکل ۱۰-۱۰- باتری در برابر سیگنال ac

## نکات مهم در مدل‌سازی DC

برای تعیین مدل ساده DC و AC یک مدار به نکات ویژه‌ای توجه داشته باشیم:

- خازن در جریان DC به صورت کلید باز و در جریان AC در صورت برقرار بودن شرایط، به صورت اتصال کوتاه (کلید بسته) در نظر گرفته می‌شود.
- سلف در جریان DC به صورت اتصال کوتاه (کلید بسته) دیده می‌شود و در جریان AC دارای مقاومت سلفی  $X_L$  است.
- در صورتی که فرکانس خیلی زیاد باشد و  $X_L$  خیلی زیاد شود، در این حالت می‌توان، سلف را به صورت مدار باز (کلید باز) در نظر گرفت.
- باتری در حالت DC تغییری نمی‌کند، ولی در حالت AC به صورت اتصال کوتاه دیده می‌شود.

تحقیق کنید چرا باتری در شرایط AC اتصال کوتاه دیده می‌شود؟

پژوهش



**مثال ۱:** در شکل ۱۰-۱۱ مطلوب است:

الف) رسم مدار معادل ساده DC

ب) رسم مدار معادل ساده AC

**پاسخ:**

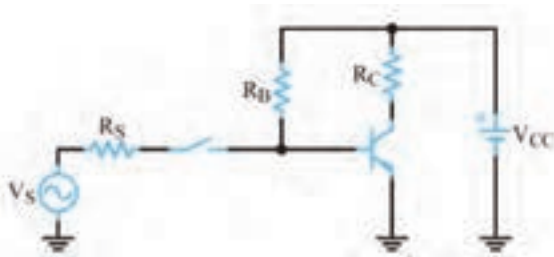
الف) مدار ساده معادل DC

در سیگنال DC خازن‌های مدار به صورت کلید باز هستند و باتری در جای خود قرار دارد. بنابراین اگر ولتاژ ورودی DC باشد، خازن کوپلاژ به صورت اتصال باز عمل می‌کند، شکل ۱۰-۱۲.

ب) مدار ساده معادل AC

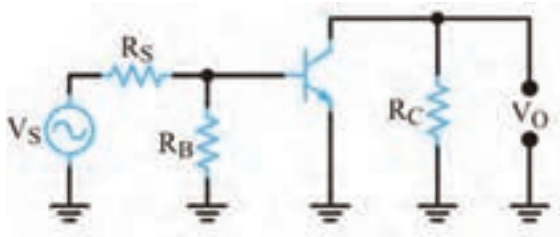
در سیگنال متناوب خازن‌ها در مدار تقریباً به صورت اتصال کوتاه هستند و باتری نیز به دلیل داشتن خازن داخلی به زمین الکتریکی اتصال دارد. شکل ۱۰-۱۳ مدار معادل AC ساده را نشان می‌دهد. با توجه

شکل ۱۰-۱۱

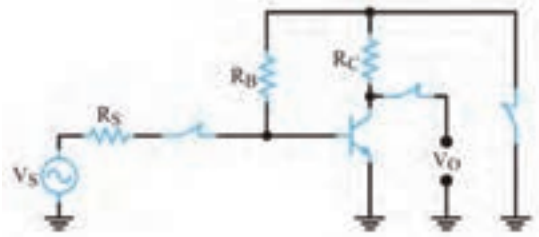


شکل ۱۰-۱۲- مدار معادل DC مثال ۱

به شکل ۱۰-۱۳ مشاهده می‌شود که انتهای بالایی مقاومت‌های  $R_B$  و  $R_C$  از طریق ظرفیت خازنی داخل باتری به زمین متصل شده‌اند. لذا می‌توان مدار را به صورت شکل ۱۰-۱۴ ترسیم نمود.



شکل ۱۰-۱۴- مدار معادل ac مثال ۱



شکل ۱۰-۱۳- اتصال کوتاه خازن‌ها در مثال ۱

با توجه به شکل ۱۰-۱۵ مطلوب است:

الف) رسم مدار ساده معادل DC

ب) رسم مدار ساده معادل AC

شکل ۱۰-۱۵

فعالیت در ساعات  
غیر درسی



## ۱۰-۲- فیدبک در تقویت کننده‌ها

### ■ نقش فیدبک در تقویت کننده ترانزیستوری

- ✓ وقتی تقویت کننده‌ای را در نقطه کار معینی طراحی می‌کنیم، باید نقطه کار، ضریب تقویت، مقاومت ورودی، مقاومت خروجی و سایر مشخصات آن ثابت بماند و تغییر نکند.
- ✓ اگر مقدار هر یک از مقاومت‌های مدار یا مشخصات ترانزیستور تغییر کند یا ترانزیستور تعویض شود، چون مشخصات قطعه تغییر یافته با قطعه قبلی انطباق کامل ندارد، ممکن است باعث تغییر در نقطه کار، مشخصات ورودی و خروجی مدار شود.
- ✓ همچنین عوامل دیگری مانند حرارت و عوامل غیر قابل کنترل در محیط بر نقطه کار تأثیر می‌گذارند و مشخصات ورودی و خروجی مدار را تغییر می‌دهند.
- ✓ این تغییرات به طور طبیعی نامطلوب هستند.



شکل ۱۰-۱۶- بلوک دیاگرام تقویت کننده با فیدبک

✓ برای ثابت ماندن مشخصات تقویت کننده و تنظیم برخی مشخصات از عاملی به نام فیدبک (back Feed) یا باز خورد یا پس خوران استفاده می شود.

✓ فیدبک عبارت از انتقال قسمتی از انرژی خروجی (ولتاژ یا جریان) به ورودی مدار است.

به عبارت دیگر، اگر قسمتی از انرژی خروجی مدار به ورودی آن انتقال داده شود، در مدار فیدبک ایجاد

می شود. در شکل ۱۰-۱۶ بلوک دیاگرام تقویت کننده با مدار فیدبک را مشاهده می کنید.

✓ در شکل ۱۰-۱۶ شبکه فیدبک با خروجی مدار موازی شده است و کسری از ولتاژ خروجی مدار را به ورودی تقویت کننده بر می گرداند.

ولتاژی که به ورودی تقویت کننده بر می گردد در هر لحظه با ولتاژ ورودی تقویت کننده جمع جبری می شود.

### ✓ انواع فیدبک



شکل ۱۰-۱۷- بلوک دیاگرام تقویت کننده با فیدبک مثبت

انتقال انرژی از خروجی تقویت کننده به ورودی آن به دو صورت فیدبک مثبت و منفی صورت می گیرد.

□ فیدبک مثبت: اگر ولتاژ برگشتی از خروجی تقویت کننده با ولتاژ ورودی آن کاملاً هم فاز باشد، فیدبک از نوع مثبت است.

✓ در این حالت چون ولتاژهای ورودی و خروجی هم فاز هستند، ولتاژ ورودی تقویت کننده افزایش می یابد.

✓ افزایش ولتاژ ورودی، ولتاژ خروجی تقویت کننده را نیز افزایش می دهد.

✓ به این نوع فیدبک که منجر به افزایش دامنه ولتاژ خروجی تقویت کننده می شود، فیدبک مثبت می گویند.

✓ شکل ۱۰-۱۷ بلوک دیاگرام فیدبک مثبت را نشان می دهد.

✓ فیدبک مثبت مدار تقویت کننده را ناپایدار می کند و در صورت وجود شرایط، آن را به نوسان در می آورد.

□ فیدبک منفی: اگر ولتاژ برگشتی مدار با ولتاژ ورودی تقویت کننده هم فاز نباشد و با آن ۱۸۰ اختلاف فاز داشته باشد فیدبک منفی به وجود می آید.

✓ در این حالت ولتاژ فیدبک، به دلیل داشتن ۱۸۰ درجه اختلاف فاز با ولتاژ ورودی تقویت کننده، مقدار ولتاژ ورودی را کاهش می دهد و باعث کم شدن ولتاژ خروجی می شود. این نوع فیدبک را فیدبک منفی می گویند.

برای پایداری تقویت کننده ها از فیدبک منفی استفاده می کنند.

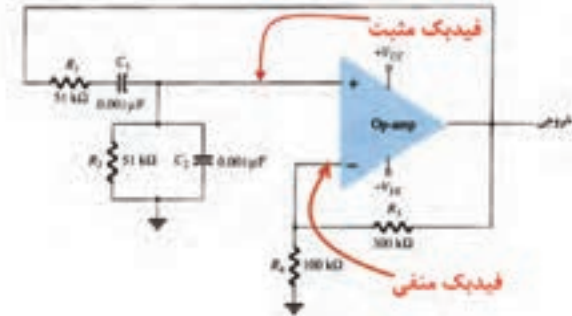


شکل ۱۰-۱۸- بلوک دیاگرام تقویت کننده با فیدبک منفی

شکل ۱۰-۱۸ بلوک دیاگرام تقویت کننده با فیدبک منفی را نشان می دهد.

### ■ کاربرد فیدبک مثبت و منفی در مدارهای الکترونیکی:

یکی از کاربردهای فیدبک مثبت در نوسان سازی است.



شکل ۱۹-۱۰- نوسان ساز پل وین

☑ نوسان ساز پل وین (Wein Bridge Oscillator)

از یک تقویت کننده و شبکه برگشتی RC تشکیل می شود، شکل ۱۹-۱۰. این نوسان ساز یکی از مدارهای الکترونیکی است که همزمان دو فیدبک مثبت و منفی در مدار آن وجود دارد.

☑ فیدبک منفی توسط مقاومت های  $R_3$  و  $R_4$  ایجاد می شود، این مقاومت ها بهره مدار تقویت کننده را نیز تأمین می کنند.

☑ فیدبک مثبت که توسط مدار RC برقرار می شود،

بین سیگنال ورودی و خروجی شبکه برگشتی صفر درجه اختلاف فاز ایجاد می کند و شبکه برگشتی  $\frac{1}{3}$  مرتبه سیگنال ورودی خود را تضعیف می کند.

✓ اگر  $A_V = 3$  باشد، بنا بر اصل بارک هاوزن، نوسان های پایدار به وجود می آید. زیرا حاصل ضرب بهره ولتاژ تقویت کننده ( $A_V$ ) در ضریب بهره ولتاژ مدار فیدبک ( $B_V$ ) برابر یک می شود،  $A_V \times B_V = 3 \times \frac{1}{3} = 1$ .

برای تولید نوسان پایدار در مدار باید سه شرط  $A_V \cdot B_V = 1$  (اصل بارک هاوزن)، فیدبک مثبت و مدار تولید کننده نوسان وجود داشته باشد.



### نقش $R_E$ به عنوان عامل فیدبک منفی

در شکل الف - ۲۰-۱۰ یک تقویت کننده با فیدبک منفی نشان داده شده است.

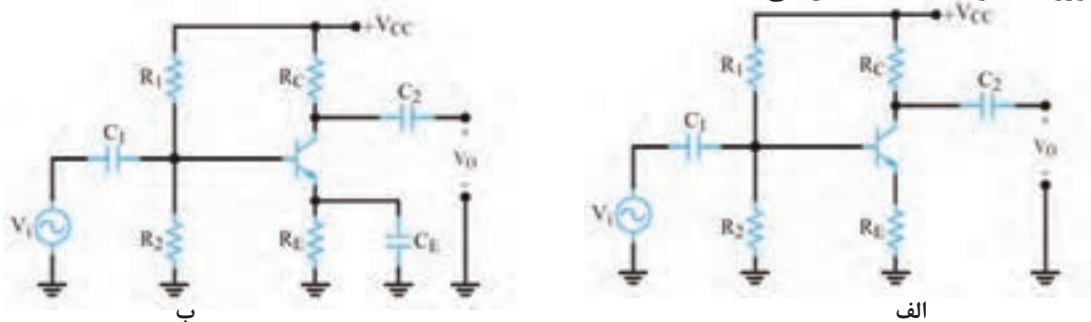
ولتاژ دوسر  $R_E$  همان ولتاژ فیدبک ( $V_f$ ) است. وجود مقاومت  $R_E$  باعث ایجاد فیدبک منفی در مدار می شود و بهره را کاهش می دهد.

توجه داشته باشید که فیدبک منفی، امپدانس ورودی تقویت کننده را افزایش می دهد.

برای خنثی سازی اثر  $R_E$  در سیگنال AC، خازنی را مطابق شکل ب - ۲۰-۱۰ با  $R_E$  موازی می کنند.

این خازن یک خازن بای پاس است که هنگام عبور سیگنال AC به صورت اتصال کوتاه عمل می کند و اثر مقاومت  $R_E$  را از بین می برد و مانع ایجاد فیدبک منفی در حالت AC می شود.

با بای پاس شدن مقاومت  $R_E$ ، فیدبک AC حذف و بهره ولتاژ تقویت کننده افزایش می یابد. همچنین امپدانس ورودی تقویت کننده کاهش می یابد.



شکل ۲۰-۱۰- تقویت کننده با فیدبک منفی



افزایش حرارت و جریان ناشی از مواردی است که تغییر آن باعث جابه جایی نقطه کار می‌شود. در رابطه با نقش  $R_E$  در چگونگی کنترل و پایداری نقطه کار به عنوان فیدبک منفی تحقیق کنید و نتیجه آن را در قالب گزارش به کلاس ارائه دهید.

### محاسبه مقدار ظرفیت خازن بای پاس:

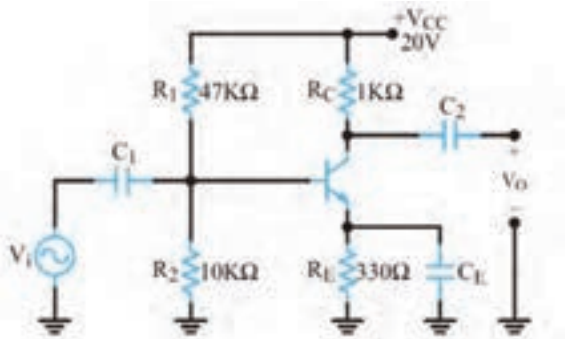
✓ برای آنکه خازن بای پاس بتواند در مقابل سیگنال AC به صورت اتصال کوتاه عمل کند، باید ظرفیت آن را بزرگ انتخاب کنند.

✓ با توجه به این که ممکن است در سیگنال ورودی تقویت کننده طیفی از فرکانس وجود داشته باشد، باید مقدار حداقل ظرفیت خازن بای پاس مورد نیاز به طور دقیق انتخاب شود. بنابراین برای محاسبه مقدار ظرفیت خازن بای پاس، رابطه مقدار راکتانس خازنی ( $X_C$ ) را برای کمترین فرکانس ورودی می‌نویسیم:  $X_C = \frac{1}{2\pi f_{\min} C}$ .

✓ مقدار راکتانس خازنی باید خیلی کوچک تر از  $R_E$  باشد تا بتوان خازن بای پاس را اتصال کوتاه در نظر گرفت.

$$\text{به عبارت دیگر: } X_C \leq \frac{R_E}{10} \quad \text{یا} \quad \frac{1}{2\pi f_{\min} C_E} \leq \frac{R_E}{10}$$

مثال ۲: در تقویت کننده شکل ۲۱-۱۰ اگر فرکانس سیگنال متناوب ورودی از ۵۰۰ هرتز تا ۷ کیلوهرتز تغییر کند، ظرفیت خازن  $C_E$  را چقدر انتخاب کنیم تا  $R_E$  در مقابل سیگنال AC به درستی بای پاس شود؟



شکل ۲۱-۱۰- تقویت کننده

$$\frac{1}{2\pi f_{\min} C_E} \leq \frac{R_E}{10}$$

$$C_E \geq \frac{10}{2\pi f_{\min} R_E}$$

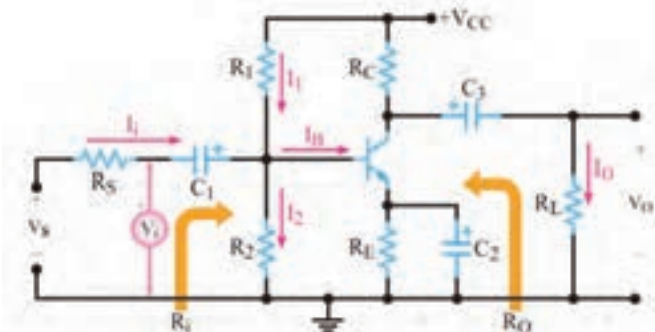
$$C_E \geq \frac{10}{2 \times 3.14 \times 14 \times 500 \times 330}$$

$$C_E \geq 9/65 \mu F$$

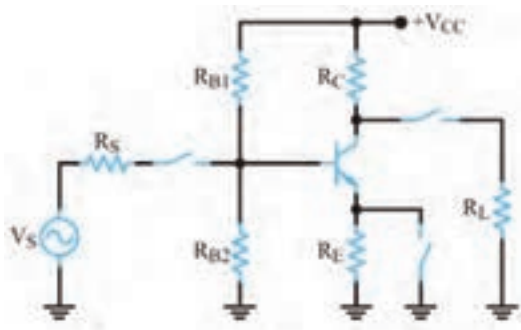
خازن مناسب خازنی است که مقدار ظرفیت آن برابر  $10 \mu F$  یا بزرگ تر باشد.

### ■ تحلیل تقویت کننده امیتر مشترک

✓ تقویت کننده امیتر مشترک، بیشترین کاربرد در انواع تقویت کننده‌ها را دارد. در شکل ۲۲-۱۰ یک تقویت کننده امیتر مشترک با بایاس سرخود را مشاهده می‌کنید.



شکل ۲۲-۱۰- تقویت کننده امیتر مشترک

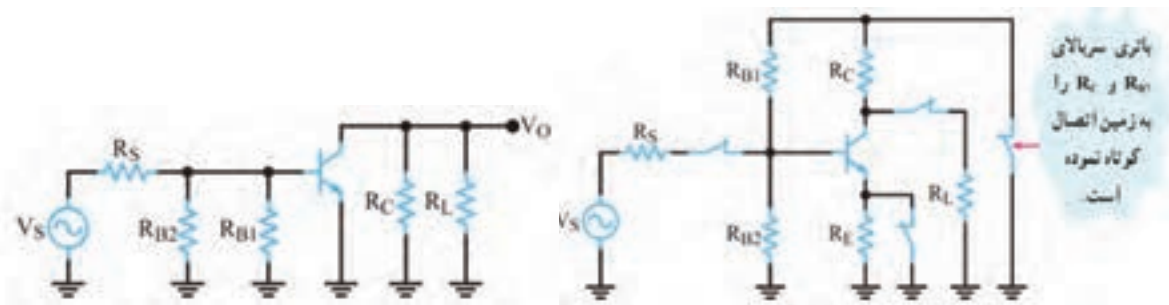


☑ مدار معادل ساده DC و AC تقویت کننده امیتر مشترک: در شکل ۱۰-۲۳ مدار ساده معادل DC تقویت کننده امیتر مشترک و در شکل های ۱۰-۲۴ و ۱۰-۲۵ مدار معادل AC تقویت کننده امیتر مشترک را مشاهده می کنید.

شکل ۱۰-۲۳ مدار معادل DC تقویت کننده امیتر مشترک

- مدار شکل ۱۰-۲۴ را بررسی کنید. به چه دلیل این مدار، مدار معادل AC تقویت کننده امیتر مشترک است؟ نتایج را جمع بندی کنید و به خوبی فرا بگیرید.
- مدار شکل ۱۰-۲۵ را بررسی کنید. به چه دلیل این مدار، مدار معادل AC تقویت کننده امیتر مشترک است؟

بارش فکری



شکل ۱۰-۲۴ مدار معادل ac تقویت کننده امیتر مشترک      شکل ۱۰-۲۵ مدار ساده شده تقویت کننده امیتر مشترک

### ☑ بهره جریان:

در تقویت کننده امیتر مشترک جریان ورودی ترانزیستور، جریان بیس و جریان خروجی ترانزیستور، جریان کلکتور است. همان طور که قبلاً گفته شد، جریان کلکتور، چندین برابر جریان بیس است، بنابراین مدار تقویت کننده امیتر مشترک، جریان را تقویت می کند. نسبت جریان خروجی به جریان ورودی را بهره

جریان می گویند و آن را با حرف  $A_i$  نشان می دهند.

$$A_i = \frac{I_O}{I_i}$$

بهره جریان ترانزیستور در آرایش امیتر مشترک برابر است با:

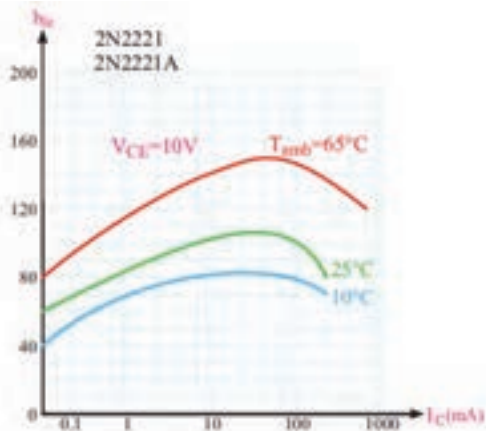
$$A_i = \frac{I_C}{I_B} = \beta$$

حرف  $\beta$  را برای بهره جریان DC به کار می برند. در جریان متناوب، برای به دست آوردن بهره جریان از پارامتر

دیگری به نام  $h_{fe}$  استفاده می شود که مقدار آن از رابطه زیر به دست می آید.

$$h_{fe} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

در بسیاری موارد مقدار  $h_{fe}$  تقریباً با مقدار  $\beta$  برابر می شود.



□  $\beta$  تابعی از جریان، درجه حرارت و مقدار ولتاژ  $V_{CE}$  است. کارخانه‌های سازنده، تغییرات  $h_{fe}$  را برحسب  $I_C$  در اختیار مصرف‌کننده قرار می‌دهند.

□ شکل ۱۰-۲۶ منحنی تغییرات  $h_{fe}$  را برحسب  $I_C$  برای مقادیر  $V_{CE}=10\text{ V}$  در درجه حرارت‌های  $10^\circ\text{C}$ ،  $25^\circ\text{C}$  و  $65^\circ\text{C}$  برای ترانزیستور ۲N۲۲۲۱ نشان می‌دهد.

□ در برگه‌های اطلاعات معمولاً مقدار  $\beta$  را با نام  $h_{fe}$  در جریان DC و دمای خاص ارائه می‌دهند.

شکل ۱۰-۲۶- منحنی تغییرات  $h_{fe}$  برحسب  $I_C$  در سه درجه حرارت

از طریق بارش فکری، رفتار منحنی‌های شکل ۱۰-۲۶ را مورد بررسی قرار دهید و جمع‌بندی کنید. نتیجه جمع‌بندی را به صورت یک گزارش ثبت کنید و به خاطر بسپارید.

بارش فکری



☑ **بهره و ولتاژ:** اگر به ورودی تقویت‌کننده امیتر مشترک ولتاژ متناوبی اعمال کنیم با توجه به محدودیت  $V_{BE}$ ، تغییرات ولتاژ ورودی یعنی تغییرات ولتاژ بیس امیتر محدود و با دامنه کم است. اما ولتاژ متناوب خروجی که همان تغییرات ولتاژ کلکتور امیتر است، دامنه زیادی دارد. لذا تقویت‌کننده امیتر مشترک ولتاژ را نیز تقویت می‌کند و بهره ولتاژ آن زیاد است.

☑ **اختلاف فاز بین ولتاژ ورودی و خروجی:**

□ جریان ورودی و جریان خروجی در تقویت‌کننده امیتر مشترک، هم فازند، زیرا با افزایش جریان بیس (جریان ورودی) جریان کلکتور (جریان خروجی) نیز افزایش می‌یابد.

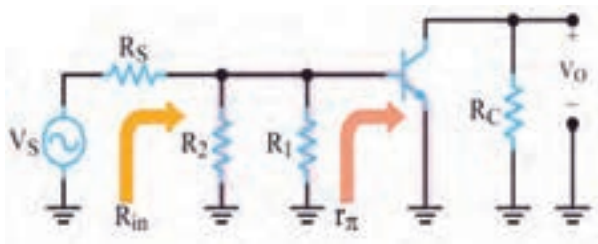
□ اما ولتاژ ورودی و خروجی در تقویت‌کننده امیتر مشترک به اندازه ۱۸۰ درجه با یکدیگر اختلاف فاز دارند. زیرا با افزایش ولتاژ ورودی، جریان خروجی افزایش می‌یابد و مقدار  $V_{CE}$  را که همان ولتاژ خروجی است کاهش می‌دهد.

□ عکس این روند نیز صادق است، یعنی با کاهش ولتاژ ورودی، ولتاژ خروجی افزایش می‌یابد.

☑ **مقاومت ورودی:**

برای تعیین مقاومت ورودی، باید مقادیر جریان و ولتاژ ورودی را داشته باشیم.

□ با توجه به شکل ۱۰-۲۷ جریان ورودی  $I_i$  و ولتاژ ورودی  $V_i$  است. مقاومت ورودی، از تقسیم ولتاژ ورودی



$$R_{in} = \frac{V_i}{I_i}$$

به جریان ورودی به دست می‌آید. به مدار ساده معادل AC تقویت‌کننده شکل ۱۰-۲۸ توجه کنید.

مقاومت ورودی از سه مقاومت موازی  $R_1$ ،  $R_2$  و  $R_{in}$  و مقاومت دیود بیس امیتر ترانزیستور ( $r_{\pi}$ ) تشکیل می‌شود.

$$R_{in} = R_1 \parallel R_2 \parallel r_{\pi}$$

شکل ۱۰-۲۷- مدار ساده معادل ac تقویت‌کننده امیتر مشترک



در صورتی که مقاومت معادل  $R_1$  و  $R_2$  در مقایسه با  $r_{\pi}$  زیاد باشد مقاومت ورودی به سوی مقاومت  $r_{\pi}$  که مقدار آن کوچک است میل می کند.

$$g_m = \frac{I_C}{26mV} = \frac{I_E}{26mV}$$

اگر  $I_E$  یا  $I_C$  ترانزیستور مشخص باشد، هدایت انتقالی ترانزیستور از رابطه  $r_{\pi} = \frac{\beta}{g_m}$  به دست می آید. و  $r_{\pi}$  مقاومت دیود بیس امیتر در حالت AC از رابطه  $r_{\pi} = \frac{\beta}{g_m}$  به دست می آید.

توجه



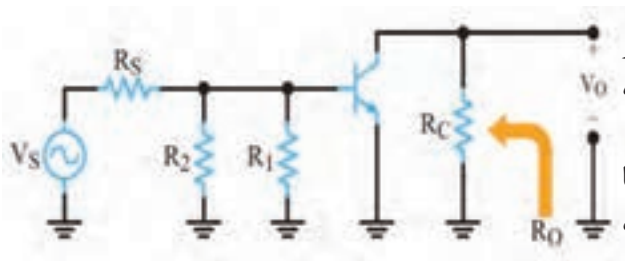
توجه



درباره  $r_{\pi}$  و مقدار آن در مدارهای مختلف تقویت کننده تحقیق کنید و نتیجه را در قالب یک گزارش ارائه دهید.

### مقاومت خروجی:

در شکل ۲۸-۱۰ به مدار ساده معادل AC تقویت کننده امیتر مشترک، از دید خروجی توجه کنید. همان طور که مشاهده می شود مقاومت خروجی از موازی شدن دو مقاومت  $R_C$  و مقاومت داخلی کلکتور امیتر ترانزیستور به دست می آید.



چون دیود کلکتور بیس در بایاس مخالف قرار دارد، بنابراین مقاومتی که از کلکتور امیتر دیده می شود بسیار بزرگ است.

هنگامی که مقاومت بسیار بزرگ کلکتور امیتر با  $R_C$  (بار) موازی می شود، مقاومت معادل (مقاومت خروجی) به سمت مقاومت  $R_C$  میل خواهد کرد.

مقدار مقاومت  $R_C$  در مقایسه با مقاومت کلکتور امیتر در حد متوسط قرار دارد. مقاومت خروجی را با  $R_O$  نمایش می دهند.

شکل ۲۸-۱۰ مدار ساده معادل ac تقویت کننده امیتر مشترک

در رابطه با چگونگی اندازه گیری عملی مقاومت خروجی یک تقویت کننده تحقیق کنید و نتیجه را در قالب یک گزارش ارائه دهید.

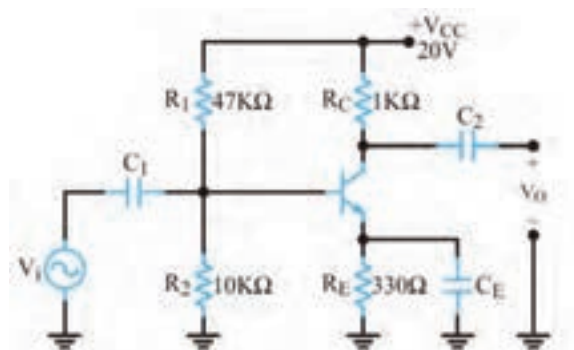
تحقیق کنید



مثال ۳: در تقویت کننده شکل ۲۹-۱۰ با فرض  $\beta = 350$  و  $r_{\pi} = 1k\Omega$  باشد مقادیر  $R_{in}$  و  $R_O$  تقویت کننده را به دست آورید.

$$R_{in} = R_1 \parallel R_2 \parallel r_{\pi} = 47k \parallel 10k \parallel 1k = 891\Omega$$

$$R_O \cong R_C = 1k\Omega$$



شکل ۲۹-۱۰ تقویت کننده امیتر مشترک

## الگوی پرسش:

- ۱- یک نمونه تقویت کننده بیس مشترک و یک نمونه تقویت کننده کلکتور مشترک توسط هنرآموز ارائه می شود و هنرجویان اقدام به ترسیم مدار معادل DC آن می نمایند.
- ۲- در صورتی که در یک نوسان ساز ضریب تقویت ولتاژ برابر ۹ باشد ضریب تقویت شبکه برگشتی چقدر باشد تا مدار به نوسان خود ادامه دهد؟

### ■ بیان بهره یک تقویت کننده بر حسب دسی بل (Decibel):

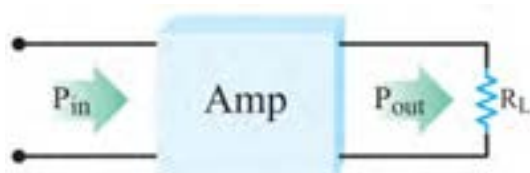
با توجه به مبحث ریاضی خوانده شده درباره لگاریتم، در رابطه با این موضوع که میزان شنوایی گوش انسان با شدت صدا تناسب لگاریتمی دارد، در رسانه های مختلف مرتبط جست و جو کنید و نتایج را پس از جمع آوری به صورت پاورپوینت ارائه دهید.

جست و جو



✓ میزان تقویت کنندگی یک دستگاه تقویت کننده را به صورت لگاریتمی بیان می کنند. به شکل ۱۰-۳۰ که بلوک دیاگرام یک تقویت کننده است توجه کنید.

✓ در این شکل توان داده شده به یک تقویت کننده را برابر  $P_{in}$  و توانی را که از آن گرفته می شود برابر  $P_{out}$



فرض کنیم، طبق تعریف مبنای ده برابر لگاریتم

اعشاری نسبت  $\frac{P_{out}}{P_{in}}$  را ضریب تقویت بر حسب دسی

بل می نامیم. این موضوع با رابطه لگاریتمی زیر بیان می شود.

$$A_p (dB) = 10 \log \frac{P_{out}}{P_{in}}$$

شکل ۱۰-۳۰- بلوک دیاگرام تقویت کننده

مثال ۴: در صورتی که توان وارد شده به شبکه شکل ۱۰-۳۱ برابر یک وات و توان دریافتی از آن مساوی ۲ وات باشد، بهره قدرت این تقویت کننده چند دسی بل می شود؟

پاسخ: ابتدا  $A_p$  را محاسبه می کنیم.

$$A_p = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{2W}{1W} = 2 \text{ مرتبه}$$

مقدار  $A_p$  را در رابطه لگاریتمی دسی بل قرار می دهیم.

$$A_p (db) = 10 \log \frac{P_{out}}{P_{in}} = 10 \log A_p$$

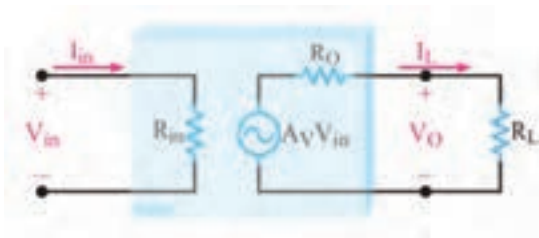
$$A_p (db) = 10 \log 2$$

$\log 2 = 0.30103$  است که برای سادگی محاسبات آن را برابر با  $0.3$  در نظر می گیریم و مقدار  $A_p$  را بر حسب دسی بل محاسبه می کنیم.

در رابطه با چگونگی محاسبه ضریب تقویت توان بر حسب بهره ولتاژ تحقیق کنید و نتیجه را در قالب گزارش ارائه دهید.

تحقیق کنید





شکل ۱۰-۳۱- مدل الکتریکی تقویت کننده

**راهنمایی:** هر تقویت کننده با ضریب بهره ولتاژ  $A_v$  را می توان از درگاه ورودی معادل  $R_{in}$  و از درگاه خروجی معادل یک منبع ولتاژ و یک مقاومت سری با منبع در نظر گرفت که همان معادل تونن است. در این مدارها بهره توان برحسب dB را می توان براساس ولتاژ ورودی و خروجی شبکه بیان نمود. شکل ۱۰-۳۱ مدل الکتریکی یک تقویت کننده را نشان می دهد.

### ■ پاسخ فرکانسی تقویت کننده ها

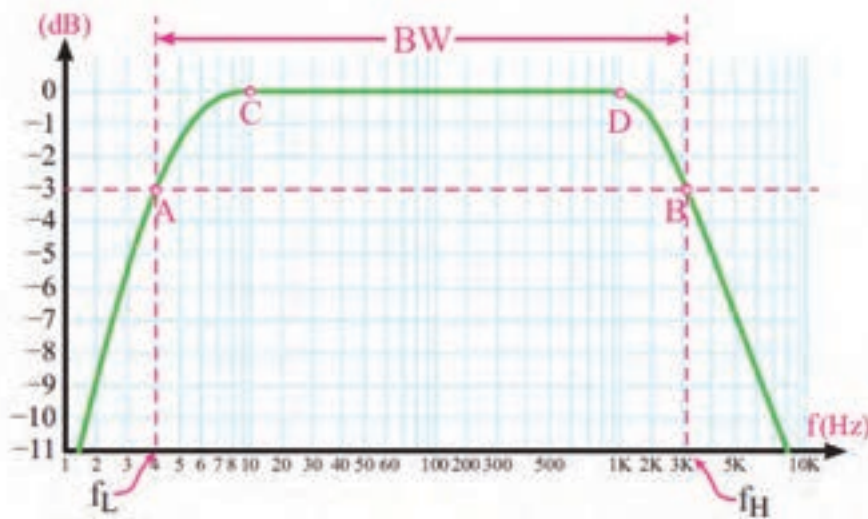
اگر ولتاژ ورودی یک تقویت کننده را سیگنالی با فرکانس ثابت، به صورت  $V_i = V_m \sin \omega t$  در نظر بگیریم با چنین فرضی، شکل ولتاژ ظاهر شده در خروجی آن نیز شبیه شکل موج ورودی و تنها با دامنه ای متفاوت با آن است.



شکل ۱۰-۳۲- مدل بلوکی تقویت کننده

یعنی:  $v_o = V'_m \sin \omega t$  که در آن  $V'_m = A_v V_m$  است.

شکل ۱۰-۳۲ نمای بلوکی تقویت کننده و ولتاژ ورودی و خروجی آن را نشان می دهد. در شکل ۱۰-۳۳ منحنی پاسخ فرکانسی یک تقویت کننده رسم شده است. در این شکل بهره تقویت کننده، در حالت انتقال بدون تضعیف برابر با یک فرض شده است. منحنی از دو ناحیه کاملاً متفاوت تشکیل می شود.



شکل ۱۰-۳۳- منحنی پاسخ فرکانسی یک تقویت کننده نمونه

ناحیه CD که کلیه فرکانس های واقع در این محدوده به یک نسبت تقویت می شوند. در نواحی سمت چپ نقطه C و سمت راست نقطه D میزان تقویت کاهش می یابد و سیر نزولی را طی می کند.

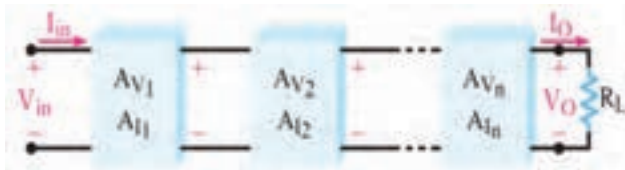
### الگوی پرسش:

- ۱- انواع فیدبک را نام ببرید. مقاومت امیتر در تقویت کننده امیتر مشترک چه نوع فیدبکی است؟ چرا؟
- ۲- در صورتی که مقاومت امیتر یک تقویت کننده ۲۲۰ اهم و فرکانس مدار از ۱۰۰۰ هرتز تا ۱۰۰۰۰ هرتز تغییر کند، خازن بای پاس مناسب را برای آن محاسبه کنید.
- ۳- تفاوت خازن بای پاس و کوپلاژ و نقش آنها را در تقویت کننده شرح دهید.

☑ **تعریف باند مفید و فرکانس قطع:** محدوده‌ای از طیف فرکانس در تقویت کننده که در آن ضریب تقویت، تغییر محسوسی نمی کند را باند مفید فرکانس آن تقویت کننده می نامند.  
 در شکل ۱۰-۳۳ این باند بین دو نقطه A و B واقع شده است. فرکانس متناظر با نقطه A را فرکانس قطع پایین و فرکانس متناظر با نقطه B را فرکانس قطع بالای تقویت کننده می گوئیم.  
 طبق تعریف، فرکانس قطع به فرکانسی گفته می شود که در آن بهره تقویت کننده به نصف مقدار طبیعی خود کاهش می یابد؛ به عبارت دیگر ۳dB افت می کند.

### ۱۰-۳- تقویت کننده های چند طبقه

اگر n طبقه تقویت کننده با بهره ولتاژ  $A_{V1}, A_{V2}, \dots, A_{Vn}$  و بهره جریان  $A_{i1}, A_{i2}, \dots, A_{in}$  طبق شکل ۱۰-۳۴ پشت سر هم قرار گیرند، یک تقویت کننده n طبقه به دست می آید.  
 ☑ با توجه به اختلاف بین سیگنال های ورودی و خروجی تقویت کننده ها، بهره ولتاژ و بهره جریان کل تقویت کننده از روابط زیر محاسبه می شود.



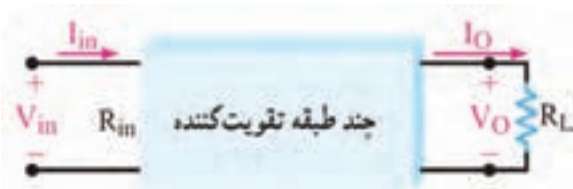
شکل ۱۰-۳۴- بلوک دیاگرام n طبقه تقویت کننده

$$A_{VT} = \frac{V_o}{V_{in}} = \pm A_{V1} A_{V2} \dots A_{Vn}$$

$$A_{IT} = \frac{I_o}{I_{in}} = \pm A_{i1} A_{i2} \dots A_{in}$$

☑ در رابطه بهره ولتاژ کل ( $A_{VT}$ )، علامت (+) به معنی هم فاز بودن  $V_o$  با  $V_{in}$  و علامت (-) به معنی وجود ۱۸۰ درجه اختلاف فاز بین  $V_o$  و  $V_{in}$  است. در رابطه بهره جریان کل ( $A_{IT}$ )، علامت های  $\pm$  نیز همین مفهوم را دارند.

☑ باید توجه داشت که در شکل ۱۰-۳۴ بهره ولتاژ ( $A_V$ ) و بهره جریان ( $A_I$ ) برای هر طبقه در شرایطی در نظر گرفته شده است که همه طبقات به هم اتصال دارند به عبارت دیگر،  $A_V$  و  $A_I$  بیانگر میزان تقویت هر طبقه به طور مستقل نیست. بهره توان کل از حاصل ضرب بهره ولتاژ و بهره جریان به دست می آید.



شکل ۱۰-۳۵- نمایش چند طبقه تقویت کننده در یک بلوک کلی

$$A_{PT} = A_{VT} \times A_{IT}$$

✓ برای اثبات رابطه بهره توان کل می‌توان دیگرام چند طبقه تقویت کننده را به صورت یک بلوک کلی مانند شکل ۱۰-۳۵ در نظر گرفت.

در بلوک شکل ۱۰-۳۵ بهره توان کل از رابطه روبه‌رو به دست می‌آید:

$$A_P = \frac{P_O}{P_{in}}$$

✓ از آنجایی که  $P_O = R_L I_O^2$  و  $P_{in} = R_{in} I_{in}^2$  است، می‌توان نوشت:

$$A_P = \frac{P_O}{P_{in}} = \frac{R_L I_O^2}{R_{in} I_{in}^2} = \frac{R_L I_O}{R_{in} I_{in}} \times \frac{I_O}{I_{in}}$$

✓ به جای مقادیر  $R_L I_O$  و  $R_{in} I_{in}$  مقادیر معادل آن یعنی  $V_o$  و  $V_{in}$  را قرار می‌دهیم.

$$A_P = \frac{V_o}{V_{in}} \times \frac{I_o}{I_{in}}$$

✓ اگر در این معادله به جای  $\frac{I_o}{I_{in}}$  و  $\frac{V_o}{V_{in}}$ ،  $A_{VT}$  و  $A_{IT}$  قرار داده شود رابطه بهره توان کل به صورت  $A_P = A_{VT} \times A_{IT}$  به دست می‌آید.

با مراجعه به منابع مختلف و سایت‌های اینترنتی تحقیق کنید که به چه دلیل میزان بهره طبقات تقویت کننده به صورت جداگانه و متصل به هم تفاوت دارد. نتیجه تحقیق خود را به کلاس ارائه دهید.

تحقیق کنید



**مثال ۵:** با توجه به شکل ۱۰-۳۶ اگر  $V_{in}$  برابر  $1\text{mV}$  باشد  $V_{o1}$  و  $V_{o2}$  و  $A_{v1}$  را محاسبه کنید.

**پاسخ:** بهره ولتاژ طبقه اول از رابطه  $A_{v1} = \frac{V_{o1}}{V_{in1}}$  به دست می‌آید. لذا  $V_{o1} = A_{v1} \times V_{in1}$  است. به جای  $A_{v1}$  و  $V_{in1}$  عدد گذاری می‌کنیم:

$$V_{o1} = (-40)(1\text{mV}) = -40\text{mV}$$

✓ علامت (-) نشان می‌دهد که  $V_{o1}$  با  $V_{in}$  به اندازه  $180^\circ$  اختلاف فاز دارد. بهره ولتاژ طبقه دوم از رابطه  $A_{v2} = \frac{V_{o2}}{V_{in2}}$  به دست می‌آید. رابطه را به صورت  $V_{o2} = A_{v2} \times A_{in2}$  می‌نویسیم. چون  $V_{o1}$  برابر  $V_{in2}$  است به جای  $V_{in2}$  مقدار عددی  $V_{o1}$  را قرار می‌دهیم:

$$V_{o2} = (-40)(-50) = 2000\text{mV}$$



شکل ۱۰-۳۶- بلوک دیگرام دو طبقه تقویت کننده

✓ مقدار  $A_{VT}$  را از مقادیر  $V_{in}$  و  $V_{o2}$  محاسبه می‌کنیم.

$$A_{VT} = \frac{V_{o2}}{V_{in}} = \frac{2000}{1} = 2000 \text{ مرتبه}$$

✓ مقدار  $A_{VT}$  را از رابطه  $A_{VT} = A_{v1} \times A_{v2}$  نیز می‌توان محاسبه نمود.

$$A_{VT} = (-40)(-50) = 2000 \text{ مرتبه}$$

✓ همان‌طور که مشاهده می‌شود  $A_{VT}$  علامت مثبت دارد یعنی ولتاژ خروجی با ولتاژ ورودی هم فاز است. **تمرین:** اگر  $A_{v1}$  برابر  $+20$  و  $A_{v2}$  برابر  $-10$  باشد  $A_{VT}$  را محاسبه کنید.

### الگوی پرسش:

۱- در صورتی که در یک تقویت کننده سه طبقه، بهره ولتاژ طبقه اول ۵، بهره ولتاژ طبقه دوم ۱۰ و بهره ولتاژ طبقه سوم ۱۲ باشد مقدار  $A_{VT}$  را محاسبه کنید.

۲- در صورتی که به ورودی تقویت کننده سؤال ۱ ولتاژی با دامنه ۰/۵ میلی ولت بدهیم، ولتاژ خروجی تقویت کننده را محاسبه کنید.

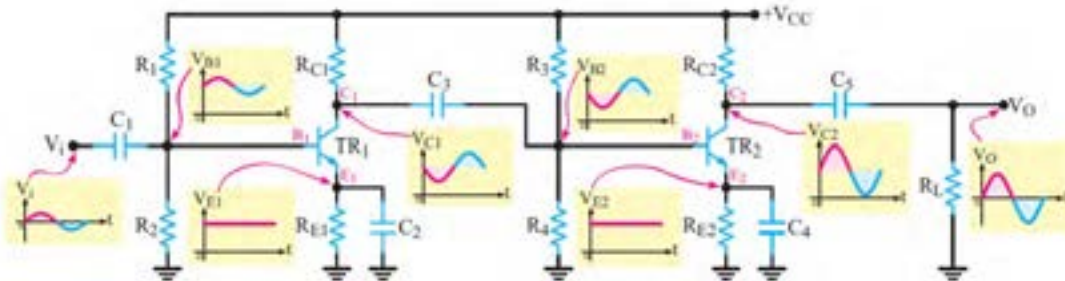
۳- فرمول بهره توان برحسب دسی بل را بنویسید. اگر  $P_{in} = 10\text{ mW}$  و  $P_o = 10\text{ W}$  باشد، مقدار بهره توان را برحسب دسی بل محاسبه کنید.

### ■ اتصال تقویت کننده‌ها به یکدیگر

برای انتقال سیگنال از یک طبقه تقویت کننده به طبقه دیگر باید دو طبقه را به یکدیگر اتصال دهیم. چگونگی اتصال دو طبقه تقویت کننده را به یکدیگر کوپلاژ (Coupling) می‌گویند. اتصال بین طبقات به وسیله خازن، ترانسفورماتور یا به طور مستقیم امکان پذیر است. از این رو سه نوع کوپلاژ خازنی، ترانسفورماتوری و مستقیم تعریف می‌شود.

### ■ محاسبات امپدانس در کوپلاژ خازنی

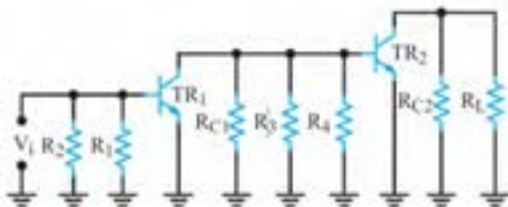
☑ اگر دو یا چند طبقه تقویت کننده را به وسیله یک یا چند خازن به یکدیگر وصل کنیم می‌گوییم کوپلاژ بین طبقات تقویت کننده به صورت خازنی است. تقویت کننده دو طبقه با کوپلاژ خازنی و شکل موج نقاط مختلف آن در شکل ۳۷-۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۳۷-۱۰ تقویت کننده دو طبقه با کوپلاژ خازنی

### ☑ مدار معادل AC تقویت کننده با کوپلاژ خازنی:

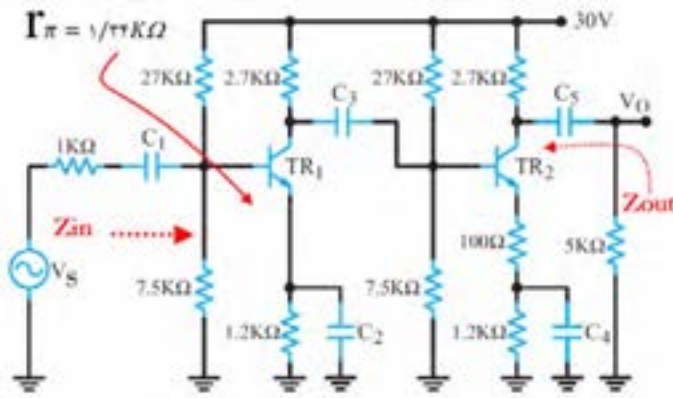
در رسم مدار معادل AC، کلیه خازن‌های مدار را به صورت اتصال کوتاه در نظر می‌گیریم و منبع تغذیه  $+V_{CC}$  را به زمین الکتریکی وصل می‌کنیم. بنابراین مدار معادل AC تقویت کننده ۳۷-۱۰ به صورت شکل ۳۸-۱۰ می‌آید. همان طور که مشاهده می‌شود در مدار معادل AC این تقویت کننده، مقاومت‌های بایاس  $R_1$  و  $R_2$  هم چنین  $R_3$  و  $R_4$  با هم به صورت موازی در می‌آیند. در ضمن مقاومت بار ( $R_L$ ) با مقاومت  $R_{C2}$



شکل ۳۸-۱۰ مدل ac تقویت کننده دو طبقه با کوپلاژ خازنی

به صورت موازی دیده می‌شود. توجه داشته باشید که مقاومت‌های بایاس  $R_3$  و  $R_4$  به عنوان مقاومت بار  $R_L$  با مقاومت  $R_{C1}$  به صورت موازی بسته شده است. به نظر می‌رسد که در این مدار منبع تغذیه وجود ندارد اما توجه داشته باشید که ترانزیستورها به عنوان یک منبع تغذیه وابسته عمل می‌کنند.

### ☑ محاسبه کمیت های $Z_{in}$ و $Z_{out}$ تقویت کننده دو طبقه با کویلاژ خازنی



شکل ۳۹-۱۰. تقویت کننده دو طبقه با کویلاژ خازنی

امپدانس ورودی تقویت کننده دو طبقه همان امپدانس ورودی طبقه اول است که را بطة آن برابر است با:

$$Z_{in} = R_1 \parallel R_2 \parallel r_{\pi 1}$$

امپدانس خروجی تقویت کننده از موازی شدن دو مقاومت  $R_{C2}$  و مقاومت داخلی کلکتور امیتر ترانزیستور دوم به دست می آید. مقاومتی که از کلکتور امیتر ترانزیستور دوم دیده می شود بسیار بزرگ است. هنگامی که مقاومت بسیار

بزرگ کلکتور امیتر با  $R_{C2}$  موازی می شود مقاومت معادل (مقاومت خروجی) به سمت مقاومت  $R_{C2}$  میل خواهد کرد.  $Z_{out} \cong R_{C2}$

مثال ۶: در تقویت کننده دو طبقه با کویلاژ خازنی شکل ۳۹-۱۰ امپدانس ورودی و خروجی را به دست آورید.

$$Z_{in} = R_1 \parallel R_2 \parallel r_{\pi 1}$$

$$Z_{in} = 27k \parallel 7.5k \parallel 1.34k \cong 1.1k\Omega$$

$$Z_{out} \cong R_{C2} = 2.7k\Omega$$

### ۴-۱۰ - کاربرد فیلتر و تقویت کننده در نوسان سازها

■ در مورد انواع نوسان سازها و بخش های تشکیل دهنده مدار یک نوسان ساز و چگونگی ایجاد نوسان در پایه یازدهم توضیح لازم داده شد. در این واحد یادگیری، هدف بررسی نوع فیلتر در مدار نوسان ساز و فرمول تعیین فرکانس مدار و چگونگی محاسبه فرکانس در نوسان ساز است.

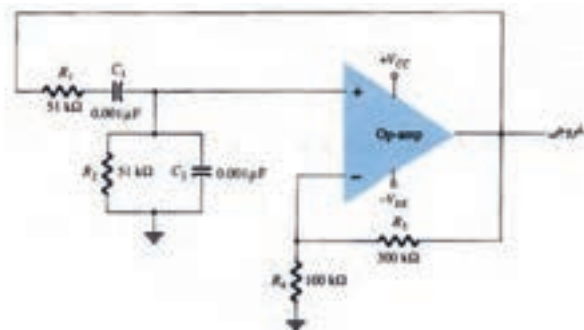
#### ☑ کاربرد فیلتر و تقویت کننده در نوسان ساز RC (پل وین)

□ در مورد مدار فیدبک در مدار نوسان ساز پل وین که از نوع نوسان سازهای RC است، قبلاً توضیح داده شد. در این قسمت به محاسبه فرکانس نوسان مدار می پردازیم.

در مورد عملکرد مدار نوسان ساز پل وین تحقیق کنید و نتیجه را در قالب یک گزارش به صورت پاورپوینت ارائه دهید.

پژوهش





شکل ۴۰-۱۰- نوسان ساز پل وین

□ محاسبه فرکانس در نوسان ساز پل وین

مثال ۷: در مدار نوسان ساز پل وین شکل ۴۰-۱۰، فرکانس نوسان ساز را محاسبه کنید.

پاسخ:

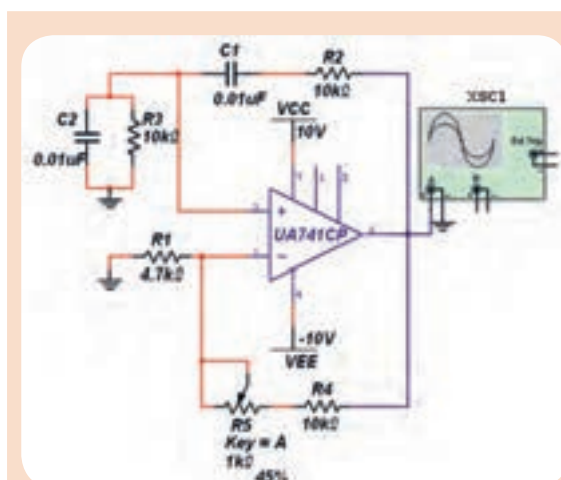
در مدار نوسان ساز پل وین، اگر  $R_1=R_2=R$  و

$C_1=C_2=C$  باشد، فرکانس از رابطه  $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$  محاسبه می شود.

با جایگزینی مقادیر  $R$  و  $C$  در رابطه  $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ ، فرکانس نوسان را به دست می آوریم.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$f_0 = 3122.27 \text{ Hz} = 3.12 \text{ KHz}$$



شکل ۴۱-۱۰- نوسان ساز پل وین

مدار نوسان ساز پل وین شکل ۴۱-۱۰ را در نرم افزار مولتی سیم یا هر نرم افزار مناسب دیگر ببندید.

۱- دامنه موج خروجی آن را توسط دستگاه اسیلوسکوپ اندازه بگیرید. فرکانس نوسان ها را به دست آورید.

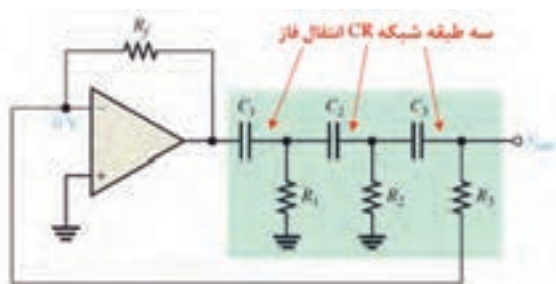
۲- فرکانس نوسان ساز پل وین از چه رابطه ای به دست می آید؟ رابطه را بنویسید.

۳- آیا فرکانس محاسبه شده با فرکانس اندازه گیری شده در مدار شکل ۴۱-۱۰ برابر است؟ در صورت اختلاف، علت را توضیح دهید.

### □ کاربرد فیلتر و تقویت کننده در نوسان ساز انتقال فاز

□ یک نمونه مدار نوسان ساز انتقال فاز در شکل ۴۲-۱۰ نشان داده شده است. در مسیر فیدبک مدار از سه طبقه شبکه RC انتقال فاز ۱۸۰ درجه برای تهیه فیدبک مثبت استفاده شده است.

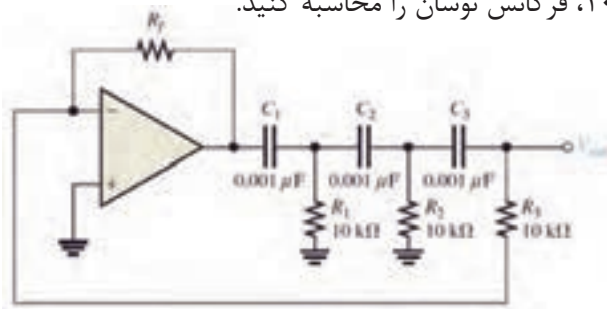
□ ضریب تضعیف شبکه RC،  $B_V = \frac{1}{29}$  است برای پایداری نوسان و برقراری اصل بارک هاوزن باید ضریب بهره تقویت کننده آن  $A_V = 29$  باشد. فرکانس نوسان از رابطه  $f_0 = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{6}}$  قابل محاسبه است.



شکل ۴۲-۱۰- نوسان ساز انتقال فاز



**مثال ۸:** در مدار نوسان ساز انتقال فاز شکل ۴۳-۱۰، فرکانس نوسان را محاسبه کنید.



شکل ۴۳-۱۰- نوسان ساز انتقال فاز

$$f_o = \frac{1}{2\pi RC\sqrt{6}}$$

$$f_o = \frac{1}{2 \times 3 / 14 \times 10 \times 10^3 \times 10 \times 10^{-9} \sqrt{6}}$$

$$f_o = 6499 / 41 \text{ Hz} = 6 / 49 \text{ KHz}$$

مدار نوسان ساز انتقال فاز را در نرم افزار ببینید و فرکانس نوسان آن را اندازه گیری کنید و با نتایج محاسبه شده مقایسه کنید.

فعالیت نرم افزاری



☑ نوسان ساز با شبکه فیدبک ترانسفورماتوری (آرمسترانگ - Armstrong) :

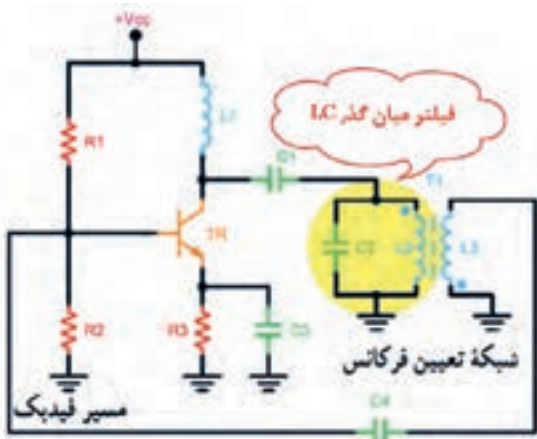
□ در این مدار عمل فیدبک از طریق یک ترانسفورماتور صورت می گیرد. این نوع مدار نوسان ساز را مدار Armstrong می نامند.

□ در شکل ۴۴-۱۰ مدار کلی نوسان ساز آرمسترانگ را مشاهده می کنید. مقدار فرکانس رزونانس مدار از رابطه  $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}}$  محاسبه می شود. در این رابطه:

فرکانس نوسان آسیلاتور بر حسب هرتز =  $f_r$

ضریب خود القا بر حسب هانری =  $L$

مقدار ظرفیت خازن بر حسب فاراد =  $C$



شکل ۴۴-۱۰- نوسان ساز آرمسترانگ

**مثال ۹:** در مدار نوسان ساز آرمسترانگ شکل ۴۴-۱۰ مقدار  $L_r = 58 / 6 \mu\text{H}$  و  $C_r = 300 \text{ pF}$  است، فرکانس رزونانس مدار چقدر است؟

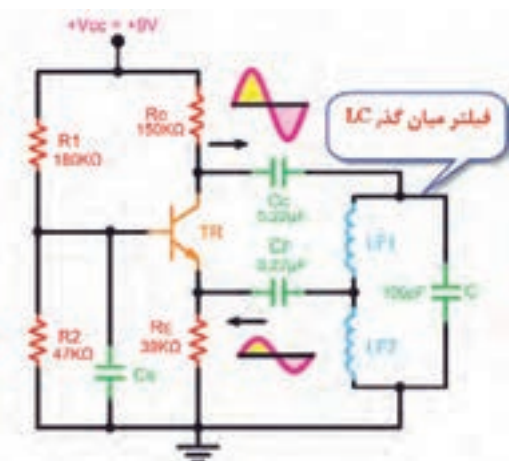
$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}}$$

$$f_r = \frac{1}{2 \times 3 / 14 \sqrt{300 \times 10^{-12} \times 58 / 6 \times 10^{-6}}}$$

$$f_r = 2 / 3 \text{ MHz}$$

☑ نوسان ساز هارتلی (Hartly) :

□ در این نوسان ساز، ولتاژ فیدبک از طریق تقسیم ولتاژ روی سلف تأمین می شود. این نوسان ساز در فرکانس های بالا بهتر عمل می کند. شکل ۴۵-۱۰ فیلتر میان گذر LC و تقویت کننده بیس مشترک را در نوسان ساز هارتلی نشان می دهد.



شکل ۴۵-۱۰- نوسان ساز هارتلی

### چگونگی محاسبه فرکانس رزونانس مدار:

فرکانس تولید شده توسط نوسان ساز از رابطه  $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{eq}C}}$  به دست می آید. در این رابطه:

ضریب خود القایی معادل  $L_{eq}$ ، ضریب القای متقابل  $L_m$ ،  $L_{F_1}$  و  $L_{F_2}$  ضریب خود القایی هر سیم پیچ بر حسب هانری

هستند. مقدار  $L_m$  از رابطه  $L_m = K\sqrt{L_{F_1}L_{F_2}}$  قابل محاسبه است. در این رابطه:

ضریب القای متقابل بر حسب هانری  $L_m =$  ضریب کولپلاژ بین دو سیم پیچ است و  $K = \frac{\phi_2}{\phi_1}$

$\phi_2$  شار مغناطیسی سیم پیچ دوم و  $\phi_1$  شار مغناطیسی سیم پیچ اول هستند.

مثال ۱۰: در مدار نوسان ساز هار تلی شکل ۱۰-۴۵ اگر  $L_{F_1} = 100 \mu H$ ،  $L_{F_2} = 100 \mu H$ ،  $L_m = 20 \mu H$  و  $C = 20 pF$  باشد، فرکانس رزونانس را به دست آورید.

$$L_{eq} = L_{F_1} + L_{F_2} + 2L_m$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{eq}C}}$$

$$L_{eq} = 100 + 100 + (2 \times 20) = 140 \mu H$$

$$f_r = \frac{1}{2 \times 3.14 \sqrt{140 \times 10^{-6} \times 20 \times 10^{-12}}}$$

$$f_r = 1.05 MHz$$

### ☑ نوسان ساز کول پیتس (Colpitts):

□ در صورتی که فیدبک مدار از طریق تقسیم ولتاژ توسط خازن صورت گیرد، مدار نوسان ساز را کول پیتس (Colpitts) می نامند.

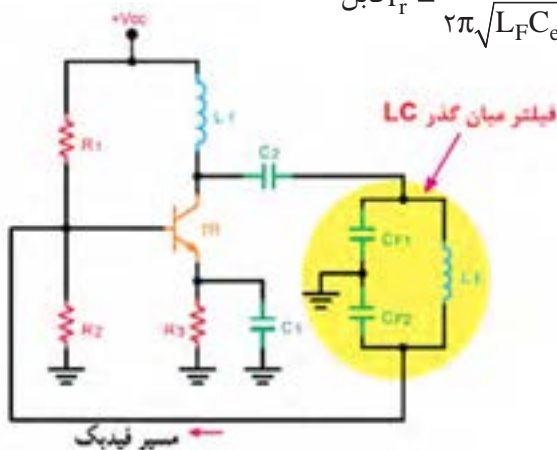
□ در شکل ۱۰-۴۶ یک نمونه مدار نوسان ساز کول پیتس ترسیم شده است. مدار تقویت کننده این نوسان ساز از نوع امیتر مشترک است.

□ مدار تعیین کننده فرکانس مجموعه خازن های  $C_{F1}$  و  $C_{F2}$  و سیم پیچ  $L_F$  است که یک فیلتر میان گذر LC را تشکیل می دهند.

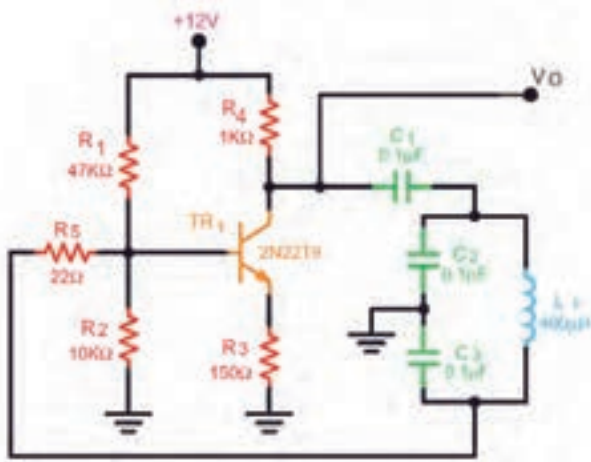
□ مقدار فرکانس نوسان ساز کول پیتس از رابطه  $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_F C_{eq}}}$  قابل محاسبه است. در این رابطه:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_{F1}} + \frac{1}{C_{F2}} \rightarrow C_{eq} = \frac{C_{F1}C_{F2}}{C_{F1} + C_{F2}}$$

فرکانس نوسان ساز بر حسب هرتز  $f_r =$  مقدار اندوکتانس بر حسب هانری  $L_F =$  مقدار ظرفیت معادل بر حسب فاراد  $C_{eq}$  است.



شکل ۱۰-۴۶- نوسان ساز کول پیتس



شکل ۱۰-۴۷- نوسان ساز کول پیتس

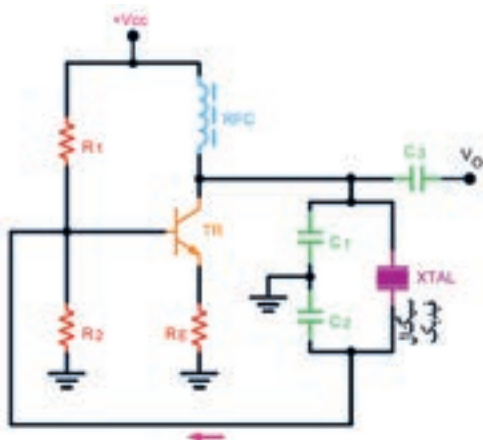
مثال ۱۱: فرکانس نوسان ساز شکل ۱۰-۴۷ را محاسبه کنید.

$$C_{eq} = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2}$$

$$C_{eq} = \frac{0.1 \times 0.1}{0.1 + 0.1} = 0.05 \mu F$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 C_{eq}}}$$

$$f_r = \frac{1}{2 \times 3.14 \sqrt{400 \times 10^{-6} \times 50 \times 10^{-9}}} = 35612 / 53 \text{ Hz}$$



شکل ۱۰-۴۸- نوسان ساز کریستالی

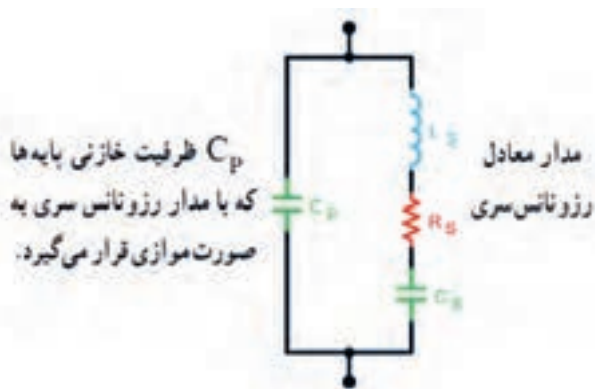
☑ نوسان ساز کریستالی (Crystal Oscillator):

□ عواملی نظیر درجه حرارت، تغییرات ولتاژ و سایر کمیت‌ها می‌تواند فرکانس نوسان را در یک نوسان ساز تغییر دهد. لذا برای پایداری فرکانس از نوسان ساز کریستالی استفاده می‌کنند.

□ هر قطعه کریستال با توجه به برش و شکل مکانیکی آن می‌تواند در یک فرکانس کاملاً ثابت به ارتعاش درآید. □ در نوسان ساز کریستالی، کریستال در مدار تعیین فرکانس یا در مسیر فیدبک قرار می‌گیرد و فقط به فرکانس رزونانس خود اجازه عبور می‌دهد.

□ شکل ۱۰-۴۸ یک نوسان ساز کریستالی که کریستال در مدار تعیین فرکانس قرار گرفته است را نشان می‌دهد. □ فرکانس رزونانس نوسان ساز کریستالی با توجه به مدار معادل کریستال کوارتز شکل ۱۰-۴۹ با تقریب قابل قبول از رابطه  $f_r \cong \frac{1}{2\pi \sqrt{L_s C_t}}$  محاسبه می‌شود.

در این رابطه،  $C_t$  ظرفیت خازن معادل مدار تعیین کننده فرکانس است.



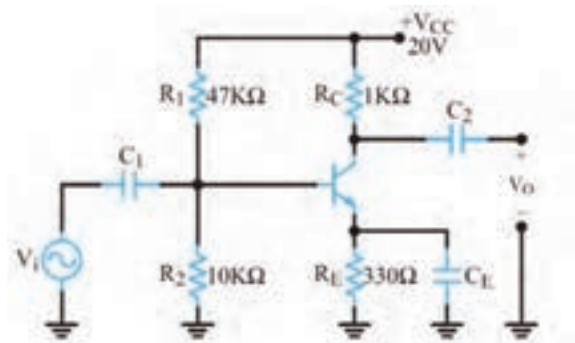
شکل ۱۰-۴۹- مدار معادل کریستال کوارتز

**مثال ۱۲:** در مدار نوسان ساز کریستالی شکل ۱۰-۵۰ چنانچه ظرفیت خازن معادل ( $C_t$ ) برابر ۱۰ نانو فاراد، و ضریب خودالقایی در کریستال ۰/۱ میلی هانری باشد، فرکانس رزونانس نوسان ساز را به دست آورید.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_t}} \Rightarrow f_r = \frac{1}{2 \times 3.14 \sqrt{0.1 \times 10^{-3} \times 10 \times 10^{-9}}} \Rightarrow f_r = 159235.6 \text{ Hz} = 159.235 \text{ KHz}$$

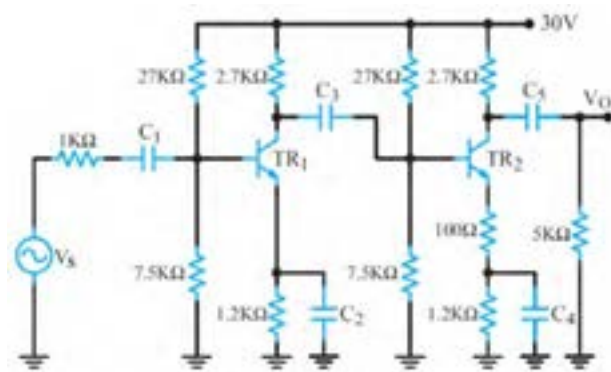
### آزمون نظری پایان واحد یادگیری

- در تقویت کننده شکل ۱۰-۵۰ اگر حداقل فرکانس سیگنال ورودی ( $V_{in}$ ) ۲۰۰ هرتز و  $r_{\pi} \approx 1 \text{ k}\Omega$  باشد، مطلوب است:  
الف) ظرفیت خازن بای پس  $C_E$   
ب) مقاومت ورودی تقویت کننده
- نقش  $R_E$  به عنوان فیدبک منفی را شرح دهید.



شکل ۱۰-۵۰- تقویت کننده امیتر مشترک

۳- در مدار شکل ۱۰-۵۱ خازن های کوپلاژ و بای پاس را مشخص کنید.



شکل ۱۰-۵۱

- مدل DC و AC تقویت کننده شکل ۱۰-۵۱ را رسم کنید.
- انواع فید بک در مدارهای پل وین و انتقال فاز و کول پیترس را رسم کنید و رابطه فرکانس هر یک را بنویسید.
- اگر در نوسان ساز کول پیترس خازن معادل  $100 \text{ pF}$  ظرفیت داشته باشد و  $L = 1 \mu\text{H}$  باشد، مقدار فرکانس نوسان را محاسبه کنید.
- در تقویت کننده دو طبقه با کوپلاژ خازنی شکل ۱۰-۵۱ با فرض  $V_{BE} = 0.7 \text{ V}$  و  $\beta = 100$ ، مقدار مقاومت دیود بیس امیتر ترانزیستور طبقه اول ( $r_{\pi 1}$ ) را محاسبه کنید.
- امپدانس ورودی و خروجی تقویت کننده دو طبقه شکل ۱۰-۵۱ را به دست آورید.

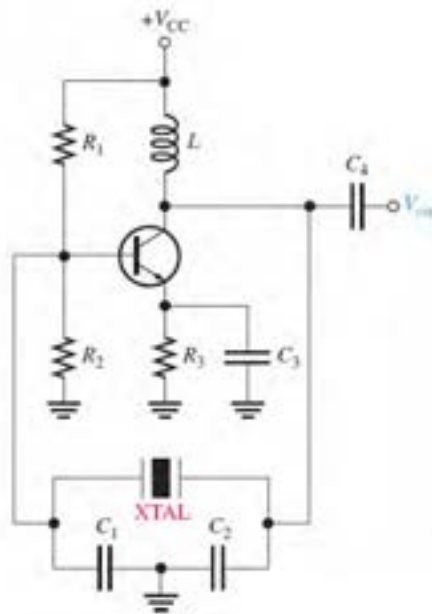
۹- فرکانس رزونانس یک نوسان ساز پل وین را با مقاومت‌های  $R=10\text{ k}\Omega$  و خازن‌های  $C=47\text{ nF}$  محاسبه کنید.

۱۰- در شبکه RC یک نوسان ساز انتقال فاز، مقدار مقاومت‌ها  $R=22\text{ k}\Omega$  و خازن‌ها  $C=10\text{ nF}$  است فرکانس رزونانس نوسان ساز را محاسبه کنید.

۱۱- فرکانس سیگنال خروجی نوسان ساز هارتلی را برای مقادیر زیر محاسبه کنید.

$$C_F=250\text{ pF} \text{ و } L_m=0.5\text{ mH}, L_{F2}=1/5\text{ mH}, L_{F1}=1/5\text{ mH}$$

۱۲- در مدار نوسان ساز کریستالی شکل ۱۰-۵۲ چنانچه ظرفیت خازن معادل  $C_t$  برابر با ۴۰ نانو فاراد و ضریب خودالقایی کریستال ۱۰ میلی هانری باشد، فرکانس رزونانس نوسان ساز را به دست آورید.



شکل ۱۰-۵۲- نوسان ساز کریستالی

## ارزشیابی واحد یادگیری ۱۰: کسب شایستگی در تحلیل مدار معادل AC تقویت کننده‌های یک طبقه و دو طبقه

### شرح کار:

۱- شرح مدار معادل خازن در مدارهای DC و AC ۲- شرح مدار معادل سلف در مدار DC و AC ۳- تشریح نقش خازن بای پاس، محاسبه ظرفیت خازن بای پاس در مدار CE ۴- شرح چگونگی ترسیم مدار معادل AC تقویت کننده امیتر مشترک ۵- تشریح منحنی پاسخ فرکانسی و پهنای باند تقویت کننده CE ۶- شرح چگونگی محاسبه کمیت‌های تقویت کننده CE یک طبقه و دو طبقه در حالت AC ۷- تشریح فیدبک و انواع آن، شرایط نوسان‌سازی و اصل بارک‌هاوزن ۸- کاربرد فیلتر و تقویت کننده در نوسان‌ساز و محاسبه فرکانس در نوسان‌سازهای پل وین، انتقال فاز، آرمسترانگ، هارتلی، کولپیتس و کریستالی ۹- استفاده از شبیه‌سازی نرم‌افزاری برای اصل بارک‌هاوزن و محاسبه فرکانس در نوسان‌سازها

استاندارد عملکرد: تحلیل انواع فیلترها، مدارهای تک‌فاز و سه فاز، مدل‌سازی تقویت کننده CE و بررسی مدارهای نوسان‌ساز

### شاخص‌ها:

انتخاب فضای مورد نظر و مناسب بودن آن (میز کار)	
ترسیم مدار معادل DC و AC تقویت کننده امیتر مشترک	(۲۰ دقیقه)
محاسبه خازن بای پاس در مدار تقویت کننده امیتر مشترک	(۱۰ دقیقه)
ترسیم مدار معادل AC تقویت کننده دو طبقه کوپلاژ خازنی	(۱۰ دقیقه)
حل مسائل و محاسبه کمیت‌های تقویت کننده CE یک طبقه و دو طبقه کوپلاژ خازنی در AC	(۴۰ دقیقه)
حل مسائل و محاسبه فرکانس در نوسان‌سازها	(۳۰ دقیقه)
اجرای نرم‌افزاری و مقایسه نتایج	(۳۰ دقیقه)

شرایط انجام کار و ابزار و تجهیزات: کلاس درس یا کارگاه یا سایت مجهز به رایانه - نور مناسب - ابعاد حداقل ۶ مترمربع و دارای تهویه یا پنجره - دمای طبیعی (  $18^{\circ}\text{C}$  -  $27^{\circ}\text{C}$  ) و مجهز به وسایل اطفای حریق - لوازم التحریر - ماشین حساب - رایانه - نرم‌افزارهای مرتبط

### معیار شایستگی

ردیف	مراحل کار	حداقل نمره قبولی از ۳	نمره هنرجو
۱	تشریح مباحث مرتبط	۱	
۲	ترسیم مدار معادل DC و AC تقویت کننده CE و اجرای نرم‌افزاری	۲	
۳	محاسبه کمیت‌های تقویت کننده CE یک طبقه و دو طبقه در حالت AC و اجرای نرم‌افزاری	۲	
۴	اصول نوسان‌سازی و تحلیل مدار نوسان‌ساز RC انتقال فاز، RC، پل وین و محاسبه فرکانس نوسان‌ساز و اجرای نرم‌افزاری	۲	
۵	تحلیل مدار نوسان‌ساز LC (هارتلی)، LC (کول پیتس)، کریستالی و محاسبه فرکانس نوسان‌ساز LC و اجرای نرم‌افزاری	۲	
	شایستگی‌های غیر فنی، ایمنی، بهداشت، توجهات زیست محیطی و نگرش: ۱- رعایت نکات ایمنی دستگاه‌ها ۲- دقت و تمرکز در اجرای کار ۳- شایستگی تفکر و یادگیری مادام‌العمر ۴- اخلاق حرفه‌ای	۲	
میانگین نمرات			*

\* حداقل میانگین نمرات هنرجو برای قبولی و کسب شایستگی، ۲ می‌باشد.

- ۱- برنامه درسی رشته الکترونیک، شورای برنامه‌ریزی رشته الکترونیک، دفتر تألیف کتاب‌های درسی فنی و حرفه‌ای و کاردانش، ۱۳۹۳.
  - ۲- راهنمای برنامه درسی رشته الکترونیک، شورای برنامه‌ریزی رشته الکترونیک، دفتر تألیف کتاب‌های درسی فنی و حرفه‌ای و کاردانش، ۱۳۹۳.
  - ۳- اصول و مبانی مدارهای الکتریکی، فلوید توماس، مترجم مهرداد عابدی، انتشارات جهاد دانشگاهی، دانشگاه امیرکبیر.
  - ۴- الکترونیک عمومی ۲، کد ۴۹۰/۱۵، سید محمود صموتی، شهرام نصیری سوادکوهی، یدالله رضازاده، غلامحسین نصری، شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، ۱۳۹۴.
  - ۵- کتاب مبانی مخابرات و رادیو پایه سوم هنرستان شاخه فنی و حرفه‌ای، سید محمود صموتی، شهرام نصیری سوادکوهی و...، شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، ۱۳۹۴.
  - ۶- مبانی دیجیتال، یدالله رضازاده، غلامحسین نصری، فتح‌الله نظریان، مهین ظریفیان جولایی، رسول ملک محمد، محمد شبانی، شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، ۱۳۹۴.
  - ۷- مدارهای الکتریکی، علی عراقی، فریدون علومی، شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، ۱۳۹۴.
  - ۸- آزمایشگاه مجازی ۲، مهین ظریفیان جولایی، سید محمود صموتی، سید علی صموتی، محمود شبانی، شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، ۱۳۹۴.
  - ۹- کتاب آزمایشگاه مبانی مخابرات و رادیو جلد اول پایه سوم هنرستان شاخه فنی و حرفه‌ای، یدالله رضازاده، سید محمود صموتی، شهرام نصیری سوادکوهی، محمود شبانی، شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، ۱۳۹۴.
  - ۱۰- سایت‌های اینترنتی برگه‌های اطلاعات Data book، کتاب اطلاعات Data book و دستینه Hand book، ۲۰۱۸.
- ۱۱- Electronic Devices and circuit theory, Robert Boilstad luis Nashlasky, prentice - Hall, ۲۰۰۵.
  - ۱۲- Electronic Devices (Conventional Current Version), 10th Edition, Thomas L.Floyd, McGraw - Hall, ۲۰۱۸.
  - ۱۳- TinyAVR Microcontroller Projects for the Evil Genius (Evil Genius Series) 1 st Edition, Dhananjay Gadre, Nehul Malhotra, McGraw - Hall.
  - ۱۴- Digital Electronics, Roger L.Tokheim, McGraw - Hall, ۱۹۹۰.
  - ۱۵- Digital Design, M.Morris Mano, prentice - Hall, ۱۹۸۴.
  - ۱۶- Schaum's Outline of Electronic Communication, Loyd Temes, McGraw - Hall, ۱۹۹۸.
  - ۱۷- Electronic communication, Loyd Temes, McGraw - Hall, ۱۹۸۸.
  - ۱۸- Electronic Circuit Theory and Technology, john Bird, Routldge, ۲۰۱۴.



سازمان پژوهش و برنامه‌ریزی آموزشی جهت ایفای نقش خطیر خود در اجرای سند تحول بنیادین در آموزش و پرورش و برنامه درسی ملی جمهوری اسلامی ایران، مشارکت معلمان را به‌عنوان یک سیاست اجرایی مهم دنبال می‌کند. برای تحقق این امر در اقدامی نوآورانه سامانه تعاملی بر خط اعتبارسنجی کتاب‌های درسی راه‌اندازی شد تا با دریافت نظرات معلمان درباره کتاب‌های درسی نونگاشت، کتاب‌های درسی را در اولین سال چاپ، با کمترین اشکال به دانش‌آموزان و معلمان ارجمند تقدیم نماید. در انجام مطلوب این فرایند، همکاران گروه تحلیل محتوای آموزشی و پرورشی استان‌ها، گروه‌های آموزشی و دبیرخانه راهبری دروس و مدیریت محترم پروژه آقای محسن باهو نقش سازنده‌ای را بر عهده داشتند. ضمن ارج نهادن به تلاش تمامی این همکاران، اسامی دبیران و هنرآموزانی که تلاش مضاعفی را در این زمینه داشته و با ارائه نظرات خود سازمان را در بهبود محتوای این کتاب یاری کرده‌اند به شرح زیر اعلام می‌شود.

#### اسامی دبیران و هنرآموزان شرکت کننده در اعتبارسنجی کتاب دانش فنی تخصصی رشته الکترونیک - کد ۲۱۲۲۷۵

ردیف	نام و نام خانوادگی	استان محل خدمت	ردیف	نام و نام خانوادگی	استان محل خدمت
۱	علی صادقی	قزوین	۱۱	ماشالله لطیفی	همدان
۲	محبوبه عابدی	قزوین	۱۲	منیره کاکویی	مازندران
۳	مهدی شهروز	خوزستان	۱۳	محمدرضا دوستی	خراسان رضوی
۴	عطا اکبری فر	کرمان	۱۴	هادی بیدختی	خراسان جنوبی
۵	کاظم زارعی خیرآبادی	چهارمحال و بختیاری	۱۵	علی نیکو صحبت	قم
۶	حسین رعناپی	خراسان رضوی	۱۶	ابوالفضل فلاح	آذربایجان شرقی
۷	ابراهیم عزتی	اردبیل	۱۷	مرتضی کرمی	شهرستان‌های تهران
۸	سید فرهاد عقیلی	اصفهان	۱۸	فاطمه نجفی	کرمانشاه
۹	علیرضا عباسی	مرکزی	۱۹	مهدی رضایی	گلستان
۱۰	اویس دهقان تنها	خراسان جنوبی	۲۰	مژگان میرشاهی	شهرستان‌های تهران