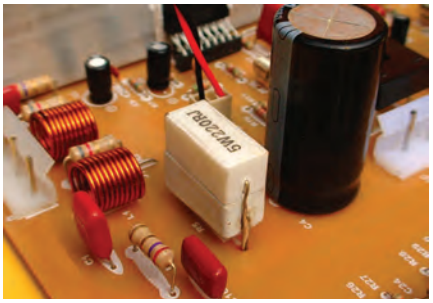
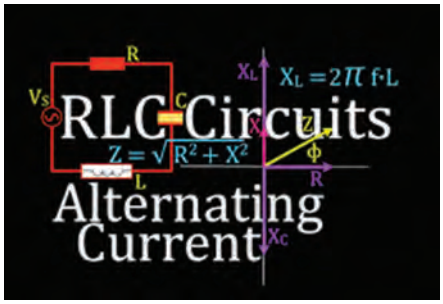
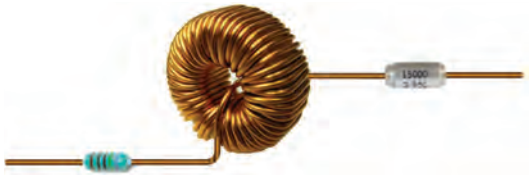
پودمان ۵

محاسبه مقادیر AC درمدارهای الکترونیکی







قطعات R، L وC 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 به‌کار 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 پرقدرت، تأمین انرژی مکانیکی واحد صنعتی را برعهده دارند. این سامانه‌ها 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 آموزش‌عمق بیشتری بخشید.

واحد یادگیری ۹

کسب شایستگی در تحلیل انواع فیلترها، نوسان‌سازها و انجام محاسبات ساده مدارهای تک‌فاز و سه‌فاز

آیا تا به‌حال فکر کرده‌اید:

- مدار معادل یک سلف واقعی از چه عناصری تشکیل شده است؟
- مدار معادل یک خازن واقعی را با چه عناصری می‌توان معادل‌سازی 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 سه‌فاز با مدارهای تک‌فاز چه تفاوتی دارد؟

در اغلب مدارهای الکترونیکی و مدارهای قدرت، قطعاتی مانند مقاومت، سلف و خازن به‌کار گرفته شده‌اند. در پایه دهم و یازدهم با این قطعات تا حدودی آشنا شده‌اید و در پروژه‌های مربوطه عملاً آنها را به‌کار 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 به‌عنوان 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 الکتریکی را ساده‌تر می‌کند. به دلیل کاربُرد مدارهای سه‌فاز در صنایع و ارتباط آن با الکترونیک، این مبحث نیز در حد مورد نیاز توضیح داده شده است. برای درک بهتر مطالب، استفاده از نرم‌افزار مناسب و شبیه‌سازی مدارها و مقایسه نتایج حاصل شده از نرم‌افزار با محاسبات، توصیه می‌شود.

استاندارد عملکرد

تحلیل انواع فیلترها، مدارهای تک‌فاز و سه‌فاز

۱ـ۹ـ 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 القائی است که آن را با X_L نشان می‌دهیم. مقدار X_L از رابطه $X_L=2\pi f\ L=\omega L$ به‌دست می‌آید. با صرف‌نظر 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 $X_C=\frac{1}{2\pi f C}=\frac{1}{\omega C}$ به‌دست می‌آید. در جریان DC $f=0$ و X_C به سمت بی‌نهایت میل می‌کند، (خازن مانند مدار باز عمل می‌کند).

مثال ۱ـ راکتانس القایی سلفی با ضریب‌خودالقائی ۲۰mH را در جریان سینوسی با فرکانس ۵۰۰۰ هرتز محاسبه کنید.

حل:

$$X_L=2\pi fL=2\times3/14\times5000\times20\times10^{-3}=628\ \Omega$$

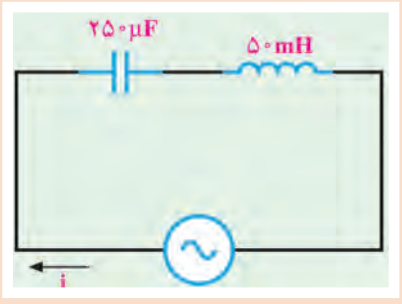
مثال ۲ـ راکتانس خازنی با ظرفیت ۱۰۰ nf را در جریان سینوسی با فرکانس ۱۰۰۰ هرتز محاسبه کنید.

حل:

$$X_C=\frac{1}{2\pi fC}=\frac{1}{2\times3/14\times1000\times100\times10^{-9}}=\frac{10000}{6/28}=1592/3\ \Omega$$

فعالیت

در مدار شکل ۱ـ۹، X_L و X_C را محاسبه کنید.
فرکانس منبع ۱۰۰۰ هرتز است.



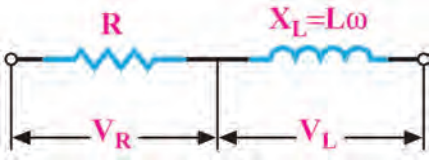
شکل ۱ـ۹

۲ـ۹ـ روش‌های حل مدارهای جریان متناوب

برای به‌دست‌آوردن کمیت‌های مختلف در مدارهای جریان متناوب، روش‌های مختلفی وجود دارد. استفاده از رسم دیاگرام برداری کمیت‌ها و انجام محاسبات با به‌کارگیری 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 به‌شمار می‌آید. در این پیمانه از شرح انجام محاسبات و اثبات فرمول‌ها با استفاده از ترسیم کمیت‌های برداری تقریباً صرف‌نظر 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.

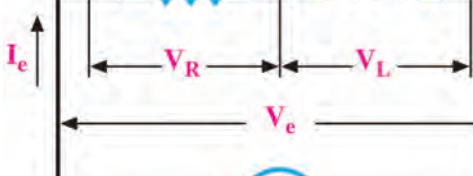
۳ـ۹ـ مدار RL

مدار معادل الکتریکی یک سلف واقعی، به‌صورت راکتانس القایی (X_L) و یک مقاومت اهمی سری با آن در شکل ۲ـ۹ 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.

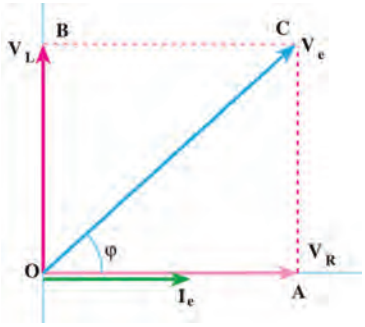


شکل ۲ـ۹ـ مدار معادل سلف حقیقی

■ **محاسبه امپدانس مدار RL سری:** در مدار RL سری شکل ۳ـ۹، جریان I_e (جریان مؤثر مدار) از R و راکتانس القایی (X_L) عبور می‌کند. بنابراین ولتاژهای دو سر مقاومت و سلف از روابط $V_R=R.I_e$ و $V_L=X_L.I_e=2\pi fL.I_e=L\omega I_e$ به‌دست می‌آید. V_R با جریان I_e هم‌فاز و V_L از جریان I_e به اندازه ۹۰ درجه، جلوتر یا پیش‌فاز است. لذا می‌توانیم جریان مدار و ولتاژ دو سر V_R و V_L را مطابق شکل ۴ـ۹ به‌صورت برداری نشان‌دهیم. با توجه به بردارها و قضیه فیثاغورث، مقدار امپدانس مدار RL از رابطه $Z=\sqrt{R^2+X_L^2}$ به‌دست می‌آید.



شکل ۳ـ۹ـ مدار RL سری



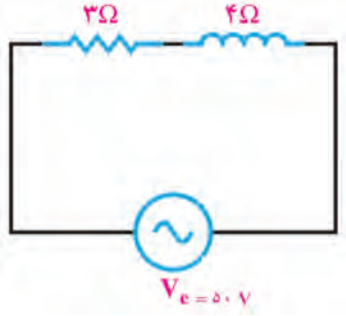
شکل ۴ـ۹ـ دیاگرام برداری مدار RL

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

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

مثال ۳ـ در مدار شکل ۵ـ۹ مقادیر امپدانس مدار، جریان مؤثر مدار و ضریب قدرت (cosφ) را محاسبه کنید.

پاسخ:



شکل ۵ـ۹ـ مدار RL

$$Z=\sqrt{R^2+X_L^2}=\sqrt{۳^2+۴^2}=\sqrt{۲۵}=۵\,\Omega$$

$$I_e=\frac{V_e}{Z}=\frac{۵۰}{۵}=۱۰A$$

$$\cos\varphi=\frac{R}{Z}\Rightarrow\cos\varphi=\frac{۳}{۵}=۰/۶$$

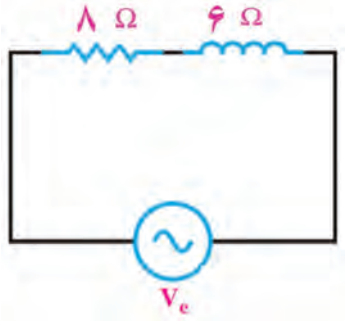
مثال ۴ـ در مدار شکل ۶ـ۹ از مدار جریان مؤثر ۲ آمپر عبورمی‌کند، مقادیر ولتاژ مؤثر مدار و ضریب قدرت ($\cos\varphi$) مدار را محاسبه کنید.

پاسخ:

$$Z=\sqrt{R^{۲}+X_L{}^{۲}}=\sqrt{۸^{۲}+۶^{۲}}=\sqrt{۱۰۰}=۱۰\,\Omega$$

$$V_e=Z\times I_e=۱۰\times ۲=۲۰\,V$$

$$\cos\varphi=\frac{R}{Z}\Rightarrow\cos\varphi=\frac{۸}{۱۰}=۰/۸$$



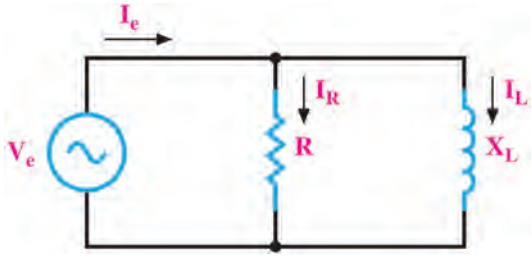
شکل ۶ـ۹

فعالیت

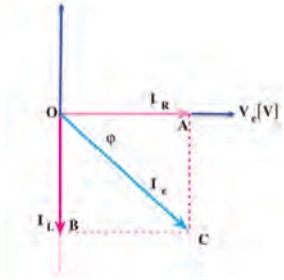
با توجه به روابط توان که در پایه دهم آموختید، توان ظاهری، توان حقیقی و ضریب قدرت را برای مثال‌های حل شده بالا به‌دست آورید. نتایج را با مقادیر محاسبه شده در مثال‌ها مقایسه کنید و نتیجه را در قالب یک گزارش ارائه دهید.

■ مدار RL موازی

مدار RL موازی در شکل ۷ـ۹رسم‌شده‌است. با توجه به شکل ۷ـ۹ 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 ۸ـ۹ اختلاف فاز بین جریان و ولتاژ مدار برابر φ درجه است. جریان کل مدار(Ie) از رابطه $I_e=\sqrt{I_R{}^{۲}+I_L{}^{۲}}$ به‌دست می‌آید.



شکل ۷ـ۹ـ مدار RL موازی



شکل ۸ـ۹ـ دیاگرام برداری 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 $Z=\frac{R.X_L}{\sqrt{R^{۲}+X_L^{۲}}}$ نیز امپدانس قابل محاسبه است. ضریب قدرت ($\cos\varphi$) از رابطه $\cos\varphi=\frac{Z}{R}$ به‌دست می‌آید.

مثال ۵ـ در مدار شکل ۹ـ۹ولتاژ مؤثر مدار ۲۴۰ ولت است. مقادیر جریان مؤثر، امپدانس و ضریب قدرت ($\cos\varphi$) مدار را محاسبه کنید.

پاسخ:

$$I_L = \frac{V_e}{X_L} = \frac{۲۴۰}{۶۰} = ۴A$$

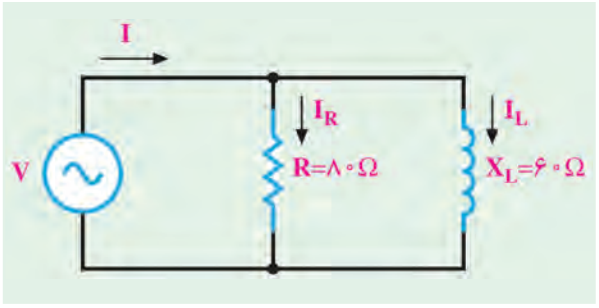
$$I_R = \frac{V_e}{R} = \frac{۲۴۰}{۸۰} = ۳A$$

$$I_e = \sqrt{{I_R}^۲ + {I_L}^۲} = \sqrt{۳^۲ + ۴^۲} = \sqrt{۲۵} = ۵A$$

$$Z = \frac{V_e}{I_e} = \frac{۲۴۰}{۵} = ۴۸\,\Omega$$

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

$$\cos\varphi = \frac{۴۸}{۸۰} = ۰/۶$$



شکل ۹ـ۹

مثال ۶ـ در مدار شکل ۱۰ـ۹ مقادیر V_e، I_R، I_e و امپدانس مدار را محاسبه کنید.

پاسخ:

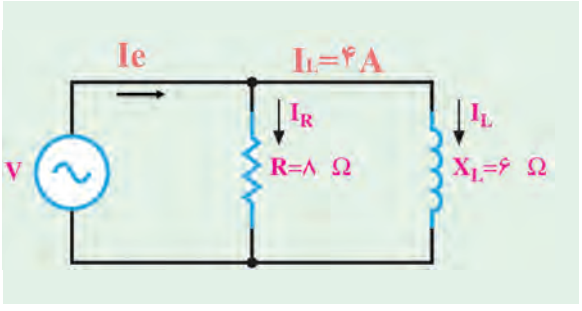
$$V_e = X_L \times I_e = ۶ \times ۴ = ۲۴V$$

$$I_R = \frac{V_e}{R} = \frac{۲۴}{۸} = ۳A$$

$$I_e = \sqrt{{I_R}^۲ + {I_L}^۲}$$

$$I_e = \sqrt{۳^۲ + ۴^۲} = \sqrt{۲۵} = ۵A$$

$$Z = \frac{V_e}{I_e} = \frac{۲۴}{۵} = ۴/۸\,\Omega$$

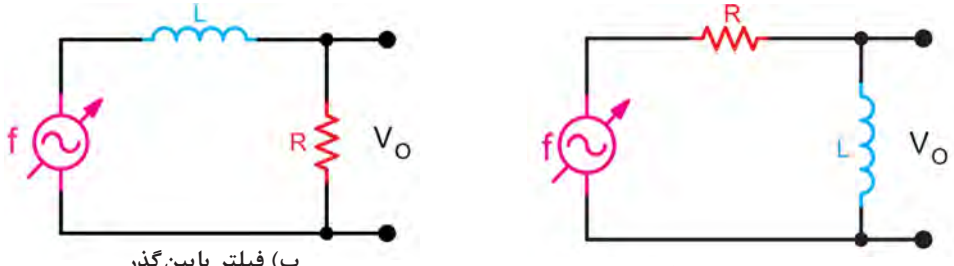


شکل ۱۰ـ۹

☑ **مدار RL به‌عنوان فیلتر:** با ساختمان فیلترها در پایه یازدهم در درس ساخت پروژه آشنا شده‌اید.در شکل الف و ب ۱۱ـ۹ دو نوع فیلتر بالاگذر و پایین‌گذر رسم شده است. با تغییر فرکانس منبع، مقدار X_L تغییر می‌کند.

در فرکانس قطع، X_L با R برابر می‌شود. $R = X_L = ۲\pi f L \rightarrow f = f_C = \frac{R}{۲\pi L}$

در فرکانس قطع، مقدار ولتاژ خروجی برابر $V_O = \frac{V_i}{\sqrt{۲}}$ است.



ب) فیلتر پایین‌گذر

الف) فیلتر بالاگذر

شکل ۱۱ـ۹ـ فیلترهای RL

پژوهش

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

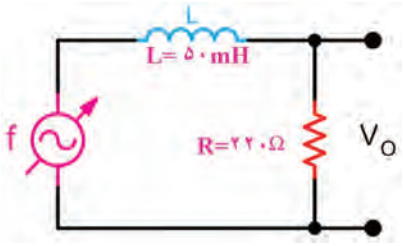
فعالیت

در ساعات غیر درسی با استفاده از نرم‌افزار مولتی‌سیم، فیلترهای بالاگذر و پایین‌گذر را شبیه‌سازی 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.

مثال ۷ـ در مدار فیلتر شکل ۱۲ـ ۹ مطلوب است:
الف) نوع فیلتر ب) محاسبه فرکانس قطع فیلتر

پاسخ: نوع فیلتر پایین‌گذر است.

$$f_C = \frac{R}{2\pi L} = \frac{220}{2 \times 3/14 \times 50 \times 10^{-3}} = \frac{2200}{3/14} \cong 700\,HZ$$



شکل ۱۲ـ۹ـ فیلتر RL

مثال ۸ـ در مدار شکل ۱۳ـ۹ مقادیر امپدانس، جریان مؤثر، ولتاژ خروجی V_O را محاسبه کنید. بین V_O و V_e چه رابطه‌ای وجود دارد؟

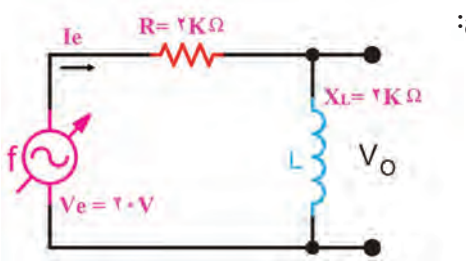
پاسخ:

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

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

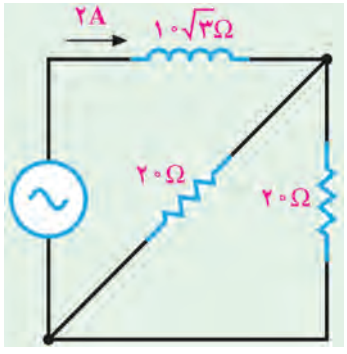
$$V_O = X_L \times I_e = 2 \times 5\sqrt{2} = 10\sqrt{2}\,V$$

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



شکل ۱۳ـ۹ـ فیلتر RL

کار با نرم‌افزار در ساعات غیردرسی: مثال‌های حل شده را در نرم‌افزار مولتی‌سیم یا هر نرم‌افزار دیگر ببندید و جریان مدار و سایر کمیت‌ها را اندازه بگیرید و با محاسبات انجام شده مقایسه کنید.



شکل ۱۴ـ۹

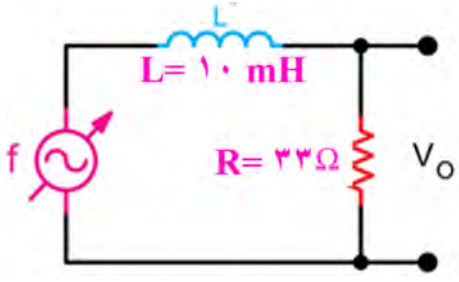
الگوی پرسش

۱ـ در جریان DC، سلف خالص مانند ..... و خازن خالص مانند ..... عمل می‌کند.

۲ـ در مدار RL سری، جریان مدار نسبت به ولتاژ منبع ۹۰ درجه اختلاف فاز دارد. صحیح ☐ غلط ☐

۳ـ در مدار شکل ۱۴ـ۹ مطلوب است محاسبهٔ الف) امپدانس مدار
ب) ولتاژ مؤثر مدار پ) ضریب قدرت (cosφ)

۴ـ در مدار فیلتر شکل ۱۵ـ۹ مطلوب است:
الف) نوع فیلتر
ب) محاسبه فرکانس قطع فیلتر



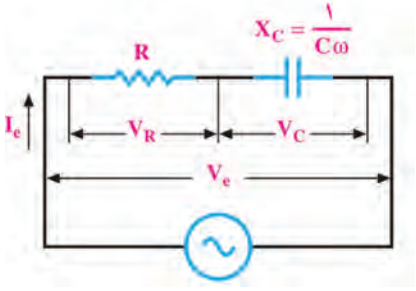
شکل ۱۵ـ۹

۴ـ۹ـ مدار RC

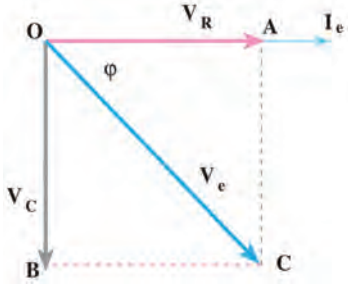
ترکیب عناصر مقاومتی و خازنی در مدارهای الکترونیکی، مخابراتی، الکترونیک صنعتی و شبکه‌های قدرت مانند فیلترها، تایمرها و تصحیح کننده ضریب قدرت کاربرد فراوان دارند.

☑ **محاسبه امپدانس و ضریب قدرت در مدار RC سری:** در مدار RC سری شکل ۱۶ـ۹، 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 ۱۷ـ۹ نشان دهیم.

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



شکل ۱۶ـ۹ـ مدار RC سری

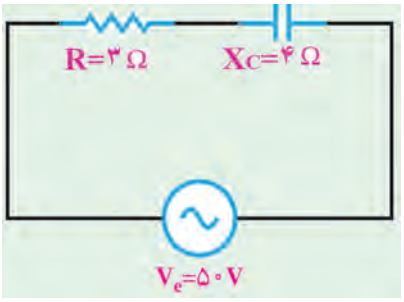


شکل ۱۷ـ۹ـ دیاگرام برداری مدار RC سری

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

مثال ۹ـ در مدار شکل ۱۸ـ۹ مقادیر امپدانس، جریان مؤثر و ضریب قدرت (cosφ) مدار را محاسبه کنید.

پاسخ:



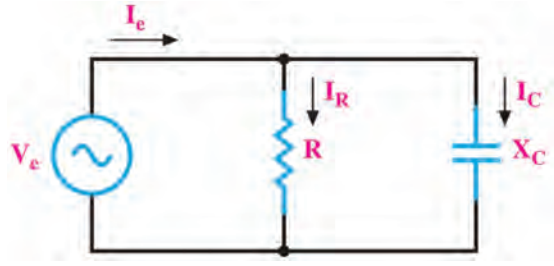
شکل ۱۸ـ۹ـ مدار RC سری

$$Z=\sqrt{R^2+X_C^2}=\sqrt{۳^2+۴^2}=\sqrt{۲۵}=۵\,\Omega$$

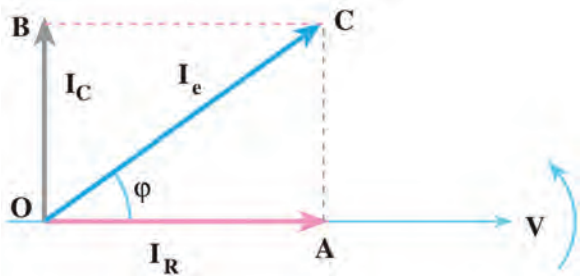
$$I_e=\frac{V_e}{Z}=\frac{۵۰}{۵}=۱۰A$$

$$\cos\varphi=\frac{R}{Z}=\frac{۳}{۵}=۰/۶$$

■ **مدار RC موازی:** یک خازن واقعی، عملاً به‌صورت یک خازن ایده‌آل و یک مقاومت اهمی موازی با آن عمل می‌کند. 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 ۱۹ـ۹رسم شده است. با توجه به شکل ۱۹ـ۹ می‌توان 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_R و I_C، ۹۰ درجه اختلاف فاز دارند. اگر ولتاژ را مبنا قرار دهیم مطابق شکل ۲۰ـ۹ اختلاف فاز بین جریان و ولتاژ مدار برابر φ درجه است.



شکل ۱۹ـ۹ـ مدار RC موازی



شکل ۲۰ـ۹ـ دیاگرام برداری مدار RC موازی

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

☐ جریان کل مدار (I_e) از رابطه $Ie = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}$ به‌دست می‌آید.

☐ 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 $Z = \frac{R.X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}$ نیز می‌توان امپدانس را محاسبه کرد.

☐ ضریب قدرت (cosφ) از رابطه $\cos\varphi = \frac{Z}{R}$ به‌دست می‌آید.

مثال ۱۰ـ در مدار شکل ۲۱ـ۹مطلوب است محاسبه الف) جریان مؤثر مدار ب) امپدانس مدار پ) ضریب قدرت (cosφ)

پاسخ:

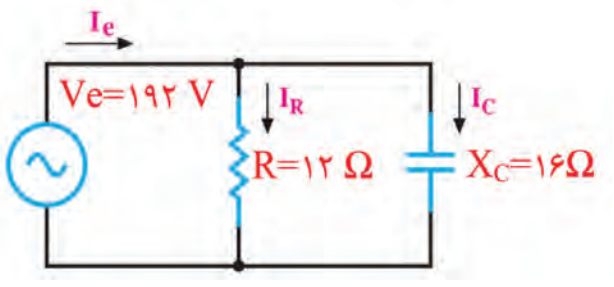
$$I_C = \frac{V_e}{X_C} = \frac{۱۹۲}{۱۶} = ۱۲\,A$$

$$I_R = \frac{V_e}{R} = \frac{۱۹۲}{۱۲} = ۱۶\,A$$

$$I_e = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} = \sqrt{۱۶^2 + ۱۲^2} = \sqrt{۴۰۰} = ۲۰A$$

$$Z = \frac{V_e}{I_e} = \frac{۱۹۲}{۲۰} = ۹/۶\,\Omega$$

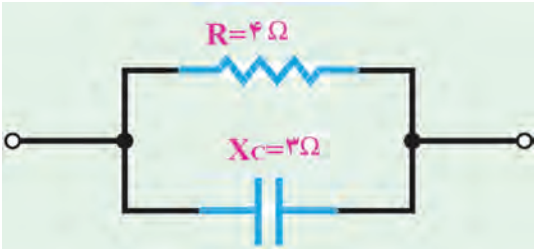
$$\cos\varphi = \frac{Z}{R} = \frac{۹/۶}{۱۲} = ۰/۸$$



شکل ۲۱ـ۹

مثال ۱۱ـ در مدار شکل ۲۲ـ۹، امپدانس مدار و ضریب قدرت ($\cos\varphi$) را محاسبه کنید.

پاسخ:



شکل ۲۲ـ۹

$$Z=\frac{R\times X_C}{\sqrt{R^2\times X_C^2}}=\frac{۴\times ۳}{\sqrt{۴^2+۳^2}}=\frac{۱۲}{۵}=۲/۴\,\Omega$$

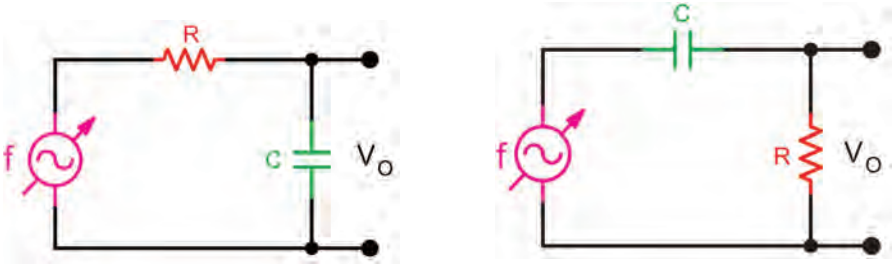
$$\cos\varphi=\frac{Z}{R}=\frac{۲/۴}{۴}=۰/۶$$

☑**مدار RC به‌عنوان فیلتر**

در شکل الف و ب ۲۳ـ۹ مدار دو نوع فیلتر بالاگذر و پایین‌گذر RC رسم شده است. با تغییر فرکانس منبع، مقدار X_C تغییر می‌کند.

☐ در فرکانس قطع X_C با R برابر می‌شود. $R=X_C=\frac{۱}{۲\pi fC}\Rightarrow f=f_C=\frac{۱}{۲\pi RC}$

☐ در فرکانس قطع، مقدار ولتاژ خروجی برابر $V_O=\frac{V_i}{\sqrt{۲}}$ است.



الف) فیلتر بالاگذر ب) فیلتر پایین‌گذر

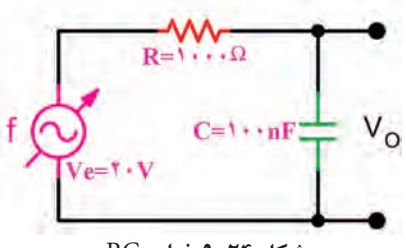
شکل ۲۳ـ۹ـ فیلترهای RC

مثال ۱۲ـ در مدار فیلتر شکل ۲۴ـ۹ فرکانس قطع فیلتر و مقدار ولتاژ خروجی را محاسبه کنید و نوع فیلتر را مشخص نمایید.

پاسخ: نوع فیلتر پایین‌گذر است.

$$f_C=\frac{۱}{۲\pi RC}=\frac{۱}{۲\times ۳/۱۴\times ۱۰۰۰\times ۱۰۰\times ۱۰^{-۹}}=\frac{۱۰۰۰۰}{۶/۲۸}$$

$$f_C\cong ۱۵۹۲\ HZ$$



شکل ۲۴ـ۹ فیلتر RC

در فرکانس قطع، مقدار ولتاژ خروجی برابر $V_O=\frac{V_i}{\sqrt{۲}}=\frac{۲۰}{\sqrt{۲}}=۱۴/۱V$ است.

کار با نرم‌افزار در ساعات غیردرسی: مثال‌های حل شده را در نرم‌افزار مولتی‌سیم یا هر نرم‌افزار مناسب دیگر ببندید و جریان مدار و سایر کمیت‌ها را اندازه بگیرید و با محاسبات انجام شده مقایسه کنید.

الگوی پرسش

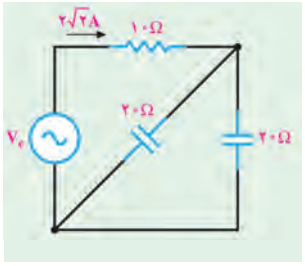
۱ـ افزایش فرکانس بر روی راکتانس خازنی چه اثری دارد؟ شرح دهید.

۲ـ در مدار شکل ۹ـ۲۵ مقادیر امپدانس و ولتاژ ورودی (V_e) را محاسبه کنید.

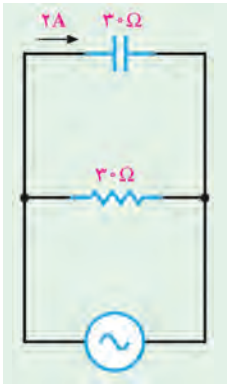
۳ـ در مدار شکل ۹ـ۲۶ مقادیر V_e، I_R، I_e و امپدانس مدار را محاسبه کنید.

۴ـ در مدار شکل ۹ـ۲۷ مقادیر V_e، I_C، I_e و امپدانس مدار را محاسبه کنید.

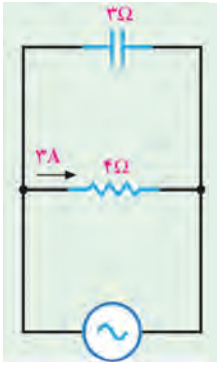
۵ـ در مدار فیلتر شکل ۹ـ۲۸ مطلوب است الف) نوع فیلتر ب) محاسبه فرکانس قطع فیلتر



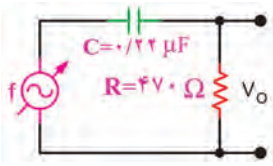
شکل ۹ـ۲۵



شکل ۹ـ۲۶



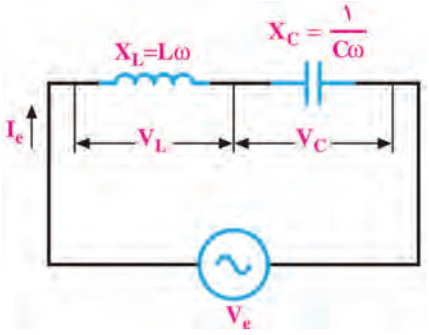
شکل ۹ـ۲۷



شکل ۹ـ۲۸

۵ـ۹ـ مدار LC

در بررسی مدارهای با سلف و خازن آموختیم که در سلف جریان از ولتاژ ۹۰ درجه عقب‌تر است درصورتی‌که در خازن جریان از ولتاژ ۹۰ درجه جلوتر است. این امر سبب می‌شود که این دو عنصر رفتار متقابل داشته باشند. چون هر دو قطعه در شبکه توان راکتیو مبادله می‌کنند، در این حالت به دلیل اثر متقابل آنها، توان راکتیو شبکه کاهش می‌یابد و مقدار آن می‌تواند به صفر برسد.



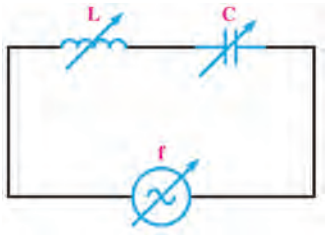
شکل ۹ـ۲۹

■ **مدار LC سری:** در شکل ۹ـ۲۹ مدار LC سری رسم شده است. درصورتی‌که $V_L > V_C$ باشد، مقدار امپدانس مدار از رابطه $Z=X_L-X_C$ به‌دست می‌آید. در این حالت $V_e=V_L-V_C$ است. اگر $V_C > V_L$ باشد، امپدانس مدار از رابطه $Z=X_C-X_L$ به‌دست می‌آید. 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_C و X_L تغییر می‌کنند. در فرکانس خاصی $X_L=X_C$ می‌شود و اثر یکدیگر را خنثی می‌کنند. در این حالت اندازه کمیت Z برابر صفر شده و حداکثر جریان از مدار عبور می‌کند. این جریان، جریان ناشی از اتصال کوتاه و بی‌اثر شدن مدار LC است. این حالت را تشدید یا رزونانس گویند.

√ فرکانس تشدید از رابطه $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ به‌دست می‌آید.

مثال ۱۳ـ در شکل ۳۰ـ۹ هر سه کمیت L و C و فرکانس منبع قابل تغییر است. اگر L=۱۰mH و C=۱μF باشد، فرکانس تشدید را به‌دست آورید. در این فرکانس امپدانس مدار چقدر است؟



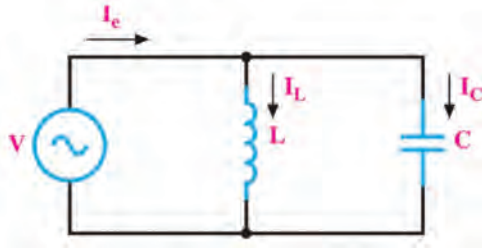
شکل ۳۰ـ۹

پاسخ:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\times 3/14\sqrt{10\times10^{-3}\times1\times10^{-6}}} = \frac{10000}{6/28} = 1592/23\ HZ$$

در فرکانس رزونانس Z=۰ است.

☑ **مدار LC موازی:** در شکل ۳۱ـ۹ مدار LC موازی رسم شده است.



شکل ۳۱ـ۹

درصورتی‌که $I_L>I_C$ باشد، جریان کل مدار از رابطه $I_e=I_L-I_C$ به‌دست می‌آید. اگر $I_C>I_L$ باشد، جریان مدار از رابطه $I_e=I_C-I_L$ محاسبه می‌شود. 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 $Z=\frac{X_L.X_C}{X_L-X_C}$ یا $Z=\frac{X_L.X_C}{X_C-X_L}$ قابل محاسبه است.

بارش فکری

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

☑ در فرکانس تشدید $X_L=X_C$ است در نتیجه $I_L=I_C$ شده و I_e برابر صفر می‌شود در این حالت خاصیت سلفی به‌وسیله خاصیت خازنی کاملاً خنثی می‌شود.

√ در این مدار هم فرکانس تشدید از رابطه $f_r=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ به‌دست می‌آید.

√ امپدانس مدار در حالت تشدید، بی‌نهایت (∞) است.

مثال ۱۴ـ در مدار شکل ۳۱ـ۹ اگر ضریب خودالقایی سلف برابر ۲ میلی‌هانری و ظرفیت خازن ۱۰۰ میکروفاراد باشد، فرکانس تشدید را به‌دست آورید. در این فرکانس امپدانس مدار چقدر است؟

پاسخ:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\times 3/14\sqrt{2\times10^{-3}\times100\times10^{-6}}} = \frac{1000}{6/28\sqrt{0/2}} = 357\ HZ$$

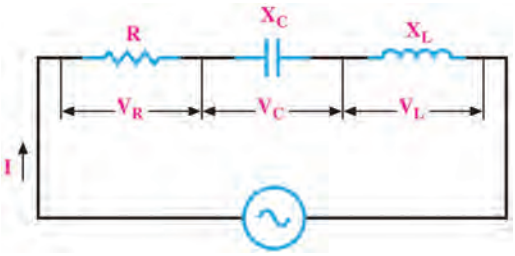
در فرکانس رزونانس Z=∞ است.

۶ـ۹ـ مدار RLC سری

در شکل ۳۲ـ۹ مدار RLC سری رسم شده است.

☑ درصورتی‌که $X_L > X_C$ 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).



شکل ۳۲ـ۹

☑ 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 (cosφ) از رابطه $\cos\varphi=\frac{R}{Z}$ به‌دست 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 ۱۵ـ در مدار شکل ۳۳ـ۹ اگر $V_e=100\,V$ باشد، مقادیر امپدانس، جریان مؤثر و ضریب قدرت (cosφ) مدار را محاسبه کنید.

پاسخ:

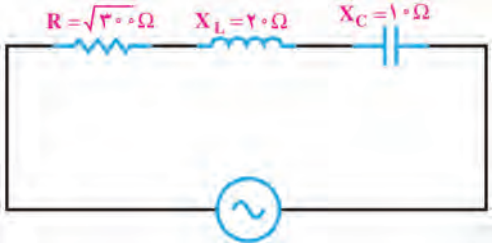
$X=X_L-X_C$

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

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

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

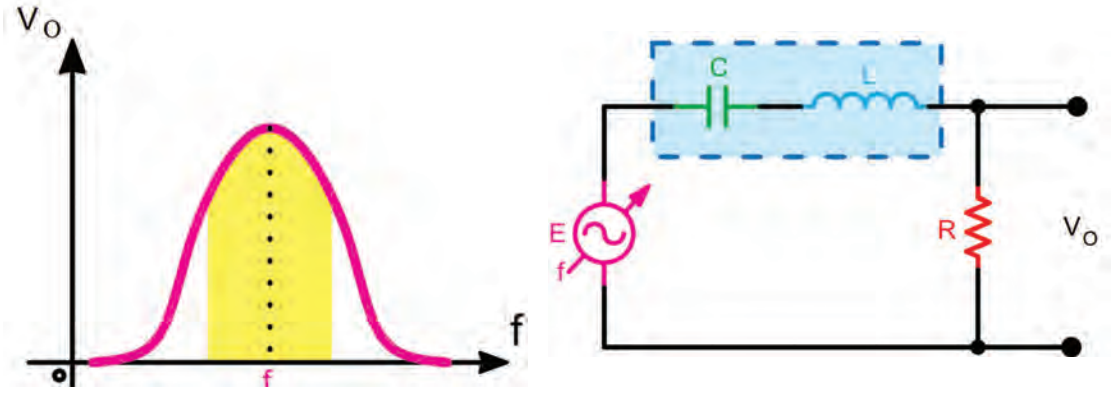
$\cos\varphi=\frac{R}{Z}=\frac{\sqrt{300}}{20}=0/866$



شکل ۳۳ـ۹

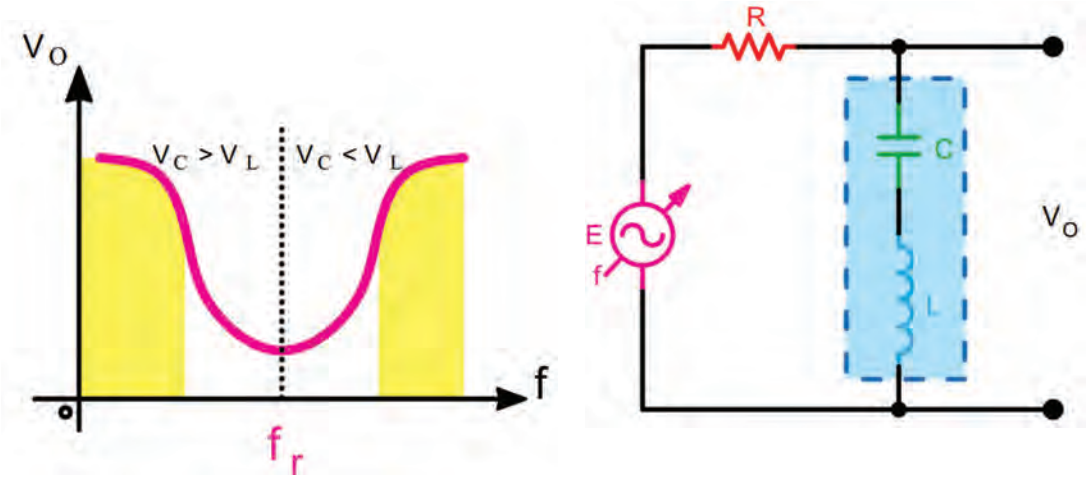
■ **مدار RLC سری به‌عنوان فیلتر:** مدار RLC سری را به‌عنوان فیلتر عبور باند و حذف باند به‌کار می‌برند. شکل‌های الف و ب ۳۴ـ۹ فیلتر عبور باند (میان‌گذر) و منحنی پاسخ فرکانسی آن را نشان می‌دهد. در شکل‌های الف و ب ۳۵ـ۹ فیلتر حذف باند (میان‌نگذر) و منحنی پاسخ فرکانسی آن رسم شده است.

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.



الف) مدار فیلتر عبور باند　　ب) منحنی پاسخ فرکانسی

شکل ۳۴ـ۹ـ فیلتر عبور باند و منحنی پاسخ فرکانسی آن



الف) مدار فیلتر حذف باند　　ب) منحنی پاسخ فرکانسی

شکل ۳۵ـ۹ـ 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.

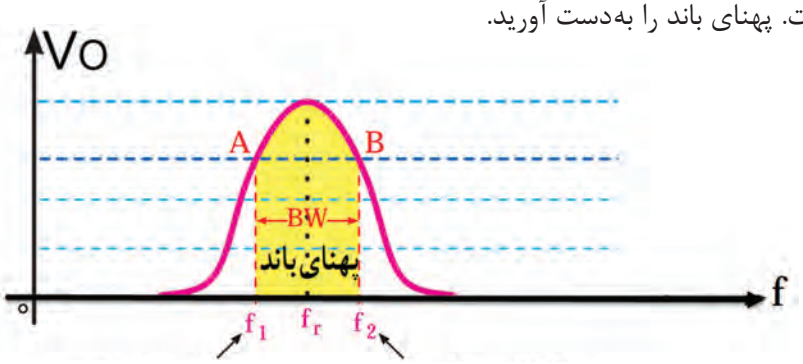
الف) فرکانس رزونانس (f_r)　　ب) پهنای باند (BW)　　پ) ضریب کیفیت (Q)

☐ 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 ۱۶ـ در شکل ۳۶ـ۹ فرکانس قطع بالا (f_2) برابر ۶۱۰ کیلوهرتز و فرکانس قطع پایین (f_1) برابر ۵۸۰ کیلوهرتز است. پهنای باند را به‌دست آورید.



شکل ۳۶ـ۹ـ منحنی پاسخ فرکانسی فیلتر عبور باند

پاسخ:

$$BW=f_2-f_1 = ۶۱۰ - ۵۸۰ = ۳۰ \text{ KHZ}$$

☐ ضریب کیفیت (Q= Quality Factor):

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

مثال ۱۷ـ درصورتی‌که در شکل الف) ۳۴ـ۹ مقدار $X_L=۱۰K\Omega$ و $R=۱۰۰\Omega$ باشد، مقدار Q را به‌دست آورید.

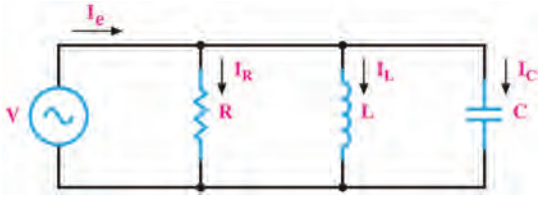
پاسخ:

$$Q=\frac{X_L}{R}=\frac{۱۰۰۰۰}{۱۰۰}=۱۰۰$$

پژوهش

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

■ **مدار RLC موازی:** در مدار RLC موازی، ولتاژ دو سر شاخه‌ها با هم برابر است ولی جریان هر شاخه متناسب با راکتانس آن شاخه محاسبه می‌شود. در شکل ۳۷ـ۹ مدار RLC موازی رسم شده است.



شکل ۳۷ـ۹ـ مدار RLC موازی

☑ **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. درصورتی‌که $I_L > I_C$ باشد، رابطه به‌صورت $I_e=\sqrt{I_R{}^2+(I_L-I_C)^2}$ نوشته می‌شود.

☐ امپدانس مدار برابر $Z=\frac{V_e}{I_e}$ است. امپدانس مدار را می‌توان از فرمول $\frac{۱}{Z^2}=\frac{۱}{R^2}+(\frac{۱}{X_C}-\frac{۱}{X_L})^2$ نیز محاسبه نمود.

☐ ضریب قدرت از رابطه $\cos\varphi=\frac{Z}{R}$ به‌دست می‌آید.

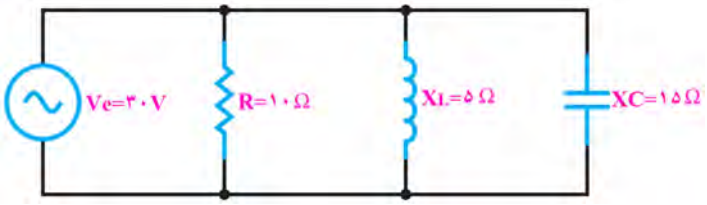
مثال ۱۸ــ در شکل ۳۸ــ۹ مطلوب است محاسبه الف) جریان هر شاخه ب) جریان کل پ) امپدانس مدار

پاسخ:

$$I_R=\frac{V_e}{R}=\frac{۳۰}{۱۰}=۳\,A$$

$$I_C=\frac{V_e}{X_C}=\frac{۳۰}{۱۵}=۲\,A$$

$$I_L=\frac{V_e}{X_L}=\frac{۳۰}{۵}=۶\,A$$



شکل ۳۸ــ۹ــ مدار RLC موازی

$$I_e=\sqrt{I_R{}^2+(I_L-I_C)^2}=\sqrt{۳^2+(۶-۲)^2}=\sqrt{۲۵}=۵\,A$$

$$Z=\frac{V_e}{I_e}=\frac{۳۰}{۵}=۶\,\Omega$$

■ **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.

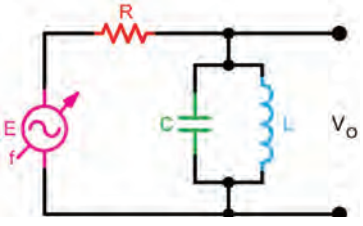
☑ فرکانس در حالت تشدید از رابطه $f_r=\frac{۱}{۲\pi\sqrt{LC}}$ قابل محاسبه است.

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

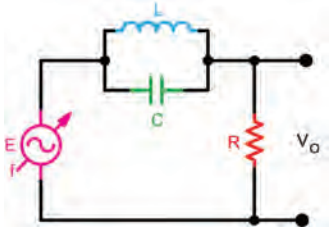
بحث گروهی

با توجه به شکل ۳۸ــ۹ اگر $X_L=X_C$ باشد، مدار را به بحث بگذارید و شرایط آن را بررسی و نتیجه‌گیری کنید.

■ **LC موازی به‌عنوان فیلتر:** از مدار LC موازی به‌عنوان فیلتر عبور باند و حذف باند نیز استفاده می‌کنند. شکل ۳۹ــ۹ فیلتر عبور باند (میان‌گذر) را نشان می‌دهد. در شکل ۴۰ــ۹ فیلتر حذف باند (میان‌نگذر) رسم شده است.

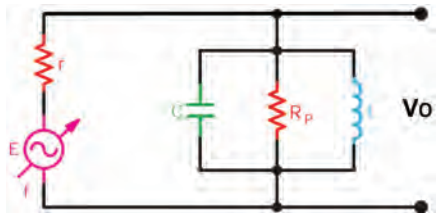


شکل ۳۹ــ۹ــ مدار فیلتر عبور باند



شکل ۴۰ــ۹ــ مدار فیلتر حذف باند

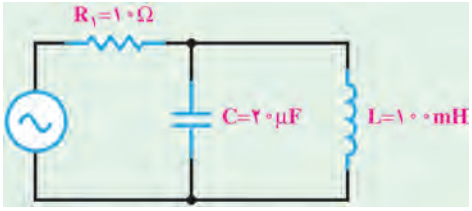
☐ **ضریب کیفیت (Q) در مدار رزونانس موازی:** در فیلترموازی شکل ۹ـ۴۱ مقدار Q به مقاومت موازی مدار بستگی دارد و مقدار آن از رابطه $Q_P = \frac{R_P}{X_L}$ محاسبه می‌شود.



شکل ۹ـ۴۱ـ مدار فیلتر عبور باند

مثال ۱۹ـ مطلوب است محاسبه فرکانس تشدید در مدار شکل ۹ـ۴۲

پاسخ:

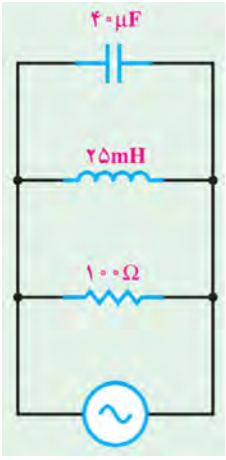


شکل ۹ـ۴۲ـ مدار LC موازی

$$f_r = \frac{۱}{۲\pi\sqrt{LC}} = \frac{۱}{۲\times۳/۱۴\sqrt{۱۰۰\times۱۰^{-۳}\times۲۰\times۱۰^{-۶}}} = \frac{۱۰۰۰}{۶/۲۸\times\sqrt{۲}} = ۱۱۲/۶\ HZ$$

مثال۲۰ـ در مدار RLC شکل ۹ـ۴۳مقادیر فرکانس رزونانس، ضریب کیفیت و پهنای باند را محاسبه کنید.

پاسخ:



شکل ۹ـ۴۳

$$f_r = \frac{۱}{۲\pi\sqrt{LC}} = \frac{۱}{۲\times۳/۱۴\sqrt{۲۵\times۱۰^{-۳}\times۴۰\times۱۰^{-۶}}} = \frac{۱۰۰۰}{۶/۲۸} = ۱۶۰\ HZ$$

$$Q_P = \frac{R_P}{X_L} = \frac{۱۰۰}{۲\pi fL} = \frac{۱۰۰}{۲\pi\times۱۶۰\times۲۵\times۱۰^{-۳}} \cong ۴$$

$$BW = \frac{f_r}{Q} = \frac{۱۶۰}{۴} = ۴۰\ HZ$$

الگوی پرسش

۱ـ در شکل ۹ـ۴۴ امپدانس مدار را محاسبه کنید.

۲ـ در شکل ۹ـ۴۵ امپدانس و جریان کل مدار را محاسبه کنید.

۳ـ در مدارشکل ۹ـ۴۶ مقادیر Z ، I_e و cosφ را محاسبه کنید.

۴ـ در مدارشکل ۹ـ۴۷ مقادیر V_e و جریان کل مدار را محاسبه کنید.

۵ـ LC سری در حالت تشدید مانند یک سیم اتصال کوتاه و LC موازی مانند مدار باز عمل می‌کند.

صحیح ☐ غلط ☐

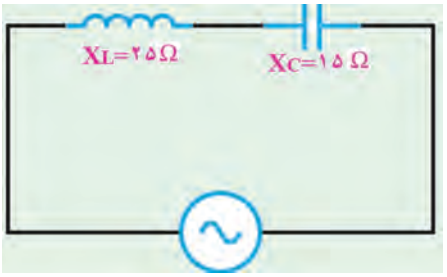
۶ـ دو نمونه مدار فیلتر میان‌گذر را رسم کنید و طرز کار آنها را بنویسید.

۷ـ فیلتر شکل ۹ـ۴۸ از نوع ..... باند و با مدار رزونانسی ..... است.

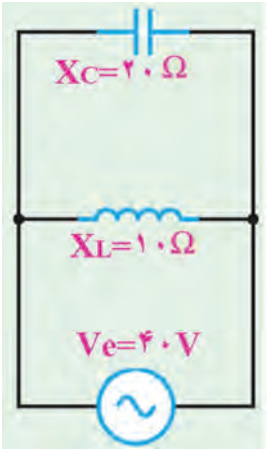
الف) عبور ـ موازی ب) حذف ـ سری پ) حذف ـ موازی ت) عبور ـ سری

۸ـ در فیلتر شکل ۹ـ۴۹ اگر R_P افزایش یابد، مقدار Q ..... می‌شود و BW ..... می‌یابد.

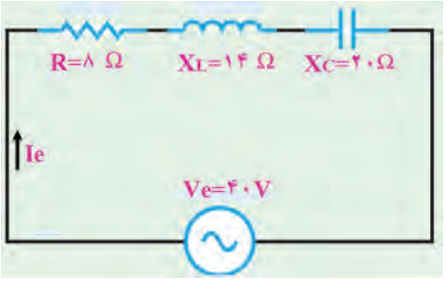
الف) زیاد ـ کاهش　　ب) زیاد ـ افزایش　　پ) کم ـ افزایش　　ت) کم ـ کاهش



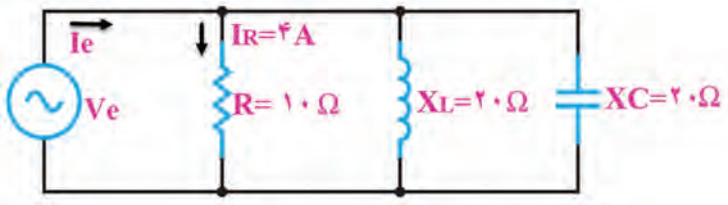
شکل ۹ـ۴۴



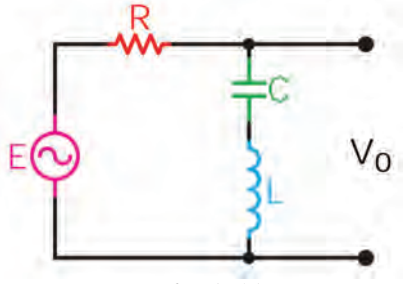
شکل ۹ـ۴۵



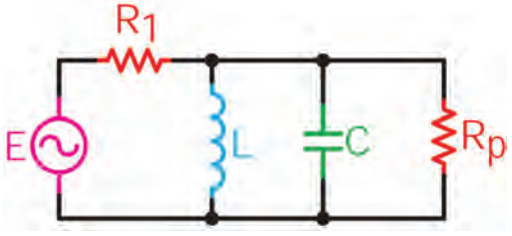
شکل ۹ـ۴۶



شکل ۹ـ۴۷



شکل ۹ـ۴۸



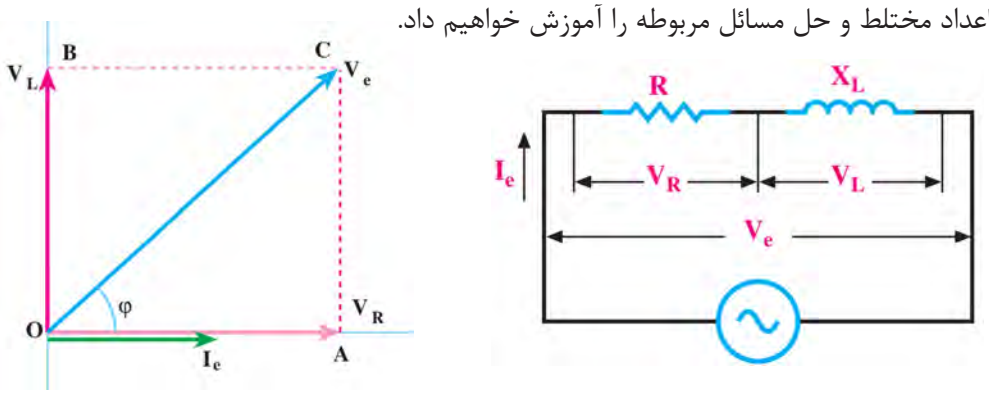
شکل ۹ـ۴۹

کار با نرم‌افزار در ساعات غیردرسی: مثال‌های حل شده و سؤالات الگوی پرسش را در ساعات غیردرسی در نرم‌افزار مولتی سیم شبیه‌سازی کنید و نتایج به‌دست آمده را با محاسبات خود مقایسه کنید.

۷ـ۹ـ حل مدارهای جریان متناوب با استفاده از اعداد مختلط

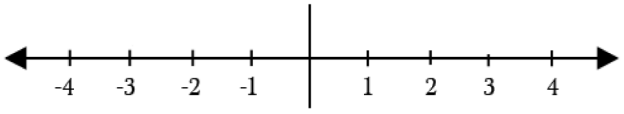
می‌دانیم در مدارهای الکتریکی RL و RC جریان متناوب، جریان با ولتاژ اختلاف فاز دارد. اختلاف فاز بین جریان و ولتاژ در مدار RC به گونه‌ای است که جریان به اندازه φ درجه از ولتاژ جلو می‌افتد یا به‌عبارت دیگر پیش‌فاز است. در مدار RL جریان به‌اندازه φ درجه از ولتاژ عقب‌تر یا پس‌فاز است. اگر مقادیر جریان یا ولتاژ را با بردار نمایش دهیم، ولتاژ معادل در مدار RL مطابق شکل ۹ـ۵۰ وتر مثلثی خواهد بود که دو

انتهای بردارهای ولتاژ، دو سر مقاومت و ولتاژ دو سر سلف را به هم وصل می‌کند. برای به‌دست آوردن ولتاژ معادل باید از محاسبات هندسی یعنی قضیه فیثاغورث استفاده کنیم. در این حالت ولتاژ معادل برابر است با $V_e^2 = V_L^2 + V_R^2$. درصورتی‌که مدار ترکیبی از چند R، چند X_L یا چند X_C یا ترکیبی از R، X_L و X_C به‌صورت 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 ۵۰ـ۹ـ مدار RL جریان متناوب

اعداد حقیقی: مجموعه‌ای از اعداد صحیح مانند ۱، ۲ و ۳ و اعداد گویا مانند $\frac{۵}{۷}$ یا $\frac{۹}{۱۱}$ را اعداد حقیقی می‌گویند. اعداد حقیقی را روی محور افقی مانند شکل ۵۱ـ۹ نشان می‌دهند.



شکل ۵۱ـ۹ـ نمایش اعداد حقیقی روی محور

■ **اعداد موهومی (Imaginary):** چون اعداد مثبت و منفی طبق قرارداد به‌وجود آمده‌اند، ریاضی‌دانان علامتی را تعریف کرده‌اند که مجذور آن ۱- است. این علامت را با j یا i نشان می‌دهند. بنابراین $j = \sqrt{-۱}$ و $j^2 = -۱$ خواهد بود. بنابراین تعریف جذر عدد ۱-، یک عدد گنگ است که آن را $\sqrt{-۱}$ می‌نامیم. این عدد را موهومی یا گنگ می‌نامند زیرا می‌دانیم اعداد منفی جذر ندارند.

فعالیت در کلاس

با توجه به اینکه $j = \sqrt{-۱}$ است، مقادیر j^3، j^4 و j^5 را برحسب j به‌دست آورید.

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

$$j^9 = j^8 \times j,\ \ j^8 = (\sqrt{-۱})^8 = ۱ \rightarrow j^9 = j^8 \times j = (۱) \times j = j$$

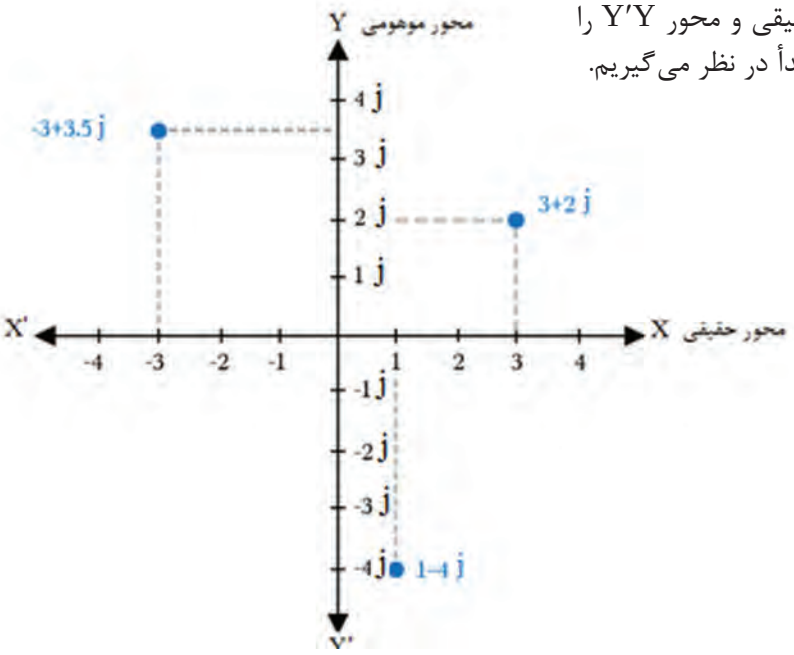
فعالیت

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

فعالیت

ریشه‌های معادله $X^{2}+1=0$ را برحسب j به‌دست آورید.

■ **نمایش اعداد موهومی (Imaginary)**: در شکل ۹ـ۵۲ محور $X'X$ را محور حقیقی و محور $Y'Y$ را محور موهومی و نقطه O را مبدأ در نظر می‌گیریم.



شکل ۵۲ـ۹ـ نمایش چند عدد حقیقی و موهومی روی محورهای مختصات

نکته

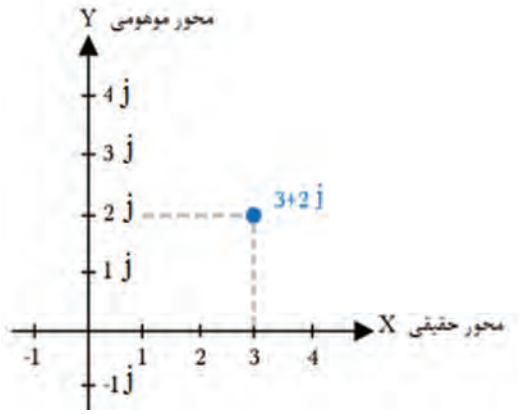
در هر یک از چهار ربع محورهای مختصات، اعداد مختلط به نمایش در می‌آید ولی در حل مدارهای الکتریکی به دلیل مثبت بودن مقدار حقیقی فقط از ربع اول و چهارم استفاده می‌شود زیرا عناصر موجود در مدارهای الکتریکی مانند مقاومت، عناصر واقعی هستند بنابراین جزء حقیقی همیشه مثبت است.

نکته

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

■ **اعداد مختلط (Complex)**: اگر عددی مانند $Z=a+jb$ را درنظر 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 به‌صورت $j3$ نوشته شود، j عامل موهومی و ۳ 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.

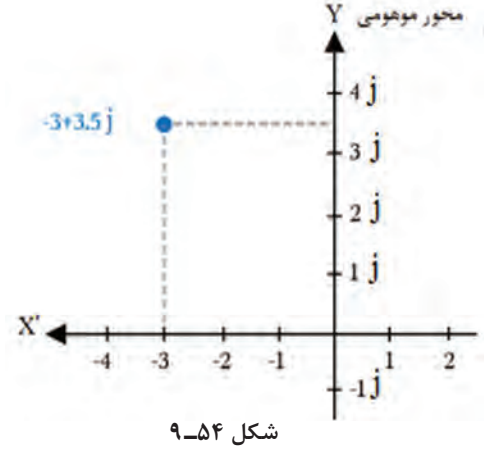
■ **نمایش اعداد مختلط:** با توجه به اینکه اعداد مختلط دارای دو جزء حقیقی و موهومی است، باید جزء موهومی و حقیقی را روی محورهای مختصات نشان دهیم. مثلاً $Z=3+j2$ را در نظر بگیرید. برای نشان دادن این عدد باید جزء حقیقی آن یعنی $a=3$ را روی محور X و عدد موهومی آن یعنی $j2$ را روی محور قائم ترسیم کنیم، ($b=2$). ترسیم این اعداد روی محورهای مختصات نشان داده شده است، شکل ۹ـ۵۳.



شکل ۹ـ۵۳

مثال ۲۲ـ 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 ۳- است، به اندازه ۳ واحد روی محور X در جهت منفی انتخاب می‌کنیم، اندازه عدد موهومی برابر با ۳/۵ است، لذا ۳/۵ واحد روی محور Y انتخاب می‌کنیم و محل b را تعیین می‌کنیم. از دو نقطه به‌دست 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 ۹ـ۵۴.



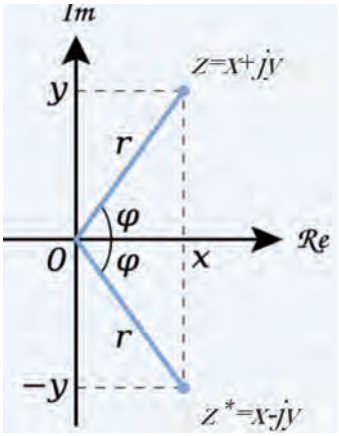
شکل ۹ـ۵۴

فعالیت

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

$Z_1=-5-j2$ $Z_2=-3+j1$ $Z_3=+2+j3$

■ **اندازه (مقدار، قدر مطلق ـ Modulus) و زاویه عدد مختلط:** عدد مختلط $Z=x+jy$ را در نظر بگیرید. در شکل ۹ـ۵۵ روی محورهای مختصات مقادیر x و y را نشان داده‌ایم. قدرمطلق عدد مختلط برابر با طول بردار یا مقدار Z است، که آن را با $|Z|$ نشان می‌دهند. زاویه φ با توجه به زاویه بردار عدد مختلط با محور افقی بیان می‌شود.



شکل ۹ـ۵۵

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 $|Z|=\sqrt{x^2+y^2}$ به‌دست می‌آید. زاویه φ را فاز عدد مختلط گویند که از رابطه $\tan\varphi=\frac{y}{x}=\frac{\text{مقدار موهومی}}{\text{مقدار حقیقی}}$ به‌دست می‌آید.

مثال ۲۳ـ اندازه (دامنه یا مدول) و زاویه عدد مختلط $Z=3+j4$ را به‌دست آورید.

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

بحث کنید

درصورتی‌که 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؟

فعالیت

اندازه و زاویه اعداد مختلط زیر را به‌دست 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 به‌صورت سری قرار گیرد، با توجه به اینکه در سیم‌پیچ و خازن، جریان و ولتاژ با هم ۹۰ درجه اختلاف فاز دارد می‌توانیم مقدار را با استفاده از اعداد مختلط به‌دست آوریم. در این حالت با توجه به رابطه $Z=a+jb$ می‌توانیم به جای مقدار a مقاومت و به‌جای b مقدار X_C یا X_L را قرار دهیم. در این حالت رابطه به‌صورت $Z=R+jX_L$ یا $Z=R-jX_C$ درمی‌آید.

فکر کنید

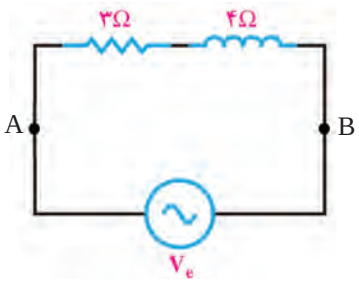
چرا در رابطه $Z=R-jX_C$ ضریب j برابر ۱- است؟ می‌خواهیم با حل مثال‌هایی، کاربرد اعداد مختلط در این نوع مدارها را آموزش دهیم.

مثال ۲۴ـ امپدانس مدار شکل ۵۶ـ۹ که یک RL سری است را با استفاده از اعداد مختلط محاسبه کنید.

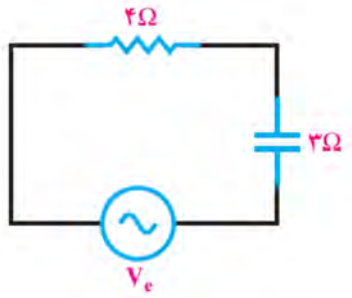
حل: R و X_L با هم سری هستند لذا با استفاده از اعداد مختلط مقدار امپدانس کل مدار از رابطه $Z_{AB}=3+j4$ به‌دست می‌آید. در این رابطه $R=a=3\Omega$ و $X_L=b=4\Omega$ است.

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

در محاسبه Z_{AB}، مقدار X_L برابر با عدد ۴ است. علامت حاصل از j۴ مشخص‌کننده زاویه پیش‌فاز یا پس‌فاز است.



شکل ۵۶ـ۹ـ مدار RL سری



شکل ۵۷ـ۹ـ مدار RC سری

مثال ۲۵ـ امپدانس مدار شکل ۵۷ـ۹ را که یک مدار RC سری است با استفاده از اعداد مختلط محاسبه کنید.

حل: با استفاده از اعداد مختلط رابطه امپدانس را می‌نویسیم، $Z=a-jb$. مقدار قدر مطلق Z برابر است با:

$$Z=\sqrt{۴^۲+۳^۲}=\sqrt{۲۵}=۵$$

مثال ۲۶ـ در مثال ۲۴ و ۲۵ مقدار اختلاف فاز φ را به‌دست آورید.

حل: با توجه به رابطه $\tan\varphi=\frac{b}{a}$ مقدار φ را محاسبه می‌کنیم.

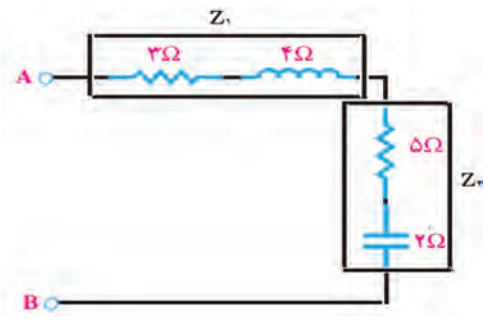
در مثال ۲۴ مقدار تانژانت زاویه $\varphi_۱$ را محاسبه می‌کنیم. $\tan\varphi_۱=\frac{X_L}{R}=\frac{۴}{۳}=۱/۳۳$، با استفاده از ماشین‌حساب زاویه $\varphi_۱$ را به‌دست می‌آوریم، $\varphi_۱=۵۶/۳^\circ$. علامت مثبت نشان‌دهنده این است که ولتاژ کل مدار به اندازه $\varphi_۱$ از ولتاژ دو سر مقاومت جلوتر است. به عبارت دیگر، ولتاژ دو سر مقاومت به اندازه زاویه $\varphi_۱$ از ولتاژ کل مدار عقب‌تر یا پس‌فاز است.

در مثال ۲۵ مقدار تانژانت زاویه $\varphi_۲$ را محاسبه می‌کنیم. $\tan\varphi_۲=\frac{-X_C}{R}=\frac{-۳}{۴}=-۰/۷۵$، با استفاده از ماشین‌حساب زاویه $\varphi_۲$ را به‌دست می‌آوریم، $\varphi_۲=-۳۷^\circ$. علامت منفی نشان‌دهنده این است که ولتاژ کل مدار از ولتاژ دو سر مقاومت عقب‌تر است. به عبارت دیگر، ولتاژ دو سر مقاومت به اندازه ۳۷ 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 امپدانس‌ها به‌کار می‌رود. در فرایند جمع اعداد مختلط، قسمت‌های حقیقی با هم و قسمت‌های موهومی با هم به‌صورت جداگانه جمع جبری می‌شوند. در فرایند تفریق، عدد مختلطی که باید تفریق شود را در یک علامت منفی ضرب می‌کنیم سپس عمل جمع را انجام می‌دهیم.

☑ **جمع اعداد مختلط**

مثال ۲۷ـ در مدار شکل ۵۸ـ۹، الف) امپدانس $Z_۱$، ب) امپدانس $Z_۲$، پ) امپدانس کل دو سر A و B را محاسبه کنید.



شکل ۵۸ـ۹

حل: الف) امپدانس $Z_۱$ را برحسب اعداد مختلط می‌نویسیم. $Z_۱=۳+j۴$.

ب) امپدانس $Z_۲$ را نیز برحسب اعداد مختلط می‌نویسیم. $Z_۲=۵-j۲$.

پ) امپدانس‌های $Z_۱$ و $Z_۲$ را با هم جمع می‌کنیم و امپدانس‌ها را جایگزین می‌کنیم.

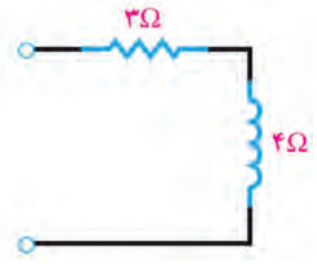
پس از جایگزینی، مقادیر موهومی را با هم و مقادیر حقیقی را با هم جمع می‌کنیم.

$$Z_{AB}=Z_۱+Z_۲=(۳+j۴)+(۵-j۲)=(۳+۵)+j(۴-۲)=۸+j۲$$

مثال ۲۸ــ با استفاده از مقادیر مربوط به امپدانس‌های $Z_۱$، $Z_۲$ و $Z_۳$، نقشه مدار را با ذکر مقادیر آن رسم کنید.

الف) $Z_۱=۳+j۴$، ب) $Z_۱=۵-j۵$ و پ) $Z_۳=Z_۱+Z_۲$ است.

حل: الف) چون علامت j مثبت است پس مدار سلفی بوده و جزء حقیقی آن ۳ و اندازه موهومی آن ۴ است، شکل ۵۹ـ۹.



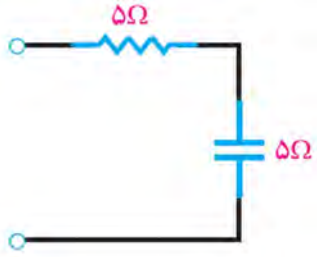
شکل ۵۹ــ۹ــ مدار معادل $Z_۱$

ب) چون علامت j منفی است پس مدار خازنی است، شکل ۶۰ـ۹.

پ) برای محاسبه $Z=Z_۱+Z_۲$ مقادیر $Z_۱$ و $Z_۲$ را در رابطه جایگزین می‌کنیم، شکل الف ۶۱ـ۹.

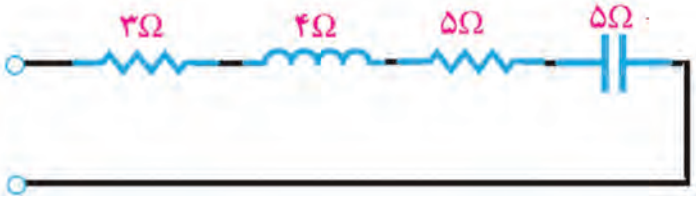
$$Z=Z_۱+Z_۲=۳+j۴+۵-j۵$$

سپس اجزای حقیقی و موهومی را با هم جمع می‌کنیم، $Z=۸-j\ ۱$، شکل ب ۶۱ـ۹.

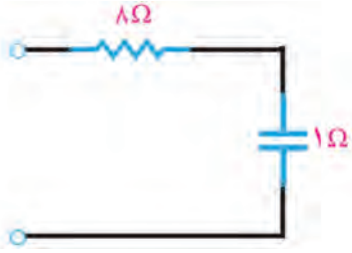


شکل ۶۰ــ۹ــ مدار معادل $Z_۲$

برای ترسیم مدار نیز ابتدا $Z_۱$ و $Z_۲$ را به‌صورت تفکیک شده رسم می‌کنیم، سپس مدار معادل آن را به‌دست می‌آوریم در شکل الف ـ۶۱ـ۹ مدار ترکیبی تفکیک شده و در شکل ب ـ۶۱ـ۹ مدار معادل ترسیم شده است.



الف) مدار ترکیبی تفکیک شده $Z_۱+Z_۲$



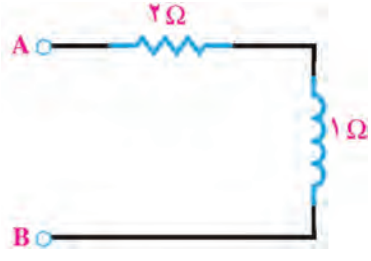
ب) مدار معادل $Z_۳$

شکل ۶۱ـ۹

☑ **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 ۲۹ــ دو عدد مختلط $Z_۱=۶+j۳$ و $Z_۲=۴+j۲$ را به‌صورت $Z_۱-Z_۲$ از هم تفریق کنید.

حل: در رابطه $Z_۱-Z_۲$، مقادیر عدد مختلط را جایگزین می‌کنیم، $Z=(۶+j۳)-(۴+j۲)$ سپس علامت منفی را در عبارت دوم ضرب می‌کنیم و عبارت را جزء به جزء با هم جمع می‌کنیم. $Z=۶+j۳-۴-j۲=۲+j۱$، مدار معادل به‌صورت شکل ۶۲ـ۹ درمی‌آید.



شکل ۶۲ـ۹

الگوی پرسش:

۱ـ 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.

۲ـ اگر $Z_1=4+j6$، $Z_2=6-j3$ و $Z_3=2+j3$ باشد،

الف) امپدانس‌های زیر را محاسبه کنید.

$Z_4=Z_1+Z_2+Z_3$ $Z_5=Z_1+Z_2-Z_3$ $Z_6=Z_1+Z_3$

$Z_7=Z_2+Z_3$ $Z_8=Z_2-Z_3$ $Z_9=Z_2-Z_1$ $Z_{10}=Z_1-Z_2-Z_3$

ب) با توجه به علامت ضریب موهومی j ، 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.

فکر کنید

☐ 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 درحاصل تفریق دو عدد مختلط، جزء حقیقی منفی شود، چه مفهومی دارد؟ آیا برای آن می‌توان مدار معادل رسم کرد؟

☑ **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.

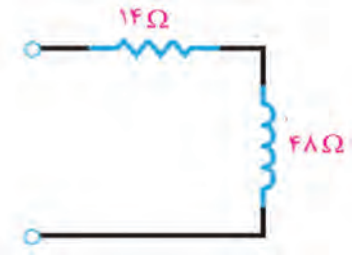
مثال ۳۰ـ اگر $Z_1=4+j3$ و $Z_2=8+j6$ باشد مقدار $Z=Z_1.Z_2$ را به‌دست آورید و مدار معادل Z را رسم کنید.

حل: ابتدا دو عبارت را درهم ضرب می‌کنیم.

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

سپس عبارت را ساده می‌کنیم. $Z=32+j48+(-1)(18)=14+j48$

چون ضریب j مثبت است، پس امپدانس $Z=14+j48$ معادل مدار RL است، شکل ۹ـ۶۳.



شکل ۹ـ۶۳

بحث گروهی

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

☐ **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.

پژوهش

آیا تعریف مزدوج یک عدد مختلط با بردارهای شکل ۹ـ۵۵ انطباق دارد؟ توضیح دهید.

مثال ۳۱ـ 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.

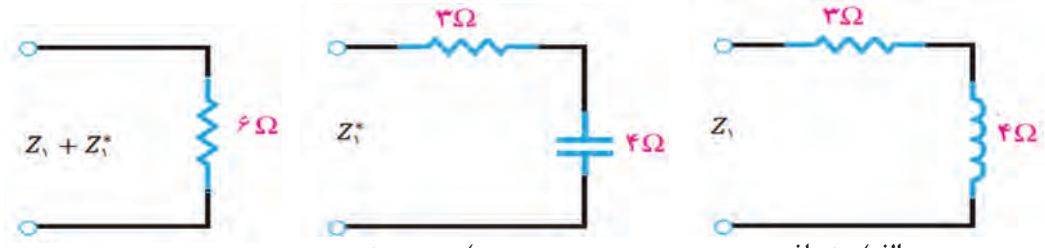
ب) حاصل جمع $Z_1+Z_1^*$ را به‌دست آورید.

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

حل: الف) مزدوج $Z_1^*=(3+j4)^*=3-j4$

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

پ) رسم مدارهای مرتبط با مزدوج اعداد مختلط، (شکل ۶۴ـ۹).



الف) Z_1 سلفی — ب) مزدوج Z_1 — پ) جمع Z_1 با مزدوج آن

شکل ۶۴ـ۹

بحث کنید

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

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

مثال ۳۲ـ 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 می‌کنیم.

$(a+b)(a-b)=a^2-b^2$ و $(a+b)(a+c)=a^2+ac+ba+bc$

حل:

ـ عبارت تقسیم را به‌صورت کسری می‌نویسیم.

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

ـ صورت و مخرج کسر را در مزدوج مخرج ضرب می‌کنیم

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

ـ عبارت به‌دست آمده را ساده می‌کنیم. توجه داشته باشید $j^2=-1$ و $-j^2=1$ می‌شود.

$$Z=\frac{12-j9+j16+12}{16+9}=\frac{24+j7}{25}=\frac{24}{25}+j\frac{7}{25}$$

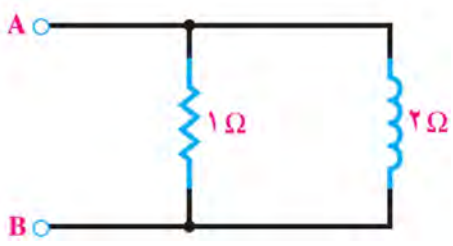
ـ عبارت حاصل می‌تواند به‌صورت کسر بالا باشد یا به‌صورت اعشاری زیر ساده شود.

$Z=0/96+j0/28$

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 ۳۳ـ امپدانس مدار معادل دو سر A و B را در شکل ۹ـ۶۵ محاسبه کنید و مدار معادل سری را رسم کنید.



شکل ۹ـ۶۵

حل:

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

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

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

☑ 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 ۹ـ۶۶ خواهد بود.

مثال ۳۴ـ امپدانس مدار معادل را در دو سر A و B در شکل ۹ـ۶۷ محاسبه کنید و مدار معادل سری آن‌را رسم کنید.

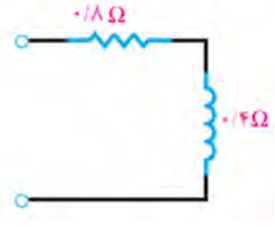
حل: محاسبات مشابه مثال قبل که مدار RL موازی بود، انجام می‌شود. با این تفاوت که در این مثال مدار به‌صورت RC موازی است.

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

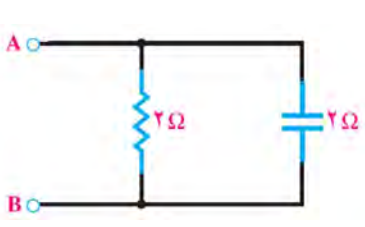
صورت و مخرج Z_{AB} را در مزدوج مخرج ضرب کرده و عبارت را ساده می‌کنیم.

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

مدار معادل سری مشابه شکل ۹ـ۶۸ خواهد بود.



شکل ۹ـ۶۶ـ مدار RL سری



شکل ۹ـ۶۷ـ مدار RC موازی

شکل ۹ـ۶۸ـ مدار RC سری

نکات مهم و ضروری:

☐ اگر مدار امپدانسی به‌صورت RL باشد، مزدوج آن RC واگر به‌صورت 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 می‌شود.

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

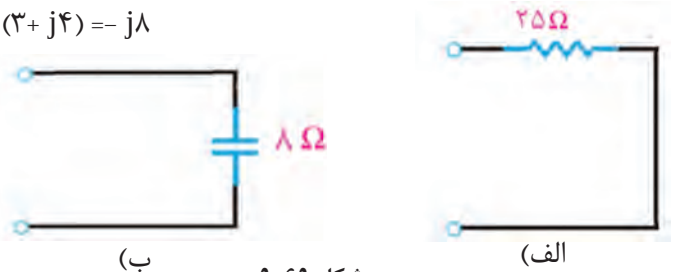
مثال ۳۵ـ اگر $Z=3-j4$ باشد، الف) مقدار $Z = Z.\ Z^*$ ب) $Z = Z - Z^*$ را محاسبه کنید.

حل: الف) شکل الف ۶۹ ـ ۹

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

ب) شکل ب ۶۹ ـ ۹

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



الف) ب)

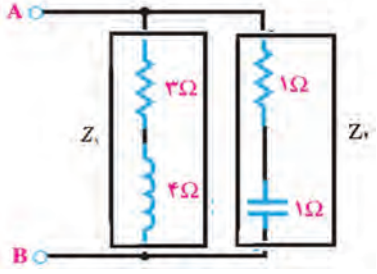
شکل ۶۹ـ۹

■ 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 می‌شود.

مثال ۳۶ـ امپدانس معادل مدار شکل ۷۰ـ۹ را از دو سر A و B محاسبه کنید و مدار معادل ساده شده را رسم کنید.

حل: برای حل مسئله ابتدا امپدانس شاخه‌های Z_1 و Z_2 را نوشته و سپس رابطه مربوط به مقاومت معادل در مدارهای موازی را می‌نویسیم.



شکل ۷۰ـ۹

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

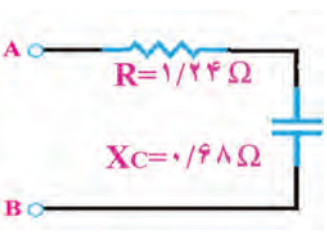
رابطه را ساده می‌کنیم.

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

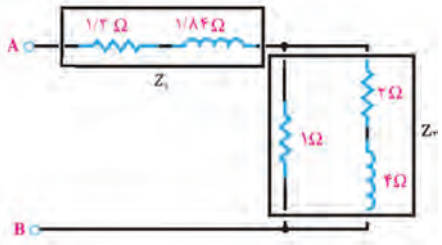
صورت و مخرج را در مزدوج مخرج ضرب می‌کنیم. سپس رابطه را مانند مراحل قبل به ساده‌ترین شکل خود درمی‌آوریم.

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

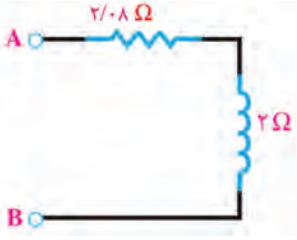
مدار معادل آن مشابه شکل ۹ـ۷۱ خواهد شد که RC است.



شکل ۹ـ۷۱



شکل ۹ـ۷۲



شکل ۹ـ۷۳

فعالیت گروهی

در مدار شکل ۹ـ۷۲ امپدانس را از دو سر A و B محاسبه کرده‌ایم ومدار معادل آن را در شکل ۹ـ۷۳ رسم کرده ایم. راه‌حل ارائه شده را به بحث بگذارید و روش حل مسئله را بررسی کنید و ببینید پاسخ‌ها صحیح است یا خیر؟

حل مدار شکل ۹ـ۷۲:

$Z_1 = 1/2 + j1/84$

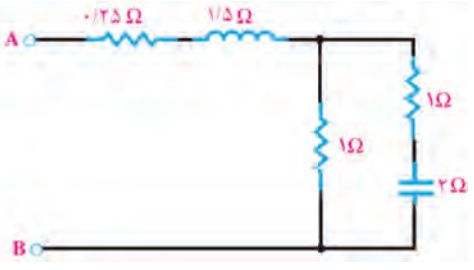
$$Z_2 = \frac{1(2+j4)}{1+(2+j4)} = \frac{2+j4}{3+j4} = \frac{(2+j4)(3-j4)}{(3+j4)(3-j4)} = \frac{22+j4}{25} = 0/88 + j\ 0/16$$

$Z_{AB} = Z_1 + Z_2 = (1/2 + j1/84) + (0/88 + j0/16) = 2/08 + j2$

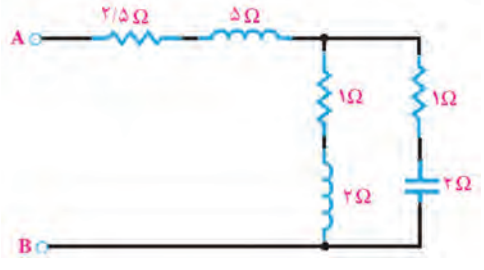
الگوی پرسش:

۱ـ در مدار شکل ۹ـ۷۴ امپدانس دو سر A و B را محاسبه کنید و مدار معادل ساده شده را رسم کنید.

۲ـ امپدانس دو سر A و B در مدار شکل ۹ـ۷۵ را محاسبه نموده و سپس مدار معادل ساده شده را رسم کنید.



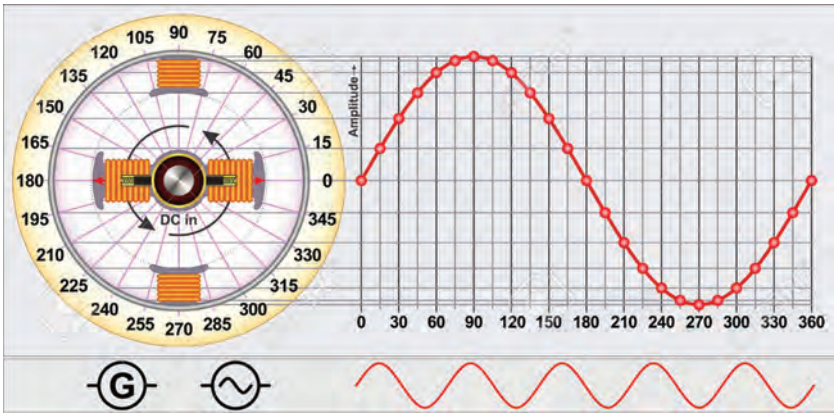
شکل ۹ـ۷۴



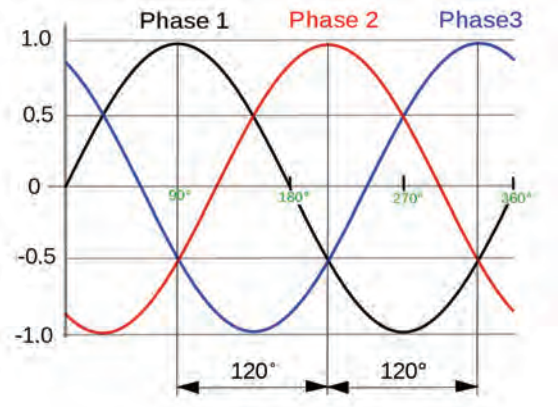
شکل ۹ـ۷۵

۸ـ۹ـ تشریح مدار تک‌فاز و سه‌فاز و محاسبه کمیت‌های آن

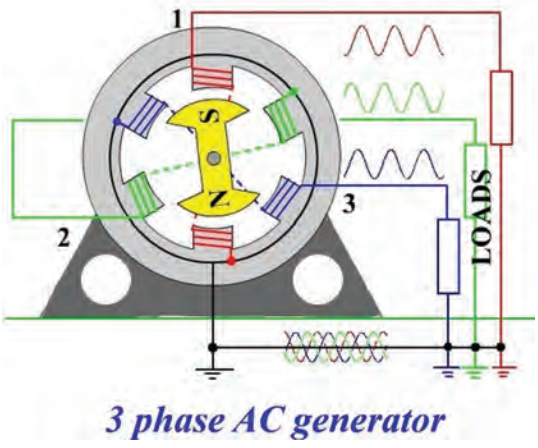
برق تک‌فاز دارای دو رشته سیم است که یکی فاز با ولتاژ ۲۲۰ ولت نسبت به سیم نول و دیگری سیم نول با ولتاژ صفر ولت نسبت به زمین است. در شکل ۷۶ـ۹ ژنراتور مولد موج سینوسی تک‌فاز نشان داده شده است. جریان یا ولتاژ سه‌فاز از سه موج سینوسی تشکیل می‌شود که به‌طور هم‌زمان تولید می‌شوند و با هم ۱۲۰ درجه اختلاف فاز زمانی دارند.در شکل ۷۷ـ۹ منحنی جریان یا ولتاژ سه‌فاز را مشاهده می‌کنید. در شکل ۷۸ـ۹ مولد سه‌فاز نشان داده شده است. در شکل۷۹ـ۹ اتصال بار به‌صورت تک‌فاز و سه‌فاز نشان داده شده است.



شکل ۷۶ـ۹ـ موج تک‌فاز



شکل ۷۷ـ۹ـ جریان یا ولتاژ متناوب سه‌فاز

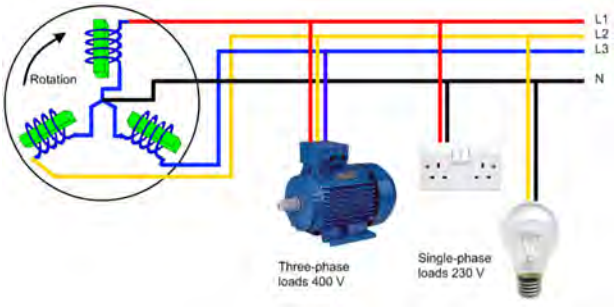


شکل ۷۸ـ۹ـ مولد سه‌فاز

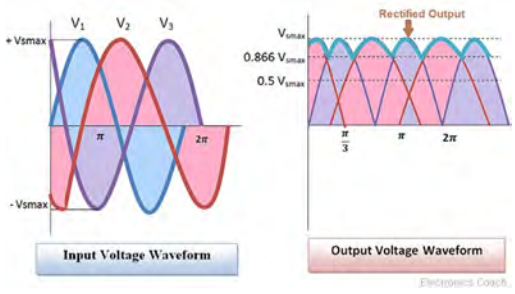
■ **مزایای جریان سه‌فاز نسبت به تک‌فاز:** ساختمان ساده مولدهای جریان متناوب سه‌فاز موجب شده است که انرژی الکتریکی سه‌فاز، راحت‌تر و ارزان‌تر تولید شود. مزایای دیگر جریان سه‌فاز نسبت به تک‌فاز عبارت‌اند از:

☐ توان الکتریکی در مصرف‌کننده‌های سه‌فاز هیچ‌وقت صفر نمی‌شود زیرا با توجه به شکل ۷۷ـ۹ وقتی در یکی از فازها دامنه جریان یا ولتاژ صفر است مصرف‌کننده از دو فاز دیگر انرژی می‌گیرد.

☐ ضربان موج یکسو شده سه‌فاز نسبت به موج یکسو شده تک‌فاز بسیار کمتر است، شکل ۸۰ـ۹.



شکل ۷۹ـ۹ـ اتصال بار به‌صورت تک‌فاز و سه‌فاز



شکل ۸۰ـ۹ـ موج یکسو شده سه‌فاز

☐ راه‌اندازی موتورهای سه‌فاز نسبت به تک‌فاز راحت‌تر است.

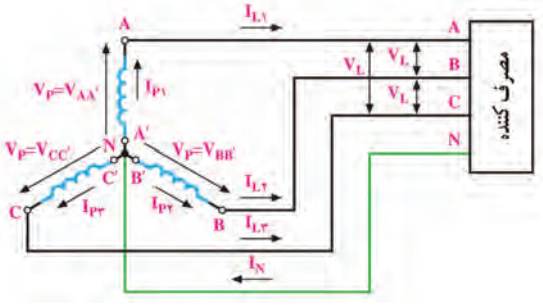
پژوهش

درباره مزایای سه‌فاز نسبت به تک‌فاز تحقیق کنید و نتایج آن را در قالب یک گزارش ارائه دهید.

■ انتقال انرژی تولیدشده سه‌فاز به مصرف‌کننده‌ها:

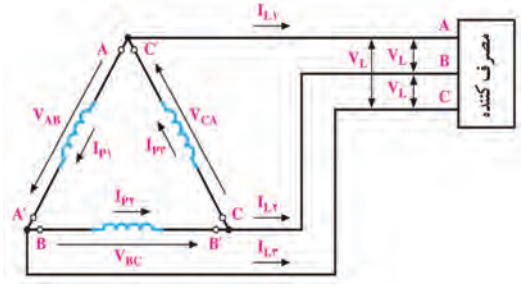
در مولدهای سه‌فاز، سه گروه سیم‌پیچ وجود دارد که در داخل ماشین ۱۲۰ درجه نسبت به یکدیگر اختلاف فاز مکانی دارند. دو انتهای این سیم‌پیچ‌ها را به ترتیب با AA'، BB' و CC' نشان می‌دهند. سیم‌پیچ‌ها با دو روش ستاره و مثلث به هم متصل می‌شوند، همچنین انرژی تولید شده در این سیم‌پیچ‌ها نیز با دو روش ستاره و مثلث به شبکه مصرف‌کننده انتقال می‌یابند.

☑ **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 می‌شود که آن را سیم نول می‌نامند. در تولید برق صنعتی در نیروگاه‌ها، با زمین‌کردن این سیم، اختلاف پتانسیل آن را با زمین یکی می‌کنند و آن را سیم نول می‌نامند و با MP یا N نشان می‌دهند. سیم‌های A، B و C را به ترتیب R، S و T یا R، Y و B یا L_1، L_2 و L_3 نام‌گذاری می‌کنند. شکل ۸۱ـ۹ این اتصال را نشان می‌دهد. اتصال ستاره را با نماد Y یا λ نشان می‌دهند.



شکل ۸۱ـ۹ـ اتصال ستاره، انتقال چهارسیمه

☑ **اتصال مثلث:** در این روش مطابق شکل ۸۲ـ۹ انتهای سیم‌های AA'، BB' و CC' را به‌صورت مثلث به هم وصل می‌کنند و انرژی تولیدی را با سه سیم A، B و C به مصرف‌کننده می‌رسانند.

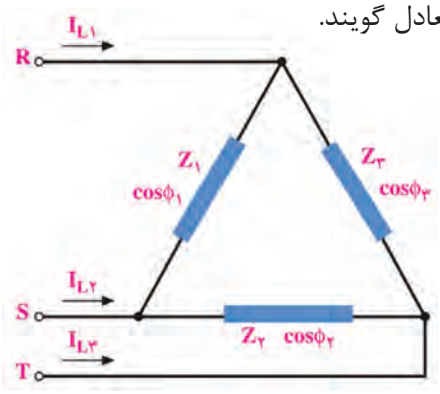


شکل ۸۲ـ۹ـ اتصال مثلث، انتقال سه سیمه

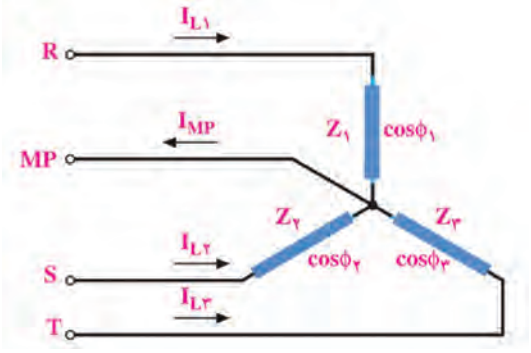
☑ **ولتاژ فازی و جریان فازی:** ولتاژ دو سر هر یک از سیم‌پیچ‌های AA'، BB' و CC' را ولتاژ فازی می‌گویند و آن را با V_P نشان می‌دهند. جریان عبوری از داخل هر سیم‌پیچ را جریان فازی گویند و آن را با I_P نشان می‌دهند، (شکل ۸۱ـ۹ و ۸۲ـ۹).

☑ **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 ۸۱ـ۹ و ۸۲ـ۹).

☑ **بار متعادل و بار نامتعادل:** سه امپدانس Z_1، Z_2 و Z_3 را با اتصال مثلث یا ستاره مانند شکل‌های ۸۳ـ۹ و ۸۴ـ۹ به شبکه سه‌فاز وصل می‌کنیم. اگر همه مشخصه‌های امپدانس Z_1، Z_2 و Z_3 از نظر، دامنه، زاویه فاز، پس‌فاز یا پیش‌فاز بودن با هم برابر باشند، شبکه سه‌فاز را با بار متعادل گویند. اگر یکی از مشخصه‌ها مثلاً دامنه، زاویه فاز، پس‌فاز و پیش‌فاز بودن در هر امپدانس با هم تفاوت داشته‌باشد، بار شبکه سه‌فاز را بار نامتعادل گویند.

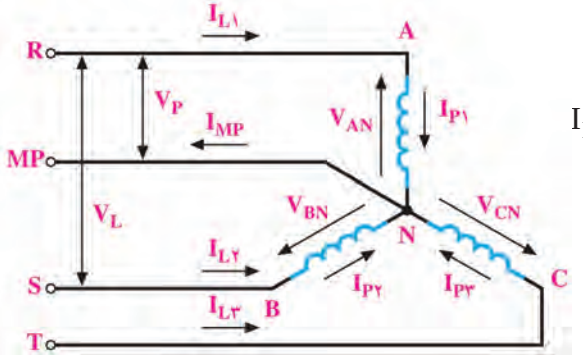


شکل ۸۳ـ۹ـ اتصال مثلث



شکل ۸۴ـ۹ـ اتصال ستاره

☑ **روابط در اتصال ستاره با بار متعادل:** در شکل ۸۵ـ۹ چون بارها متعادل هستند، جریان دریافتی از شبکه نیز با هم برابرند.



شکل ۸۵ـ۹ـ بار متعادل با اتصال ستاره

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

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

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

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

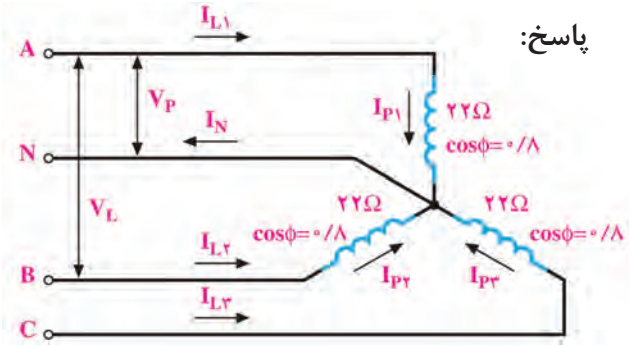
نتیجه: در اتصال ستاره با بار متعادل $\lambda \begin{cases} I_L = I_P \\ V_L = \sqrt{3}\, V_P \end{cases}$

مثال ۱۶ــ در شکل ۸۶ـ۹ ولتاژ خط $V_L=۳۸۰V$ و بار متعادل است . مطلوب است محاسبه جریان هر فاز و هر خط

پاسخ:

$$V_L=\sqrt{۳}V_P \Rightarrow V_P=\frac{V_L}{\sqrt{۳}}=\frac{۳۸۰}{\sqrt{۳}}\cong ۲۲۰\,V$$

$$I_L=I_P=\frac{V_P}{Z}=\frac{۲۲۰}{۲۲}=۱۰\,A$$

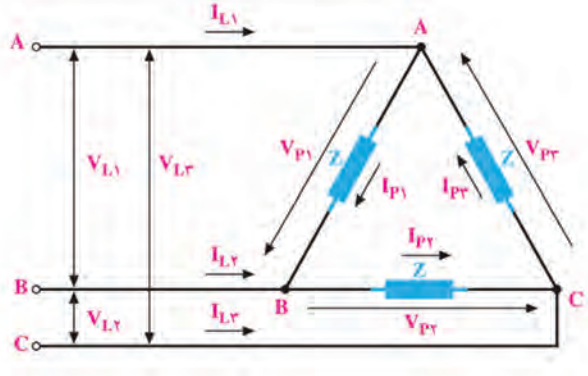


شکل ۸۶ـ۹ـ بار متعادل با اتصال ستاره

$$I_{P_۱}=I_{P_۲}=I_{P_۳}=I_{L_۱}=I_{L_۲}=I_{L_۳}=۱۰\,A$$

پژوهش

تحقیق کنید و اثبات نمایید که جریان عبوری از سیم نول در مدار شکل ۸۶ـ۹ صفر است. نتیجه را در قالب یک گزارش ارائه دهید.



شکل ۸۷ـ۹ـ بار متعادل با اتصال مثلث

☑ **روابط در اتصال مثلث با بار متعادل:** در شکل ۸۷ـ۹ اتصال مثلث با بار متعادل رسم شده است.

☐ ولتاژهای فازی و خطی با هم برابرند. ولتاژ هر فاز به‌صورت $V_{AB}=V_{BC}=V_{CA}$ است.

☐ بنابراین $V_{AB}=V_{BC}=V_{CA}=V_L=V_P$

☐ جریان هر فاز $I_{P_۱}=I_{P_۲}=I_{P_۳}=I_P$

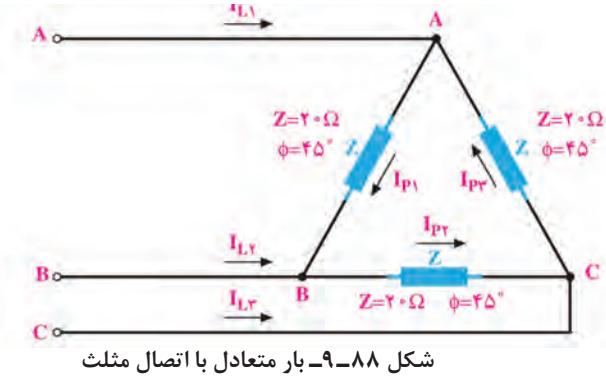
جریان هر خط $I_{L_۱}=I_{L_۲}=I_{L_۳}=I_L$

☐ رابطه بین جریان فاز و جریان خط: $I_L=\sqrt{۳}I_P$

نتیجه: در اتصال مثلث با بار متعادل

$$\Delta\begin{cases}V_P=V_L\\ I_L=\sqrt{۳}\,I_P\end{cases}$$

مثال ۱۷ــ در شکل ۸۸ـ۹ ولتاژ خط $V_L=۱۰۰V$ و بار متعادل است. مطلوب است محاسبه جریان هر فاز و هر خط



شکل ۸۸ـ۹ـ بار متعادل با اتصال مثلث

پاسخ:

$$V_L=V_P=۱۰۰\,V$$

$$I_{P_۱}=\frac{V_{P_۱}}{Z_۱}=\frac{۱۰۰}{۲۰}=۵\,A$$

$$I_{L_۱}=I_{L_۲}=I_{L_۳}=\sqrt{۳}\times ۵=۸/۶۶\,A$$

کار با نرم‌افزار در ساعات غیردرسی: مدار اتصال بار متعادل به‌صورت ستاره و مثلث را در نرم‌افزار مولتی سیم شبیه‌سازی کنید و ولتاژ و جریان خطی و فازی را اندازه بگیرید و نتایج را با اطلاعات کسب شده مقایسه کنید.

پژوهش

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

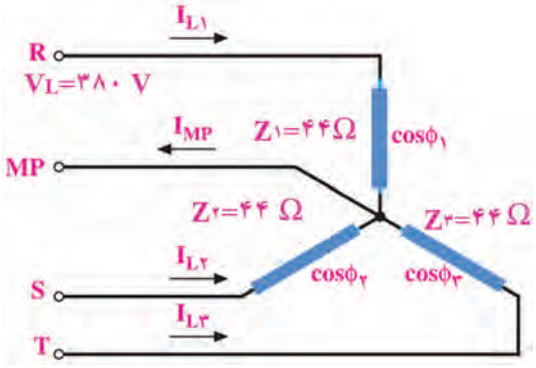
الگوی پرسش:

۱ـ در اتصال بار متعادل به‌صورت ستاره به شبکه سه‌فاز، جریان خطی (I_L) چه رابطه‌ای 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) $I_L = 2 I_P$

۲ـ در اتصال بار متعادل به‌صورت مثلث به شبکه سه‌فاز، رابطه ولتاژ خطی V_{AB} و ولتاژ V_P به‌صورت ..... است.

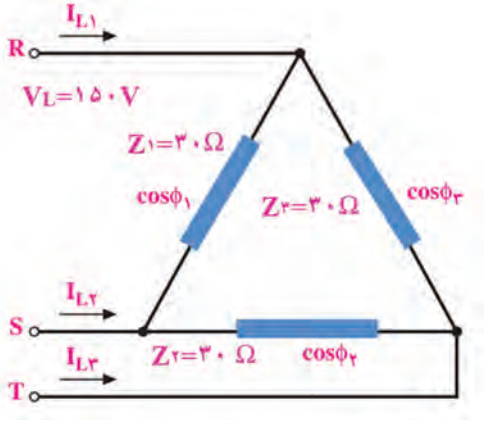


شکل ۸۹ـ۹ـ بار متعادل ستاره

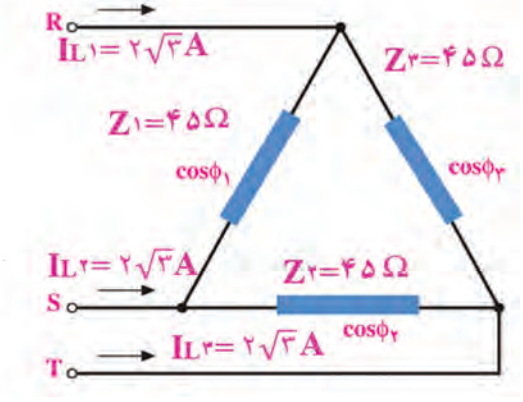
۳ـ در شکل ۸۹ـ۹ ولتاژ خط V_L=۳۸۰V و بار متعادل است. مطلوب است محاسبه جریان هر فاز و هر خط

۴ـ در شکل ۹۰ـ۹ ولتاژ خط V_L=۱۵۰V و بار متعادل است. مطلوب است محاسبه جریان هر فاز و هر خط

۵ـ در بار متعادل شکل ۹۱ـ۹ جریان و ولتاژ هر فاز و ولتاژ هر خط را محاسبه کنید.



شکل ۹۰ـ۹ـ بار متعادل مثلث



شکل ۹۱ـ۹

آزمون نظری پایان واحد یادگیری

۱ـ در یک مدار شامل خازن، اگر فرکانس منبع جریان متناوب افزایش یابد، راکتانس خازنی افزایش می‌یابد.

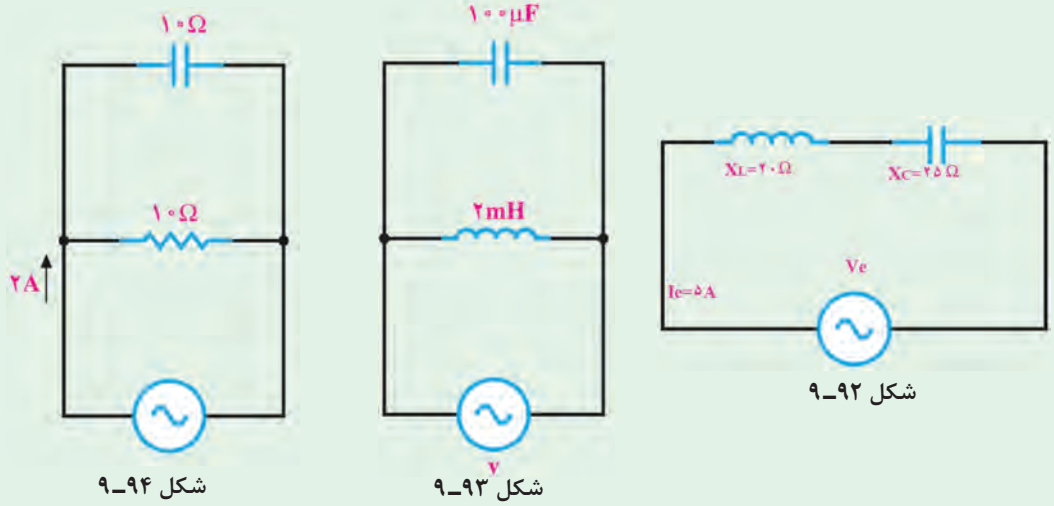
صحیح ☐ غلط ☐

۲ـ در مدار شکل ۹ـ۹۲ امپدانس مدار و ولتاژ مؤثر مدار را محاسبه کنید.

۳ـ در شکل ۹ـ۹۳ 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؟

۴ـ در مدار شکل ۹ـ۹۴ امپدانس مدار و ولتاژ مؤثر منبع را محاسبه کنید.



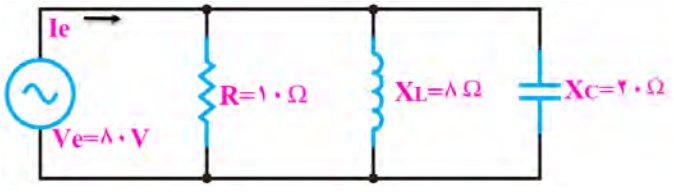
شکل ۹ـ۹۲

شکل ۹ـ۹۳

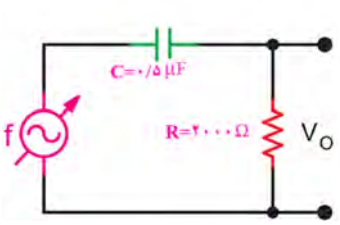
شکل ۹ـ۹۴

۵ـ در مدار شکل ۹ـ۹۵ ابتدا جریان هر شاخه را نام‌گذاری کنید، سپس جریان هر شاخه، جریان کل مدار و امپدانس کل را محاسبه کنید.

۶ـ نوع فیلتر شکل ۹ـ۹۶ را بنویسید و فرکانس قطع آن را محاسبه کنید.



شکل ۹ـ۹۵



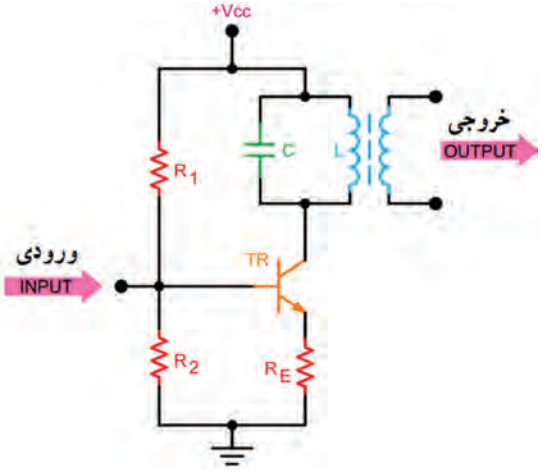
شکل ۹ـ۹۶

۷ـ مدار یک فیلتر حذف باند را رسم کنید و فرمول فرکانس رزونانس و پهنای باند آن را بنویسید.

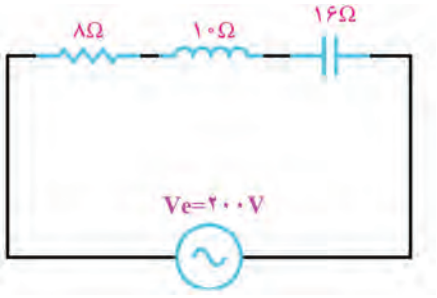
۸ـ نوع فیلتر به‌کار رفته در شکل ۹ـ۹۷ کدام گزینه است؟

الف) بالاگذر ب) پایین‌گذر پ) میان‌گذر ت) میان‌نگذر

۹ـ در شکل ۹ـ۹۸ امپدانس و جریان کل مدار را با استفاده از اعداد مختلط محاسبه کنید.



شکل ۹ـ۹۷



شکل ۹ـ۹۸

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

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

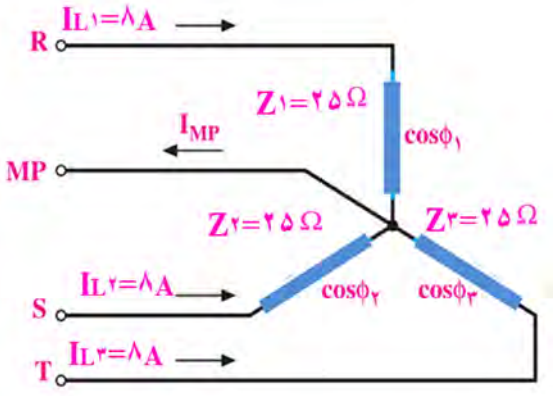
۱۱ـ در اتصال بار متعادل به‌صورت مثلث کدام گزینه صحیح است؟

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

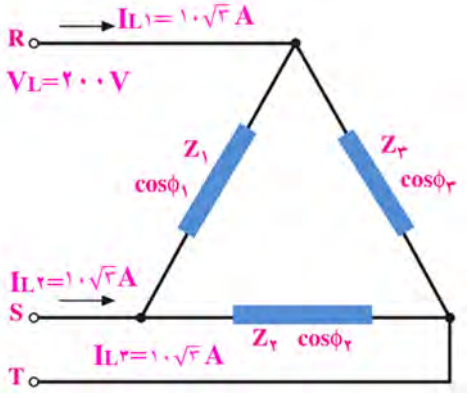
۱۲ـ مزایای برق سه‌فاز را در مقایسه با تک‌فاز بنویسید.

۱۳ـ در شکل ۹ـ۹۹ جریان و ولتاژ هر یک از فازها و خط‌ها را محاسبه کنید، (بار متعادل است).

۱۴ـ در شکل ۹ـ۱۰۰ با توجه به متعادل بودن بارها، مقدار جریان، ولتاژ و امپدانس هر فاز را محاسبه کنید.



شکل ۹ـ۹۹



شکل ۹ـ۱۰۰

ارزشیابی واحد یادگیری ۹: کسب شایستگی در تحلیل انواع فیلترها، نوسان‌سازها و مدارهای تک‌فاز و سه‌فاز ساده

شرح کار:
۱ـ تشریح مدارهای RL و RC سری و موازی و حل مسائل آن ۲ـ تشریح مدارهای RL و RC به‌عنوان فیلتر و حل مسائل آن ۳ـ تشریح مدارهای RLC سری و موازی و حل مسائل آن ۴ـ تشریح مدارهای فیلتر عبور باند و حذف باند و حل مسائل آن ۵ـ استفاده از اعداد مختلط برای حل مسائل جریان متناوب ۶ـ مدارهای تک‌فاز و سه‌فاز و حل مسائل آن

استاندارد عملکرد:
تحلیل انواع فیلترها و مدارهای تک‌فاز و سه‌فاز و مدل‌سازی تقویت‌کننده و بررسی مدار نوسان‌ساز

شاخص‌ها:
تشریح مدارهای RL و RC سری و موازی و حل مسائل آن (۱۰ دقیقه) ۲ـ تشریح مدارهای RL و RC به‌عنوان فیلتر و حل مسائل (۱۰ دقیقه) ۳ـ تشریح مدارهای RLC سری و موازی و حل مسائل آن (۱۵ دقیقه) ۴ـ تشریح مدارهای فیلتر عبور باند و حذف باند و حل مسائل آن (۱۰دقیقه) ۵ـ استفاده از اعداد مختلط برای حل مسائل جریان متناوب (۱۵ دقیقه) ۶ـ مدارهای تک‌فاز و سه‌فاز و حل مسائل آن (۱۰دقیقه)

شرایط انجام کار و ابزار و تجهیزات: کلاس درس یا کارگاه یا سایت مجهز به رایانه ـ نور مناسب ـ ابعاد حداقل ۶ مترمربع و دارای تهویه یا پنجره ـ دمای طبیعی (۲۷°C ـ ۱۸°C) و مجهز به وسایل اطفای حریق ـ رایانه ـ نرم‌افزارهای مرتبط ـ لوازم‌التحریر ـ 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 به‌عنوان 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 تک‌فاز و سه‌فاز و حل مسائل آن	۲	
	شایستگی‌های غیرفنی، ایمنی، بهداشت، توجهات زیست محیطی و نگرش: ۱ـ محافظت از تجهیزات و دستگاه‌ها ۲ـ دقت و مسئولیت پذیری ۳ـ شایستگی تفکر و یادگیری مادام‌العمر ۴ـ اخلاق حرفه‌ای ۵ـ رعایت نکات زیست محیطی ۶ـ به‌کارگیری فناوری نوین ۷ـ مستندسازی	۲	
	میانگین نمرات		*

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

واحد یادگیری ۱۰

کسب شایستگی در تحلیل مدار معادل AC تقویت‌کننده‌های یک طبقه و دو طبقه

آیا تا به‌حال فکر کرده‌اید:

- تحلیل مدار معادل AC تقویت‌کننده یک طبقه و دو طبقهٔ به چه منظوری انجام می‌شود؟
- در تقویت‌کننده امیتر مشترک چگونه می‌توان فیدبک منفی ایجاد کرد؟
- وجود فیدبک منفی چه تأثیری روی مشخصات تقویت‌کننده می‌گذارد؟
- چگونه می‌توان اثر فیدبک منفی را در تقویت‌کننده امیتر مشترک کاهش داد؟
- برای ایجاد نوسان در مدارهای الکترونیکی از کدام اصل وفیدبک باید استفاده کرد؟
- برای تحلیل یک مدارنوسان‌ساز، شناسایی فیلتر برای محاسبه فرکانس رزونانس مدار اهمیت دارد؟

در تحلیل مدارهای تقویت‌کننده نیازبه شناخت رفتار قطعات داریم تا بتوانیم مدار معادل AC تقویت‌کننده را ترسیم و کمیت‌های مدار تقویت‌کننده 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 تقویت‌کننده 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 به‌منظور پایداری نوسان‌ها لازم است نوع فیلتر در نوسان‌سازها مشخص شود تا بتوان فرکانس رزونانس مدار نوسان‌ساز را محاسبه کرد. در این واحد یادگیری با طرح مدارهای ساده تقویت‌کننده یک طبقه و دو طبقه و مدارهای نوسان‌سازها، چگونگی محاسبه کمیت‌های آنها شرح داده می‌شود. همچنین ضرورت دارد تمامی روابط مربوط به آنها به‌صورت 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

مدل‌سازی تقویت کننده و بررسی مدارهای نوسان‌ساز

۱ـ۱۰ـ محاسبات AC در مدارهای الکترونیکی

■ رفتار قطعاتِ مدارِ تقویت‌کننده در سیگنال AC

☑برای اینکه ترانزیستور به‌عنوان تقویت‌کننده عمل کند، باید پس از آنکه ترانزیستور در نقطهٔ کار مناسب (Q) بایاس شد، یک سیگنال AC با دامنه کم (Small Signal) را به ورودی تقویت‌کننده 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.

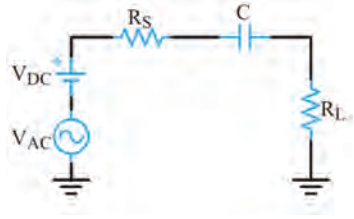
☑چگونگی تقویت سیگنال AC در پایه دهم و یازدهم توضیح داده شده است. در این مبحث به بررسی رفتار قطعاتِ مدارِ تقویت‌کننده در سیگنال AC و DC می‌پردازیم.

☑همان‌طور که گفته شد، عکس‌العمل 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 به‌صورت مدار باز (کلید باز)، و در جریان AC، خازن به‌صورت مدار بسته (کلید بسته) عمل می‌کند.

☑اگر فرکانس خیلی زیاد باشد، با انتخاب ظرفیت مناسب، مقدار X_C بسیار کم می‌شود، به‌طوری که می‌توان آن را تقریباً اتصال کوتاه در نظر گرفت. با توجه به این موضوع، خازن در مدارهای تقویت‌کننده به دو صورت کوپلاژ (Coupling) و بای پاس (By pass) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

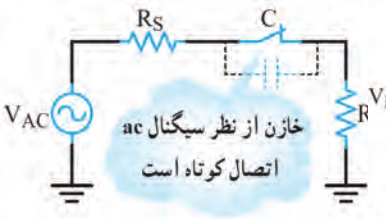
□ **خازن کوپلاژ:** خازنی است که سیگنال AC را از مداری به مدار دیگر منتقل می‌کند و مانع عبور سیگنال DC می‌شود.شکل ۱ـ۱۰ خازن کوپلاژ را در مداری ساده نشان می‌دهد. این خازن با مولد سیگنال متناوب و بار R_L به‌صورت سری قرار گرفته است.

□ می‌دانیم خازن در سیگنال DC به‌صورت مدار باز عمل می‌کند. در فرکانس‌های پایین نیز خازن تقریباً رفتاری مشابه مدار باز دارد و نمی‌تواند تمام سیگنال متناوب را به بار انتقال دهد. شکل ۲ـ۱۰ رفتار خازن در برابر سیگنال DC را نشان می‌دهد. برای آن که خازن کوپلاژ بتواند قسمت اعظم سیگنال متناوب (AC) را به بار R_L انتقال دهد، باید در پایین‌ترین فرکانس سیگنال AC تقریباً به‌صورت اتصال کوتاه عمل کند. بدیهی است هر قدر فرکانس بالاتر می‌رود، مقدار مقاومت خازنی کمتر و خازن به حالت اتصال کوتاه کامل نزدیک‌تر می‌شود. شکل ۳ـ۱۰ خازن را در مقابل سیگنال AC به‌صورت کلید بسته (تقریباً اتصال کوتاه) نشان می‌دهد.



شکل ۱ـ۱۰ـ مدار ساده با خازن کوپلاژ

شکل ۲ـ۱۰ـ خازن در برابر سیگنال DC



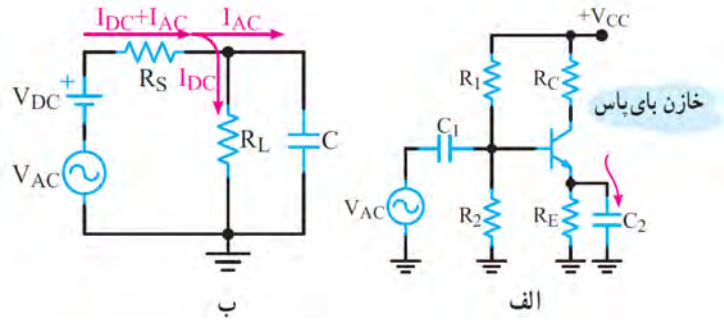
شکل ۳ـ۱۰

فعالیت

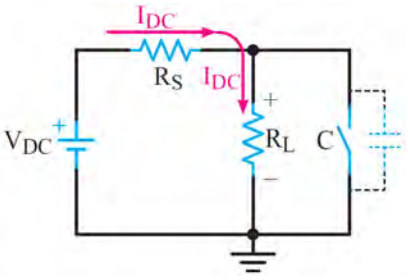
تحقیق کنید که برای پذیرفتن حالت اتصال کوتاه خازن در جریان متناوب، چه رابطه‌ای باید بین مقادیر X_C، R_S یا R_L برقرار باشد.

□ شکل الف و ب ـ ۴ـ۱۰ خازن بای‌پس را در یک تقویت‌کننده بایاس سرخود و یک مدار ساده نشان می‌دهد. بر خلاف خازن کوپلاژ که با بارسری است، خازن بای‌پاس به‌صورت موازی با بار قرار می‌گیرد. 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 نظرDC خازن مانند کلید باز عمل می‌کند. بنابراین ولتاژ DC دو سر R_L ثابت باقی می‌ماند. شکل ۵ـ۱۰ رفتار خازن را در مقابل سیگنالDC نشان می‌دهد.



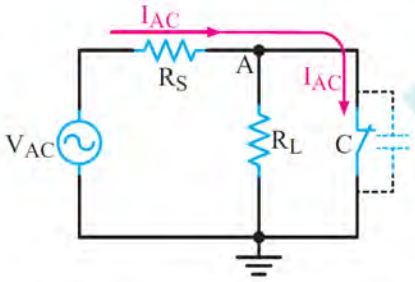
شکل ۴ـ۱۰



شکل ۵ـ۱۰ـ خازن بای پاس در مقابل سیگنال DC

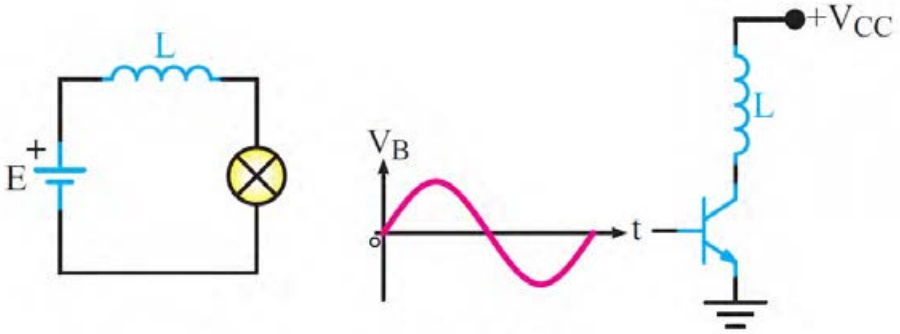
در سیگنال AC، ظرفیت خازن C باید طوری محاسبه شود که در حداقل فرکانس کار به‌صورت اتصال کوتاه عمل کند، در نتیجه نقطه A از نظر سیگنال AC مطابق شکل ۶ـ۱۰ به زمین اتصال کوتاه می‌شود. در این حالت گوییم در نقطه A، زمین AC یا AC Ground ایجاد شده است.

☑همان‌طور که قبلاً گفتیم، عکس‌العمل سیم‌پیچ در مدار از رابطه $X_L=2\pi fL$ محاسبه می‌شود. چون مقاومت اهمی‌سیم‌پیچ کم است، از آن صرف‌نظر می‌کنیم. بنابراین، مقاومت سیم‌پیچ در جریان DC (f=۰) برابر صفر است. یعنی سیم‌پیچ در مقابل سیگنال DC به‌صورت اتصال کوتاه عمل می‌کند.



شکل ۶ـ۱۰ـ خازن C در مقابل جریان ac مانند اتصال کوتاه عمل می‌کند.

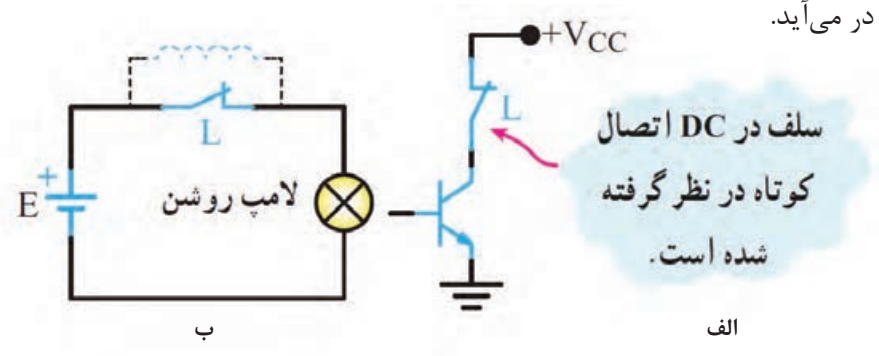
شکل الف ـ ۷ـ۱۰ قسمتی از یک تقویت‌کننده را نشان می‌دهد که سلف با کلکتور ترانزیستور سری شده است. شکل ب ـ۷ـ۱۰ یک لامپ را نشان می‌دهد که با سلف به‌صورت سری قرار دارد و در حالت DC روشن است.



الف – سیگنال متناوب با فرکانس f ب – لامپ با وجود سلف در مدار روشن است.

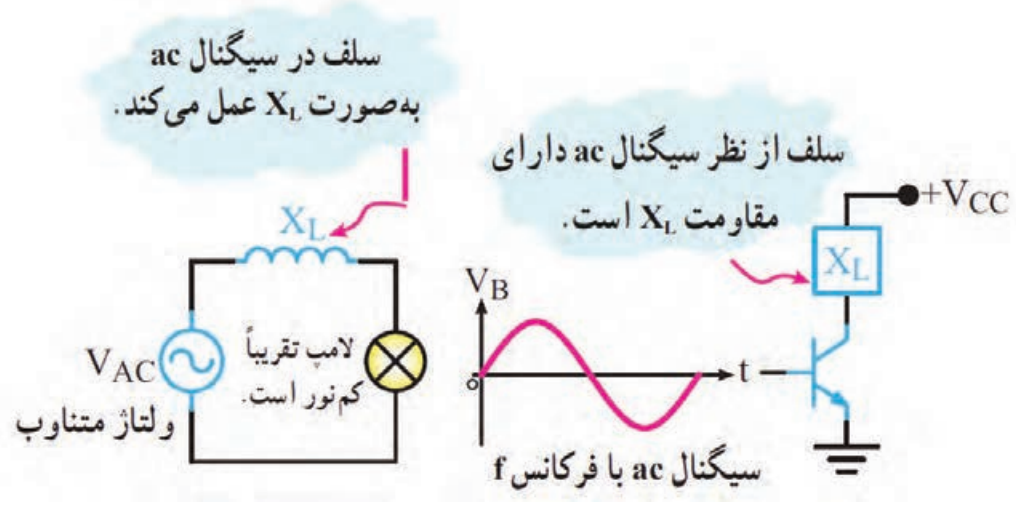
شکل ۷ـ۱۰

بنابراین در جریان مستقیم (DC) سلف به‌صورت اتصال کوتاه عمل می‌کند و مدار معادل آن به‌صورت شکل۸ـ۱۰ در می‌آید.



شکل ۸ـ۱۰ـ 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. شکل۹ـ۱۰ سلف را به‌صورت مقاومت معادل در سیگنال AC نشان می‌دهد.



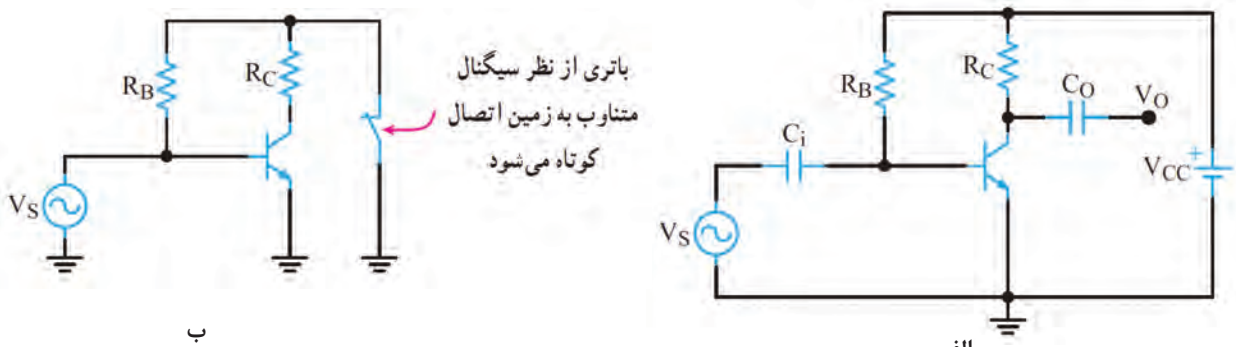
شکل ۹ـ۱۰ـ معادل سلف در سیگنال AC

☑عکس‌العمل باتری در مدار:

□اگر باتری را ایده‌آل در نظر بگیریم و از مقاومت داخلی آن صرف‌نظر کنیم، از نظرDC 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 سیگنالAC به‌صورت اتصال کوتاه در می‌آید و اصطلاحاً می‌گویند باتری زمین AC یا AC Ground شده است، شکل۱۰ـ۱۰.

□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 ـ۱۰ـ۱۰مدار معادل تقویت‌کننده را در سیگنال متناوب نشان می‌دهد.



ب

الف

شکل ۱۰ـ۱۰ـ 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 به‌صورت کلید باز و در جریان AC در صورت برقرار بودن شرایط، به‌صورت اتصال کوتاه (کلید بسته) در نظر گرفته می‌شود.
- سلف در جریان DC به‌صورت 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 به‌صورت مدار باز (کلید باز) در نظر گرفت.
- باتری در حالت DC تغییری نمی‌کند، ولی در حالت AC به‌صورت اتصال کوتاه دیده می‌شود.

پژوهش

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

مثال۱: در شکل ۱۱ـ۱۰ مطلوب است:

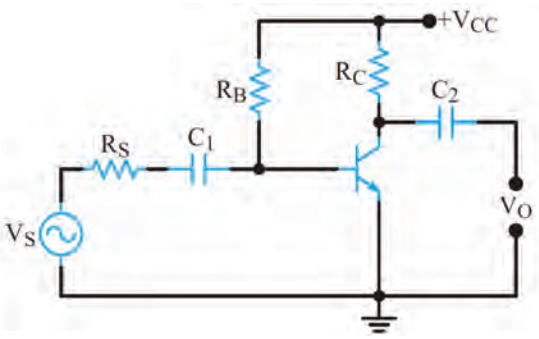
الف) رسم مدار معادل ساده DC

ب) رسم مدار معادل ساده AC

پاسخ:

الف) مدار ساده معادل DC

در سیگنال DC خازن‌های مدار به‌صورت کلید باز هستند و باتری در جای خود قرار دارد. بنابراین اگر ولتاژ ورودی DC باشد، خازن کوپلاژ به‌صورت اتصال باز عمل می‌کند، شکل ۱۲ـ۱۰.

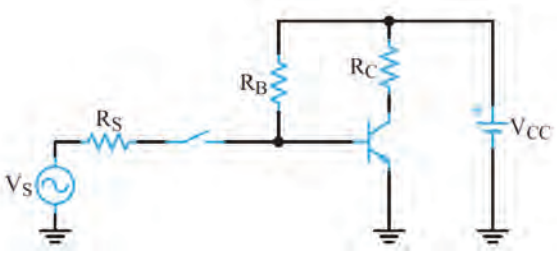


شکل ۱۱ـ۱۰

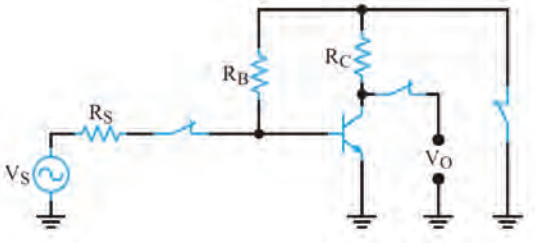
ب) مدار سادهٔ معادل AC

در سیگنال متناوب خازن‌ها در مدار تقریباً به‌صورت اتصال کوتاه هستند و باتری نیز به دلیل داشتن خازن داخلی به زمین الکتریکی اتصال دارد. شکل ۱۳ـ۱۰ مدار معادل AC ساده را نشان می‌دهد. با توجه

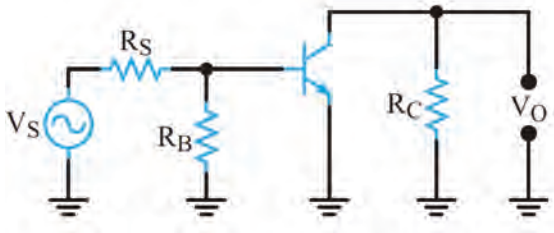
به شکل ۱۳ـ۱۰ مشاهده می‌شود که انتهای بالایی مقاومت‌های R_B و R_C از طریق ظرفیت خازنی داخل باتری به زمین متصل شده‌اند.
لذا می‌توان مدار را به‌صورت شکل ۱۴ـ۱۰ ترسیم نمود.



شکل ۱۲ـ۱۰ـ مدار معادل DC مثال ۱



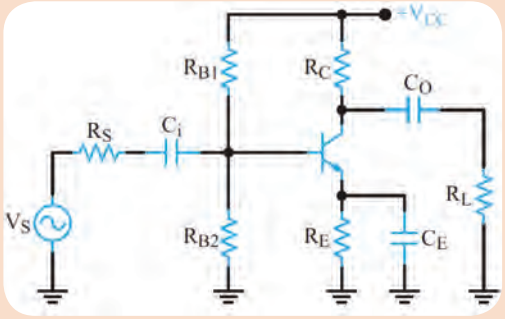
شکل ۱۳ـ۱۰ـ اتصال کوتاه خازن‌ها در مثال ۱



شکل ۱۴ـ۱۰ـ مدار معادل ac مثال ۱

فعالیت در ساعات غیر درسی

با توجه به شکل۱۵ـ۱۰ مطلوب است:
الف) رسم مدار ساده معادل DC
ب) رسم مدار ساده معادل AC



شکل ۱۵ـ۱۰

۲ـ۱۰ـ فیدبک در تقویت کننده‌ها

■ نقش فیدبک در تقویت‌کنندهٔ ترانزیستوری

☑وقتی تقویت‌کننده‌ای را در نقطه کار معینی طراحی می‌کنیم، باید نقطهٔ 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 قطعهٔ تغییر یافته با قطعهٔ قبلی انطباق کامل ندارد، ممکن است باعث تغییر در نقطهٔ کار، مشخصات ورودی و خروجی مدار شود.

☑همچنین عوامل دیگری مانند حرارت و عوامل غیر قابل کنترل در محیط بر نقطهٔ کار تأثیر می‌گذارند و مشخصات ورودی و خروجی مدار را تغییر می‌دهند.

☑این تغییرات به‌طور طبیعی نامطلوب هستند.

☑ برای ثابت ماندن مشخصات تقویت‌کننده و تنظیم برخی مشخصات از عاملی به نام فیدبک (Feed back) یا بازخورد یا پس‌خوراند استفاده می‌شود.

☑ 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

شکل ۱۶ـ۱۰ـ بلوک دیاگرام تقویت‌کننده با فیدبک

می‌شود. در شکل ۱۶ـ۱۰ بلوک دیاگرام تقویت‌کننده با مدار فیدبک را مشاهده می‌کنید.

☑ در شکل ۱۶ـ۱۰ شبکهٔ فیدبک با خروجی مدار موازی شده است و کسری از ولتاژ خروجی مدار را به ورودی تقویت‌کننده بر می‌گرداند.

ولتاژی که به ورودی تقویت‌کننده برمی‌گردد در هر لحظه با ولتاژ ورودی تقویت‌کننده جمع جبری می‌شود.

☑ انواع فیدبک

انتقال انرژی از خروجی تقویت‌کننده به ورودی آن به دو صورت فیدبک مثبت و منفی صورت می‌گیرد.

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

✓ در این حالت چون ولتاژهای ورودی و خروجی هم‌فاز هستند، ولتاژ ورودی تقویت‌کننده افزایش می‌یابد.

شکل ۱۷ـ۱۰ـ بلوک دیاگرام تقویت‌کننده با فیدبک مثبت

✓ افزایش ولتاژ ورودی، ولتاژخروجی تقویت‌کننده را نیز افزایش می‌دهد.

✓ به این نوع فیدبک که منجر به افزایش دامنهٔ ولتاژ خروجی تقویت‌کننده می‌شود، فیدبک مثبت می‌گویند.

✓ شکل ۱۷ـ۱۰ بلوک دیاگرام فیدبک مثبت را نشان می‌دهد.

✓ فیدبک مثبت مدار تقویت‌کننده را ناپایدار می‌کند و در صورت وجود شرایط، آن را به نوسان در می‌آورد.

□ **فیدبک منفی:** اگر ولتاژ برگشتی مدار با ولتاژ ورودی تقویت‌کننده هم فاز نباشد و با آن ۱۸۰ اختلاف فاز داشته باشد فیدبک منفی به‌وجود می‌آید.

✓ در این حالت ولتاژ فیدبک، به دلیل داشتن ۱۸۰ درجه اختلاف فاز با ولتاژ ورودی تقویت‌کننده، مقدار ولتاژ ورودی را کاهش می‌دهد و باعث کم شدن ولتاژ خروجی می‌شود. این نوع فیدبک را فیدبک منفی می‌گویند.

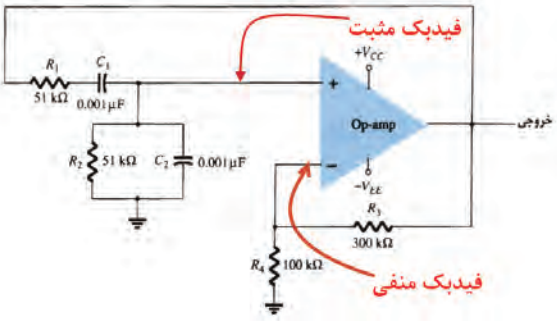
برای پایداری تقویت‌کننده‌ها از فیدبک منفی استفاده می‌کنند.

شکل ۱۸ـ۱۰ـ بلوک دیاگرام تقویت‌کننده با فیدبک منفی

شکل ۱۸ـ۱۰ بلوک دیاگرام تقویت‌کننده با فیدبک منفی را نشان می‌دهد.

■ کاربرد فیدبک مثبت و منفی در مدارهای الکترونیکی:

یکی از کاربردهای فیدبک مثبت در نوسان‌سازی است.



شکل ۱۹ـ۱۰ـ نوسان‌ساز پل وین

☑ نوسان‌ساز پل وین (Wein Bridge Oscillator) از یک تقویت‌کننده و شبکه برگشتی RC تشکیل می‌شود، شکل ۱۹ـ۱۰. این نوسان‌ساز یکی از مدارهای الکترونیکی است که هم‌زمان دو فیدبک مثبت و منفی در مدار آن وجود دارد.

☑ فیدبک منفی توسط مقاومت‌های R_3 و R_4 ایجاد می‌شود، این مقاومت‌ها بهره مدار تقویت‌کننده را نیز تأمین می‌کنند.

☑ فیدبک مثبت که توسط مدار RC برقرار می‌شود، بین سیگنال ورودی و خروجی شبکه برگشتی صفر درجه اختلاف فاز ایجاد می‌کند و شبکه برگشتی $\frac{1}{3}$ مرتبه سیگنال ورودی خود را تضعیف می‌کند.

✓ اگر $A_V=3$ باشد، بنا بر اصل بارک‌هاوزن، نوسان‌های پایدار به‌وجود می‌آید. زیرا حاصل ضرب بهره ولتاژ تقویت‌کننده (A_v) در ضریب بهره ولتاژ مدار فیدبک (B_v) برابر یک می‌شود، $A_V \times B_V = 3 \times \frac{1}{3} = 1$.

نکته مهم

برای تولید نوسان پایدار در مدار باید سه شرط $A_V.B_V=1$ (اصل بارک‌هاوزن)، فیدبک مثبت و مدار تولیدکننده نوسان وجود داشته باشد.

نقش R_E به عنوان عامل فیدبک منفی

در شکل الف ـ ۲۰ـ۱۰ یک تقویت‌کننده با فیدبک منفی نشان داده شده است.

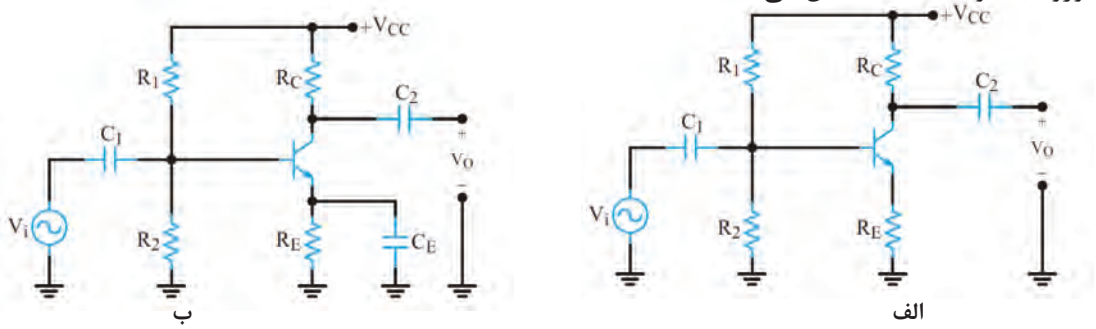
ولتاژ دوسر R_E همان ولتاژ فیدبک (V_f) است. وجود مقاومت R_E باعث ایجاد فیدبک منفی درمدار می‌شود و بهره را کاهش می‌دهد.

توجه داشته باشید که فیدبک منفی، امپدانس ورودی تقویت‌کننده را افزایش می‌دهد.

برای خنثی سازی اثر R_E در سیگنال AC، خازنی را مطابق شکل ب ـ۲۰ـ۱۰ با R_E موازی می‌کنند.

این خازن یک خازن بای‌پاس است که هنگام عبور سیگنال AC به‌صورت اتصال کوتاه عمل می‌کند و اثر مقاومت R_E را از بین می‌برد و مانع ایجاد فیدبک منفی در حالت AC می‌شود.

با بای‌پاس شدن مقاومت R_E، فیدبک AC حذف و بهرهٔ ولتاژ تقویت‌کننده افزایش می‌یابد. همچنین امپدانس ورودی تقویت‌کننده کاهش می‌یابد.



شکل ۲۰ـ۱۰ـ تقویت‌کننده با فیدبک منفی

پژوهش

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

محاسبه مقدار ظرفیت خازن بای‌پاس:

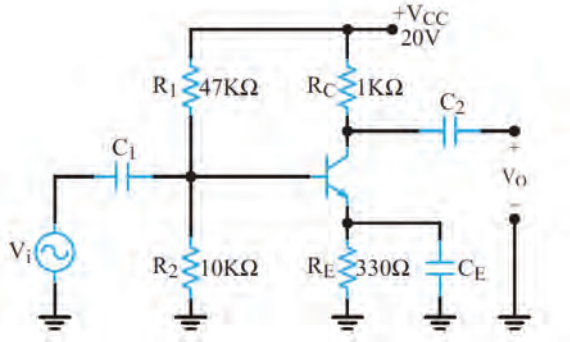
☑ برای آنکه خازن بای‌پاس بتواند در مقابل سیگنال AC به‌صورت اتصال کوتاه عمل کند، باید ظرفیت آن را بزرگ انتخاب کنند.

☑ با توجه به این که ممکن است در سیگنال ورودی تقویت‌کننده طیفی از فرکانس وجود داشته باشد، باید مقدار حداقل ظرفیت خازن بای‌پاس مورد نیاز به طور دقیق انتخاب شود. بنابراین برای محاسبه مقدار ظرفیت خازن بای‌پاس، رابطهٔ 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 کوچک‌تر از R_E باشد تا بتوان خازن بای‌پاس را اتصال کوتاه در نظر گرفت.

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

مثال ۲: در تقویت‌کنندهٔ شکل ۲۱ـ۱۰ 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 ۲۱ـ۱۰ـ تقویت‌کننده

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

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

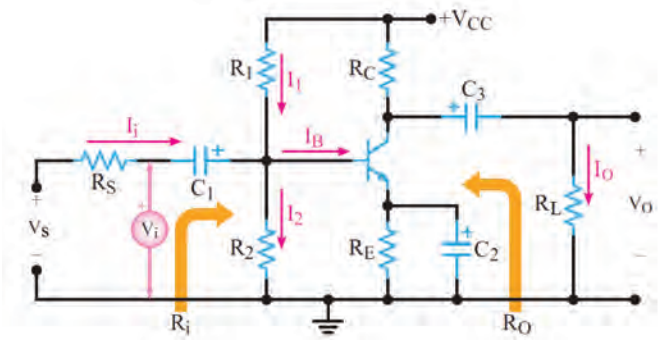
$$C_E \ge \frac{10}{2\times 3/14\times 500\times 330}$$

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

خازن مناسب خازنی است که مقدار ظرفیت آن برابر ۱۰ μF یا بزرگ‌تر باشد.

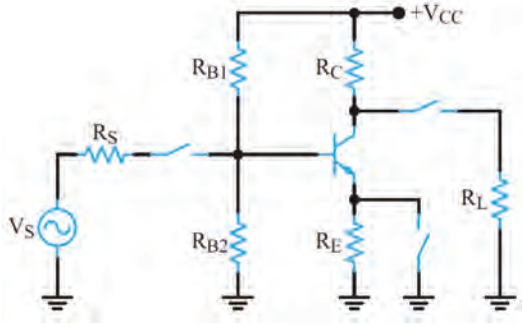
■ تحلیل تقویت‌کنندهٔ امیتر مشترک

☑ تقویت‌کنندهٔ امیتر مشترک، بیشترین کاربرد در انواع تقویت‌کننده‌ها را دارد. در شکل ۲۲ـ۱۰ یک تقویت‌کنندهٔ امیتر مشترک با بایاس سرخود را مشاهده می‌کنید.



شکل ۲۲ـ۱۰ـ تقویت‌کننده امیتر مشترک

☑ مدار معادل سادهٔ DC و AC تقویت‌کننده امیتر مشترک: در شکل ۲۳ـ۱۰ مدار ساده معادل DC تقویت‌کننده امیتر مشترک و در شکل‌های ۲۴ـ۱۰و ۲۵ـ۱۰ مدار معادل AC تقویت‌کننده امیتر مشترک را مشاهده می‌کنید.

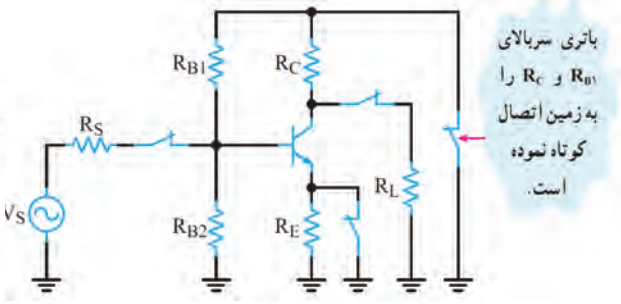


شکل ۲۳ـ۱۰ـ مدار معادل DC تقویت‌کننده امیتر مشترک

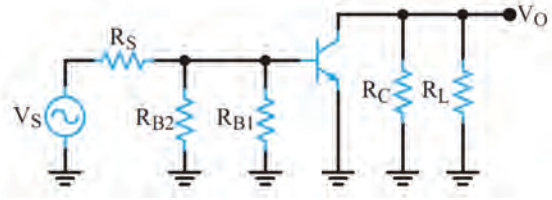
بارش فکری

■ مدار شکل ۲۴ـ۱۰ را بررسی کنید. به چه دلیل این مدار، مدار معادل AC تقویت‌کننده امیتر مشترک است؟ نتایج را جمع‌بندی کنید و به خوبی فرا بگیرید.

■ مدار شکل ۲۵ـ۱۰ را بررسی کنید. به چه دلیل این مدار، مدار معادل AC تقویت‌کننده امیتر مشترک است؟



شکل ۲۴ـ۱۰ـ مدار معادل ac تقویت‌کننده امیتر مشترک



شکل ۲۵ـ۱۰ـ مدار معادل ac ساده شده تقویت‌کننده امیتر مشترک

☑ بهرهٔ جریان:

در تقویت‌کنندهٔ امیتر مشترک جریان ورودی ترانزیستور، جریان بیس و جریان خروجی ترانزیستور، جریان کلکتور است. همان‌طور که قبلاً گفته شد، جریان کلکتور، چندین برابر جریان بیس است، بنابراین مدارتقویت‌کننده امیتر مشترک، جریان را تقویت می‌کند. نسبت جریان خروجی به جریان ورودی را بهرهٔ جریان می‌گویند و آن را با حرف A_i نشان می‌دهند.

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

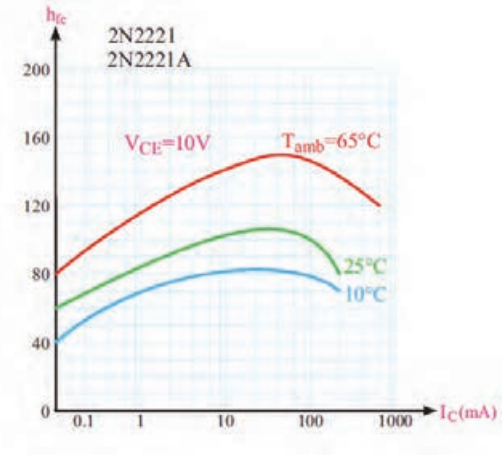
بهره جریان ترانزیستور در آرایش امیتر مشترک برابر است با:

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

حرف β را برای بهره جریان DC به‌کار می‌برند. در جریان متناوب، برای به‌دست آوردن بهرهٔ جریان از پارامتر دیگری به نام h_{fe} استفاده می‌شود که مقدار آن از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید.

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

در بسیاری موارد مقدار h_{fe} تقریباً با مقدار β برابر می‌شود.



شکل ۲۶ـ۱۰ـ منحنی تغییرات h_{fe} برحسب I_C در سه درجه حرارت

□ β 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 ۲۶ـ۱۰ منحنی تغییرات h_{fe} را برحسب I_C برای مقادیر V_{CE}=۱۰ V در درجه حرارت‌های ۱۰°C، ۲۵°C و ۶۵°C برای ترانزیستور ۲N۲۲۲۱ نشان می‌دهد.

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

بارش فکری

از طریق بارش فکری، رفتار منحنی‌های شکل ۲۶ـ۱۰ را مورد بررسی قرار دهید و جمع‌بندی کنید. نتیجه جمع‌بندی را به‌صورت یک گزارش ثبت کنید و به خاطر بسپارید.

☑ **بهرهٔ 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 دامنهٔ کم است. اما ولتاژ متناوب خروجی که همان تغییرات ولتاژ کلکتور امیتر است، دامنهٔ زیادی دارد. لذا تقویت‌کنندهٔ امیتر مشترک ولتاژ را نیز تقویت می‌کند و بهرهٔ ولتاژ آن زیاد است.

☑ **اختلاف فاز بین ولتاژ ورودی وخروجی:**

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

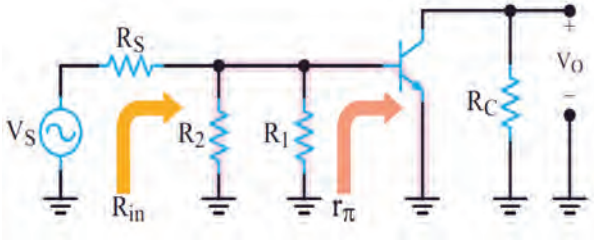
□ اما ولتاژ ورودی و خروجی در تقویت‌کنندهٔ امیتر مشترک به اندازهٔ ۱۸۰ درجه با یکدیگر اختلاف فاز دارند. زیرا با افزایش ولتاژ ورودی، جریان خروجی افزایش می‌یابد و مقدار V_{CE} را که همان ولتاژ خروجی است کاهش می‌دهد.

□ عکس این روند نیز صادق‌است، 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 ۲۷ـ۱۰ جریان ورودی I_i و ولتاژ ورودی V_i است. مقاومت ورودی، از تقسیم ولتاژ ورودی به جریان ورودی به‌دست می‌آید. $R_{in}=\frac{V_i}{I_i}$



شکل ۲۷ـ۱۰ـ مدار ساده معادل ac تقویت‌کننده امیتر مشترک

به مدار سادهٔ معادل AC تقویت‌کننده شکل ۲۸ـ۱۰ توجه کنید.

مقاومت ورودی از سه مقاومت موازی R_2، R_1 و مقاومت دیود بیس امیتر ترانزیستور (r_π) تشکیل می‌شود.

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

در صورتی که مقاومت معادل R_1وR_2 در مقایسه با r_π زیاد باشد مقاومت ورودی به سوی مقاومت r_π که مقدار آن کوچک است میل می‌کند.

توجه

اگر I_E یا I_C ترانزیستور مشخص باشد، هدایت انتقالی ترانزیستور از رابطهٔ $g_m = \frac{I_C}{26mV} = \frac{I_E}{26mV}$ و r_π مقاومت دیود بیس امیتر درحالت AC از رابطهٔ $r_\pi = \frac{\beta}{g_m}$ به دست می‌آید.

توجه

درباره r_π و مقدار آن در مدارهای مختلف تقویت‌کننده تحقیق کنید و نتیجه را در قالب یک گزارش ارائه دهید.

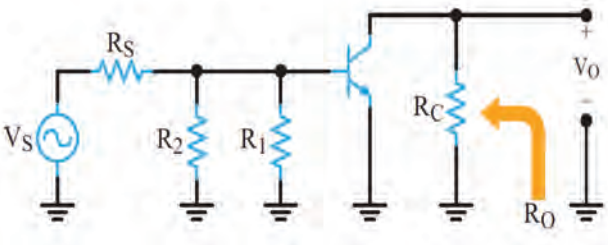
☑ مقاومت خروجی:

□ در شکل ۲۸ـ۱۰ به مدار ساده معادل AC تقویت‌کنندهٔ امیتر مشترک، از دید خروجی توجه کنید. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقاومت خروجی از موازی شدن دو مقاومت R_C و مقاومت داخلی کلکتور امیتر ترانزیستور به‌دست می‌آید.

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

□ هنگامی‌که مقاومت بسیار بزرگ کلکتور امیتر با R_C (بار) موازی می‌شود، 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 می‌دهند.



شکل ۲۸ـ۱۰ـ مدار ساده معادل ac تقویت‌کننده امیتر مشترک

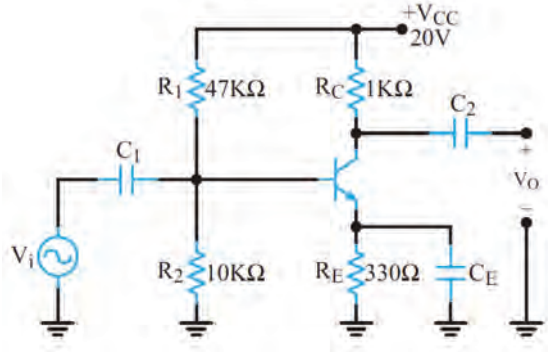
تحقیق کنید

در رابطه با چگونگی اندازه‌گیری عملی مقاومت خروجی یک تقویت‌کننده تحقیق کنید و نتیجه را در قالب یک گزارش ارائه دهید.

مثال ۳: در تقویت‌کننده شکل ۲۹ـ ۱۰ با فرض $\beta = ۳۵۰$ و $r_\pi = ۱k\Omega$ باشد مقادیر R_{in} و R_O تقویت‌کننده را به‌دست آورید.

$R_{in}=R_۱||R_۲||r=۴۷k||۱۰k||۱k=۸۹۱\Omega$

$R_O \cong R_C=۱k\Omega$



شکل ۲۹ـ۱۰ـ تقویت‌کننده امیتر مشترک

الگوی پرسش:

۱ـ یک نمونه تقویت‌کننده بیس مشترک و یک نمونه تقویت‌کننده کلکتور مشترک توسط هنرآموز ارائه می‌شود و هنرجویان اقدام به ترسیم مدار معادل DC آن می‌نمایند.

۲ـ در صورتی که در یک نوسان‌ساز ضریب تقویت ولتاژ برابر ۹ باشد ضریب تقویت شبکه برگشتی چقدر باشد تا مدار به نوسان خود ادامه دهد؟

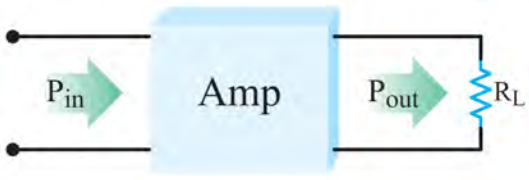
■بیان بهرهٔ یک تقویت‌کننده برحسب دسی بل(Decibel):

جست و جو

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 رسانه‌های مختلف مرتبط جست‌وجو کنید و نتایج را پس از جمع‌آوری به‌صورت پاورپوینت ارائه دهید.

☑میزان تقویت‌کنندگی یک دستگاه تقویت‌کننده را به‌صورت لگاریتمی بیان می‌کنند.به شکل ۳۰ـ۱۰ که بلوک دیاگرام یک تقویت‌کننده است توجه کنید.

☑در این شکل توان داده شده به یک تقویت‌کننده را برابر P_{in} و توانی را که از آن گرفته می‌شود برابر P_{out} فرض کنیم، طبق تعریف مبنای ده برابر لگاریتم اعشاری نسبت $\frac{P_{out}}{P_{in}}$ را ضریب تقویت برحسب دسی بل می‌نامیم. این موضوع با رابطهٔ لگاریتمی زیر بیان می‌شود.



شکل ۳۰ـ۱۰ـ بلوک دیاگرام تقویت‌کننده

$$A_p(dB) = ۱۰\log\frac{P_{out}}{P_{in}}$$

مثال ۴: در صورتی که توان وارد شده به شبکهٔ شکل ۳۱ـ۱۰ برابر یک وات و توان دریافتی از آن مساوی ۲ وات باشد، بهرهٔ قدرت این تقویت‌کننده چند دسی بل می‌شود؟

پاسخ: ابتدا A_P را محاسبه می‌کنیم.

$$A_p = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{۲W}{۱W} = ۲ \text{ مرتبه}$$

مقدار A_P را در رابطهٔ لگاریتمی دسی بل قرار می‌دهیم.

$$A_P(db) = ۱۰\log\frac{P_{out}}{P_{in}} ۱۰\log A_P$$

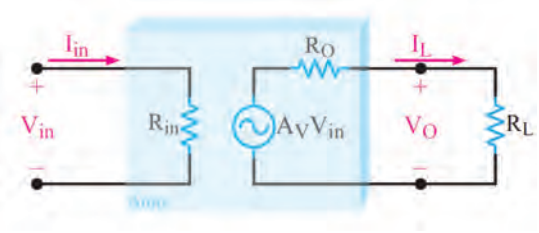
$$A_P(db) = ۱۰\log ۲$$

$\log ۲ = ۰/۳۰۱۰۳$ است که برای سادگی محاسبات آن را برابر با ۰/۳ در نظر می‌گیریم و مقدار A_P را برحسب دسی بل محاسبه می‌کنیم.

تحقیق کنید

در رابطه با چگونگی محاسبهٔ ضریب تقویت توان برحسب بهرهٔ ولتاژ تحقیق کنید و نتیجه را در قالب گزارش ارائه دهید.

راهنمایی: هر تقویت‌کننده با ضریب بهرهٔ ولتاژ A_V را می‌توان 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 بهرهٔ توان برحسب dB را می‌توان براساس ولتاژ ورودی و خروجی شبکه بیان نمود. شکل ۳۱ـ۱۰مدل الکتریکی یک تقویت‌کننده را نشان می‌دهد.



شکل ۳۱ـ۱۰ـ مدل الکتریکی تقویت‌کننده

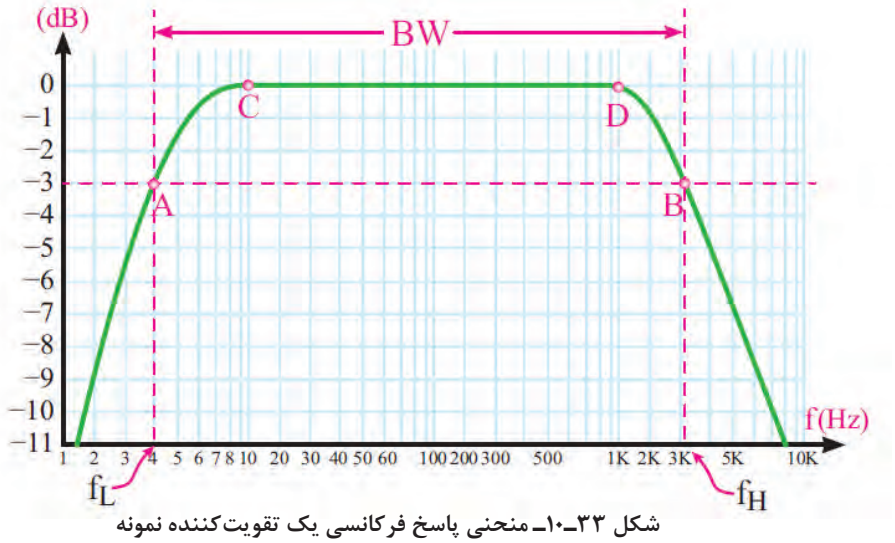
■ پاسخ فرکانسی تقویت‌کننده‌ها

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

شکل ۳۲ـ۱۰ـ مدل بلوکی تقویت‌کننده

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

شکل ۳۲ـ۱۰ نمای بلوکی تقویت‌کننده و ولتاژ ورودی و خروجی آن را نشان می‌دهد. در شکل ۳۳ـ۱۰ منحنی پاسخ فرکانسی یک تقویت‌کنندهٔ رسم شده است. در این شکل بهرهٔ تقویت‌کننده، در حالت انتقال بدون تضعیف برابر با یک فرض شده است. منحنی از دو ناحیهٔ کاملاً متفاوت تشکیل می‌شود.



شکل ۳۳ـ۱۰ـ منحنی پاسخ فرکانسی یک تقویت‌کننده نمونه

ناحیهٔ CD که کلیهٔ فرکانس‌های واقع در این محدوده به یک نسبت تقویت می‌شوند. در نواحی سمت چپ نقطه C و سمت راست نقطهٔ D میزان تقویت کاهش می‌یابد و سیر نزولی را طی می‌کند.

الگوی پرسش:

۱ـ انواع فیدبک را نام ببرید. مقاومت امیتر در تقویت‌کننده امیتر مشترک چه نوع فیدبکی است؟ چرا؟

۲ـ در صورتی که مقاومت امیتر یک تقویت‌کننده ۲۲۰ اهم و فرکانس مدار از ۱۰۰۰ هرتز تا ۱۰۰۰۰ هرتز تغییر کند، خازن بای پاس مناسب را برای آن محاسبه کنید.

۳ـ تفاوت خازن بای پاس و کوپلاژ و نقش آنها را در تقویت‌کننده شرح دهید.

☑ **تعریف باند مفید و فرکانس قطع:** محدوده‌ای از طیف فرکانس در تقویت‌کننده که در آن ضریب تقویت، تغییر محسوسی نمی‌کند را باند مفید فرکانس آن تقویت‌کننده می‌نامند.

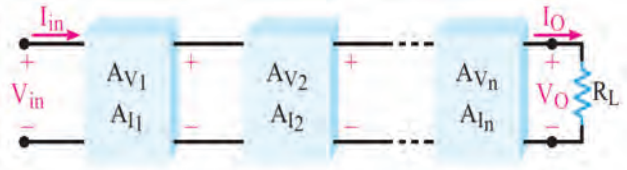
در شکل ۳۳ـ ۱۰ این باند بین دو نقطهٔ A و B واقع شده است. فرکانس متناظر با نقطهٔ A را فرکانس قطع پایین و فرکانس متناظر با نقطهٔ B را فرکانس قطع بالای تقویت‌کننده می‌گوییم.

طبق تعریف، فرکانس قطع به فرکانسی گفته می‌شود که در آن بهرهٔ توان تقویت‌کننده به نصف مقدار طبیعی خود کاهش می‌یابد؛ به عبارت دیگر ۳dB افت می‌کند.

۳ـ۱۰ ـ تقویت‌کننده‌های چند طبقه

اگر n طبقهٔ تقویت‌کننده با بهره ولتاژ A_{V1}، A_{V2} و... Av_n و بهره جریان Ai_1، Ai_2 و... Ai_n طبق شکل ۳۴ـ۱۰ پشت سر هم قرار گیرند، یک تقویت‌کننده n طبقه به‌دست می‌آید.

☑ با توجه به اختلاف بین سیگنال‌های ورودی و خروجی تقویت‌کننده‌ها، بهرهٔ ولتاژ و بهره جریان کل تقویت‌کننده از روابط زیر محاسبه می‌شود.



شکل ۳۴ـ۱۰ـ بلوک دیاگرام n طبقه تقویت‌کننده

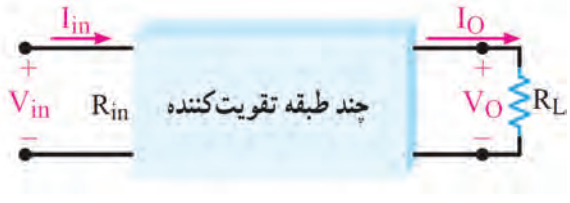
$$A_{VT} = \frac{V_o}{V_{in}} = \pm A_{V1} A_{V2} \cdots\cdots A_{Vn}$$

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

☑ در رابطهٔ بهرهٔ ولتاژ کل(A_{VT})، علامت (+) به معنی هم فاز بودن V_o با V_{in} و علامت (ـ) به معنی وجود ۱۸۰ درجه اختلاف فاز بین V_o و V_{in} است. در رابطهٔ بهرهٔ جریان کل (A_{IT})، علامت‌های ± نیز همین مفهوم را دارند.

☑ باید توجه داشت که در شکل ۳۴ـ۱۰ بهره ولتاژ (A_V) و بهرهٔ جریان (A_I) برای هر طبقه در شرایطی در نظر گرفته شده است که همهٔ طبقات به هم اتصال دارند به عبارت دیگر، A_V و A_I بیانگر میزان تقویت هر طبقه به‌طور مستقل نیست. بهرهٔ توان کل از حاصل ضرب بهرهٔ ولتاژ و بهرهٔ جریان به‌دست می‌آید.

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



شکل ۳۵ـ۱۰ـ نمایش چند طبقه تقویت‌کننده در یک بلوک کلی

☑ برای اثبات رابطه بهره توان کل می‌توان دیاگرام چند طبقه تقویت‌کننده را به‌صورت یک بلوک کلی مانند شکل ۳۵ـ۱۰ در نظرگرفت.

در بلوک شکل ۳۵ـ۱۰ بهرهٔ توان کل از رابطهٔ روبه‌رو به‌دست 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 $\frac{V_o}{V_{in}}$ و $\frac{I_o}{I_{in}}$ ، A_{VT} و A_{IT} قرار داده شود رابطهٔ بهرهٔ توان کل به‌صورت $A_P=A_{VT}\times A_{IT}$ به‌دست می‌آید.

تحقیق کنید

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

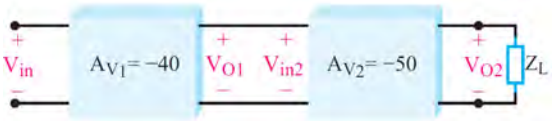
مثال ۵: با توجه به شکل ۳۶ـ۱۰ اگر V_{in} برابر ۱mV باشد V_{o1} و V_{o2} و A_{v1} را محاسبه کنید.

پاسخ: بهرهٔ ولتاژ طبقهٔ اول از رابطهٔ $A_{V1} = \frac{V_{o1}}{V_{in1}}$ به‌دست می‌آید. لذا $V_{o1}=A_{v1}\times V_{in1}$ است. به جای A_{v1} و V_{in1} عدد گذاری می‌کنیم:

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

☑ علامت (ـ) نشان می‌دهد که V_{o1} با V_{in} به اندازهٔ 180° اختلاف فاز دارد. بهرهٔ ولتاژ طبقهٔ دوم از رابطهٔ $A_{V2} = \frac{V_{o2}}{V_{in2}}$ به‌دست می‌آید. رابطه را به‌صورت $V_{o2}=A_{v2}\times A_{in2}$ می‌نویسیم. چون V_{o1} برابر V_{in2} است به جای V_{in2} مقدار عددی V_{o1} را قرار می‌دهیم:

$V_{o2}=(-40)(-50)=-2000mv$



شکل ۳۶ـ۱۰ـ بلوک دیاگرام دو طبقه تقویت‌کننده

☑ مقدار A_{VT} را از مقادیر V_{o2} و V_{in} محاسبه می‌کنیم. $A_{VT} = \frac{V_{o2}}{V_{in}} = \frac{2000}{1} = 2000$ مرتبه

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

$A_{VT}=(-40)(-50)=+2000$ مرتبه

☑ همان‌طور که مشاهده می‌شود A_{VT} علامت مثبت دارد یعنی ولتاژ خروجی با ولتاژ ورودی هم فاز است.

تمرین: اگر A_{v1} برابر ۲۰+ و A_{v2} برابر ۱۰ـ باشد A_{VT} را محاسبه کنید.

الگوی پرسش:

۱ـ در صورتی که در یک تقویت‌کننده 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.

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

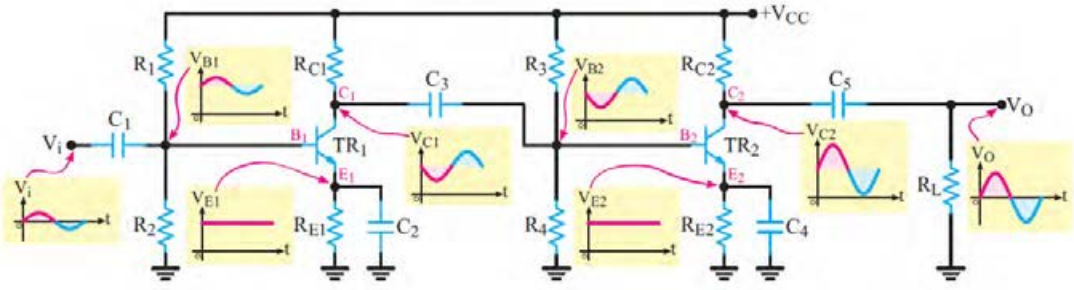
۳ـ فرمول بهره توان برحسب دسی‌بل را بنویسید. اگر $P_{in} = ۱۰mW$ و $P_o = ۱۰W$ باشد، مقدار بهره توان را برحسب دسی بل محاسبه کنید.

■ اتصال تقویت‌کننده‌ها به یکدیگر

برای انتقال سیگنال از یک طبقهٔ تقویت‌کننده به طبقهٔ دیگر باید دو طبقه را به یکدیگر اتصال دهیم. چگونگی اتصال دو طبقه تقویت‌کننده را به یکدیگر کوپلاژ (Coupling) می‌گویند. اتصال بین طبقات به‌وسیلهٔ خازن، ترانسفورماتور یا به‌طور مستقیم امکان‌پذیر است. از این رو سه نوع کوپلاژ خازنی، ترانسفورماتوری و مستقیم تعریف می‌شود.

■ محاسبات امپدانس در کوپلاژ خازنی

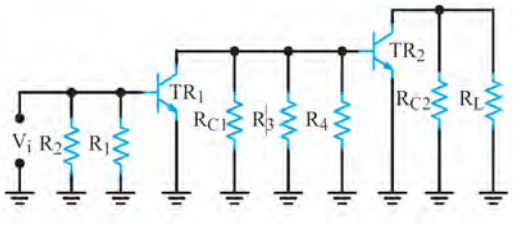
☑ اگر دو یا چند طبقه تقویت‌کننده را به‌وسیلهٔ یک یا چند خازن به یکدیگر وصل کنیم می‌گوییم کوپلاژ بین طبقات تقویت‌کننده به‌صورت خازنی است. تقویت‌کنندهٔ دوطبقه با کوپلاژ خازنی و شکل موج نقاط مختلف آن در شکل ۳۷ـ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۳۷ـ۱۰ـ تقویت‌کننده دو طبقه با کوپلاژ خازنی

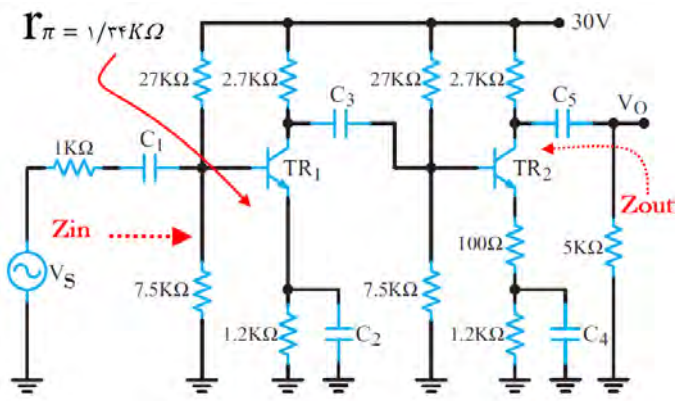
☑ مدار معادل AC تقویت‌کننده با کوپلاژ خازنی:

در رسم مدار معادل AC، کلیهٔ خازن‌های مدار را به‌صورت اتصال کوتاه در نظر می‌گیریم و منبع تغذیهٔ $+V_{CC}$ را به زمین الکتریکی وصل می‌کنیم. بنابراین مدار معادل AC تقویت‌کنندهٔ ۳۷ـ۱۰ به‌صورت شکل ۳۸ـ۱۰در می‌آید. همان‌طور که مشاهده می‌شود در مدار معادلAC این تقویت‌کننده، مقاومت‌های بایاس $R_۱$ و$R_۲$ هم چنین $R_۳$ و $R_۴$ باهم به‌صورت موازی در می‌آیند. در ضمن مقاومت بار (R_L) با مقاومت $R_{C۲}$ به‌صورت موازی دیده می‌شود. توجه داشته باشید که مقاومت‌های بایاس $R_۳$ و $R_۴$ به عنوان مقاومت بار $R_{L۱}$ با مقاومت $R_{C۱}$ به‌صورت 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 تغذیهٔ وابسته عمل می‌کنند.



شکل ۳۸ـ۱۰ـ مدل ac تقویت‌کننده دو طبقه با کوپلاژ خازنی

☑ محاسبه کمیت‌های Z_{in} و Z_{out} تقویت‌کننده دو طبقه با کوپلاژ خازنی



شکل ۳۹ـ۱۰ـ تقویت‌کننده دو طبقه با کوپلاژ خازنی

امپدانس ورودی تقویت‌کننده دو طبقه همان امپدانس ورودی طبقه اول است که را بطهٔ آن برابر است با:

$Z_{in}=R_۱ \| R_۲ \| r\pi_۱$

امپدانس خروجی تقویت‌کننده از موازی شدن دو مقاومت $R_{C۲}$ و مقاومت داخلی کلکتور امیتر ترانزیستور دوم به‌دست می‌آید. مقاومتی که از کلکتور امیتر ترانزیستور دوم دیده می‌شود بسیار بزرگ است. هنگامی‌که مقاومت بسیار بزرگ کلکتور امیتر با $R_{C۲}$ موازی می‌شود مقاومت معادل (مقاومت خروجی) به سمت مقاومت $R_{C۲}$ میل خواهد کرد. $Z_{out}\cong R_{C۲}$

مثال۶: در تقویت‌کننده دوطبقهٔ با کوپلاژ خازنی شکل ۳۹ـ۱۰ امپدانس ورودی و خروجی را به‌دست آورید.

$Z_{in}=R_۱ \| R_۲ \| r\pi_۱$

$Z_{in}=۲۷k \| ۷/۵k \| ۱/۳۴k \cong ۱/۱k\Omega$

$Z_{out}\cong R_{C۲}=۲/۷\ k\Omega$

۴ـ۱۰ ـ کاربرد فیلتر و تقویت‌کننده در نوسان‌سازها

■ در مورد انواع نوسان‌سازها و بخش‌های تشکیل‌دهنده مدار یک نوسان‌ساز و چگونگی ایجاد نوسان در پایه یازدهم توضیح لازم داده شد. در این واحد یادگیری، هدف بررسی نوع فیلتر در مدار نوسان‌ساز و فرمول تعیین فرکانس مدار و چگونگی محاسبه فرکانس در نوسان‌ساز است.

☑ کاربرد فیلتر و تقویت‌کننده در نوسان‌ساز RC (پل وین)

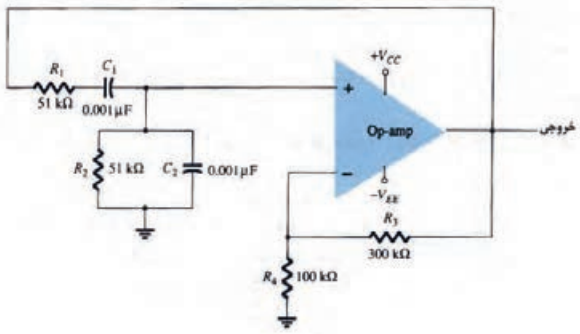
□ در مورد مدار فیدبک در مدار نوسان‌ساز پل وین که از نوع نوسان‌سازهای RC است، قبلاً توضیح داده شد. در این قسمت به محاسبه فرکانس نوسان مدار می‌پردازیم.

پژوهش

در مورد عملکرد مدار نوسان‌ساز پل‌وین تحقیق کنید و نتیجه را در قالب یک گزارش به صورت پاورپوینت ارائه دهید.

□ محاسبه فرکانس در نوسان‌ساز پل وین

مثال ۷: در مدار نوسان‌ساز پل وین شکل ۴۰ـ۱۰، فرکانس نوسان‌ساز را محاسبه کنید.



شکل ۴۰ـ۱۰ـ نوسان‌ساز پل وین

پاسخ:

در مدار نوسان‌ساز پل وین، اگر $R_1=R_2=R$ و $C_1=C_2=C$ باشد، فرکانس از رابطه $f_o=\frac{1}{2\pi RC}$ محاسبه می‌شود.

با جایگزینی مقادیر R و C در رابطه $f_o=\frac{1}{2\pi RC}$، فرکانس نوسان را به‌دست می‌آوریم.

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

$$f_o=\frac{1}{2\times 3/14\times 51\times 10^{3}\times 1\times 10^{-9}}$$

$$f_o=3122/27Hz=3/12KHz$$

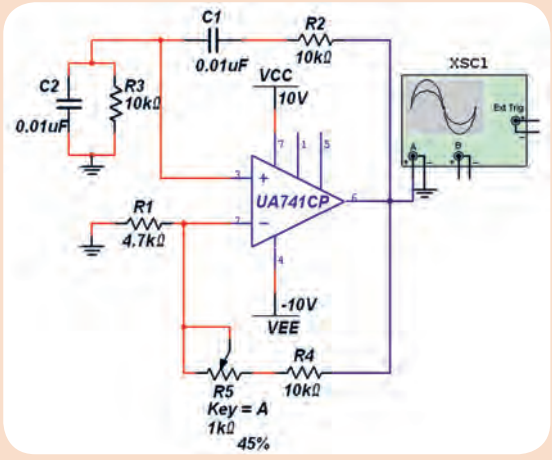
فعالیت در ساعات غیر درسی

مدار نوسان ساز پل وین شکل ۴۱ـ۱۰ را در نرم‌افزار مولتی سیم یا هر نرم‌افزارمناسب دیگر ببندید.

۱ـ دامنهٔ موج خروجی آن را توسط دستگاه اسیلوسکوپ اندازه بگیرید. فرکانس نوسان‌ها را به‌دست آورید.

۲ـ فرکانس نوسان‌ساز پل وین از چه رابطه‌ای به‌دست می‌آید؟ رابطه را بنویسید.

۳ـ آیا فرکانس محاسبه شده با فرکانس اندازه‌گیری شده در مدار شکل ۴۱ـ۱۰ برابر است؟ در صورت اختلاف، علت را توضیح دهید.

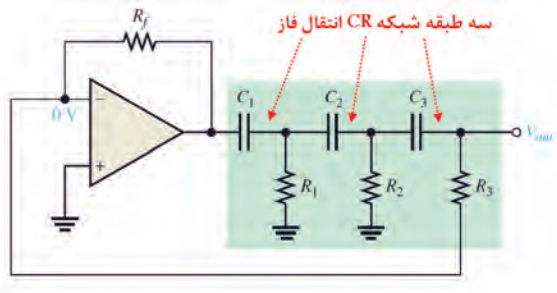


شکل ۴۱ـ۱۰ـ نوسان‌ساز پل وین

☑ کاربرد فیلتر و تقویت‌کننده در نوسان‌ساز انتقال فاز

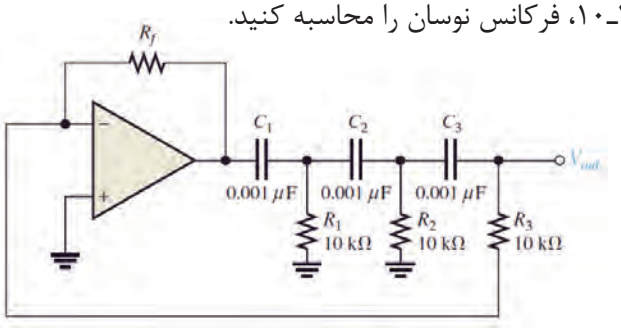
□ یک نمونه مدار نوسان ساز انتقال فاز در شکل ۴۲ـ۱۰ نشان داده شده است. در مسیر فیدبک مدار از سه طبقه شبکه RC انتقال فاز ۱۸۰درجه برای تهیه فیدبک مثبت استفاده شده است.

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



شکل ۴۲ـ۱۰ـ نوسان‌ساز انتقال فاز

مثال۸: در مدار نوسان‌ساز انتقال فاز شکل ۴۳ـ۱۰، فرکانس نوسان را محاسبه کنید.



شکل ۴۳ـ۱۰ـ نوسان‌ساز انتقال فاز

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

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

$$f_o = 6499/41\,Hz = 6/49\,KHz$$

فعالیت نرم‌افزاری

مدار نوسان‌ساز انتقال فاز را در نرم‌افزار ببندید و فرکانس نوسان آن را اندازه‌گیری کنید و با نتایج محاسبه شده مقایسه کنید.

☑ نوسان‌ساز با شبکهٔ فیدبک ترانسفورماتوری (آرمسترانگ ـ Armstrong) :

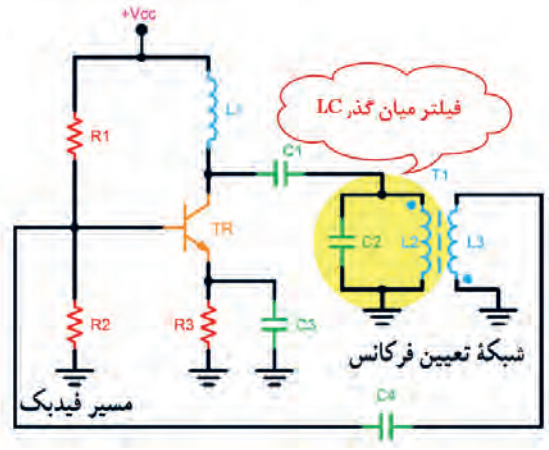
□ در این مدار عمل فیدبک از طریق یک ترانسفورماتور صورت می‌گیرد. این نوع مدار نوسان‌ساز را مدار Armstrong می‌نامند.

□ در شکل ۴۴ـ۱۰ مدار کلی نوسان‌ساز آرمسترانگ را مشاهده می‌کنید. مقدار فرکانس رزونانس مدار از رابطه $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}}$ محاسبه می‌شود. در این رابطه:

f_r = فرکانس نوسان اسیلاتور برحسب هرتز

L= ضریب خود القا برحسب هانری

C= مقدار ظرفیت خازن برحسب فاراد



شکل ۴۴ـ۱۰ـ نوسان‌ساز آرمسترانگ

مثال۹: در مدار نوسان ساز آرمسترانگ شکل ۴۴ـ۱۰ مقدار $L_2=58/6\mu H$ و $C_2=300\,pF$ است، فرکانس رزونانس مدار چقدر است؟

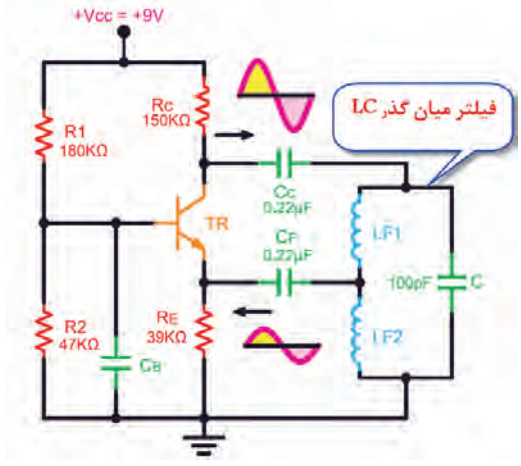
$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}}$$

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

$$f_r = 2/3\,MHz$$

☑ نوسان‌ساز هارتلی (Hartly):

□ در این نوسان‌ساز، ولتاژ فیدبک از طریق تقسیم ولتاژ روی سلف تأمین می‌شود. این نوسان‌ساز در فرکانس‌های بالا بهتر عمل می‌کند. شکل ۴۵ـ۱۰ فیلتر میان گذر LC و تقویت‌کننده بیس مشترک را در نوسان سازهارتلی نشان می‌دهد.



شکل ۴۵ـ۱۰ـ نوسان‌ساز هارتلی

چگونگی محاسبه فرکانس رزونانس مدار:

فرکانس تولید شده توسط نوسان‌ساز از رابطه $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{eq}C}}$ به‌دست می‌آید. در این رابطه:

L_{eq} ضریب خودالقایی معادل، L_m ضریب القای متقابل L_{F_2} و L_{F_1} ضریب خود القایی هر سیم‌پیچ برحسب‌هانری هستند. مقدار L_m از رابطهٔ $L_m = K\sqrt{L_{F_1}L_{F_2}}$ قابل محاسبه است. در این رابطه:

L_m = ضریب القای متقابل برحسب‌هانری

K ضریب کوپلاژ بین دو سیم‌پیچ است و $K = \frac{\varphi_2}{\varphi_1}$

φ_2 شار مغناطیسی سیم‌پیچ دوم و φ_1 شار مغناطیسی سیم‌پیچ اول هستند.

مثال۱۰: در مدار نوسان‌سازهارتلی شکل ۴۵ـ۱۰ اگر $L_{F_1}=100\mu H$ ، $L_{F_2}=100\mu H$، $L_m=20\mu H$ و $C=20pF$ باشد، فرکانس رزونانس را به‌دست آورید.

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

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

$$L_{eq}=1000+100+(2\times20)=1140\mu H$$

$$f_r = \frac{1}{2\times3/14\sqrt{1140\times10^{-6}\times20\times10^{-12}}}$$

$$f_r=1/05MHz$$

☑ **نوسان‌ساز کول پیتس (Colpitts):**

□ در صورتی که فیدبک مدار از طریق تقسیم ولتاژ توسط خازن صورت گیرد، مدار نوسان‌ساز را کول‌پیتس (Colpitts) می‌نامند.

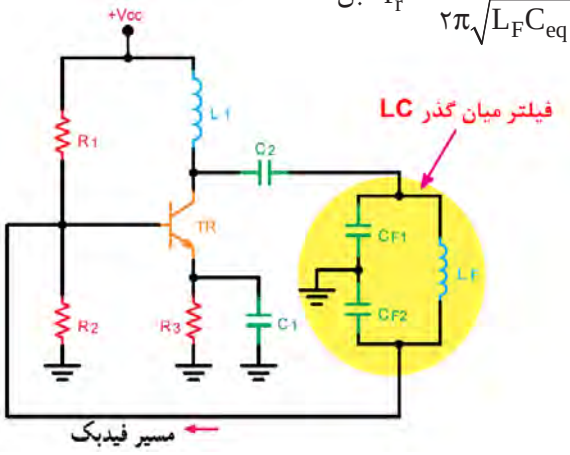
□ در شکل ۴۶ـ۱۰ یک نمونه مدار نوسان‌ساز کول‌پیتس ترسیم شده است. مدار تقویت‌کننده این نوسان‌ساز از نوع امیتر مشترک است.

□ مدار تعیین‌کننده فرکانس مجموعه خازن‌های C_{F1} و C_{F2} و سیم‌پیچ L_F است که یک فیلتر میان‌گذر LC را تشکیل می‌دهند.

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

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_{F_1}} + \frac{1}{C_{F_2}} \rightarrow C_{eq} = \frac{C_{F_1}C_{F_2}}{C_{F_1}+C_{F_2}}$$

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



شکل ۴۶ـ۱۰ـ نوسان‌ساز کول‌پیتس

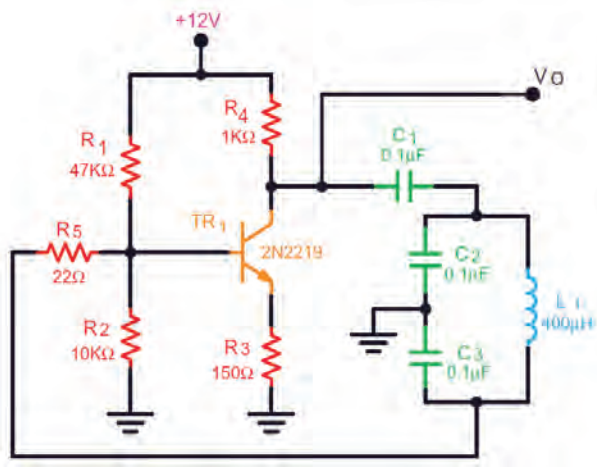
مثال ۱۱: فرکانس نوسان‌ساز شکل ۴۷ـ۱۰ را محاسبه کنید.

$$C_{eq} = \frac{C_۱ \times C_۲}{C_۱ + C_۲}$$

$$C_{eq} = \frac{۰/۱ \times ۰/۱}{۰/۱ + ۰/۱} = ۰/۰۵\mu F$$

$$f_r = \frac{۱}{۲\pi\sqrt{L_۱ C_{eq}}}$$

$$f_r = \frac{۱}{۲ \times ۳/۱۴\sqrt{۴۰۰ \times ۱۰^{-۶} \times ۵۰ \times ۱۰^{-۹}}} = ۳۵۶۱۲/۵۳Hz$$



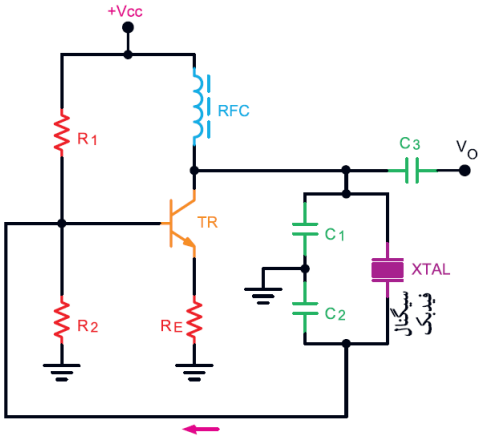
شکل ۴۷ـ۱۰ـ نوسان‌ساز کول پیتس

☑ **نوسان‌ساز کریستالی (Crystal Oscillator):**

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

☐ هر قطعه کریستال با توجه به برش و شکل مکانیکی آن می‌تواند در یک فرکانس کاملاً ثابت به ارتعاش درآید.

☐ در نوسان‌ساز کریستالی، کریستال در مدار تعیین فرکانس یا در مسیر فیدبک قرار می‌گیرد و فقط به فرکانس رزونانس خود اجازه عبور می‌دهد.

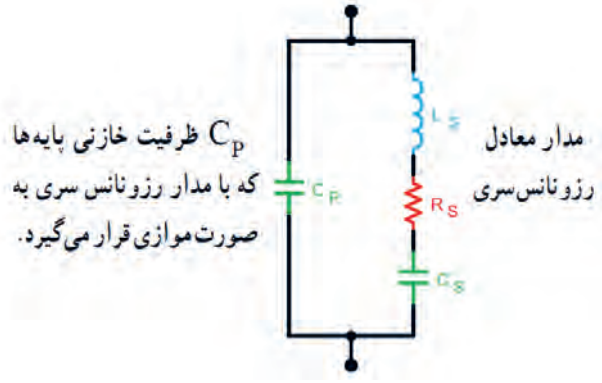


شکل ۴۸ـ۱۰ـ نوسان‌ساز کریستالی

☐ شکل ۴۸ـ۱۰ یک نوسان‌ساز 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 ۴۹ـ۱۰ با تقریب قابل قبول از رابطه $f_r \cong \frac{۱}{۲\pi\sqrt{L_s C_t}}$ محاسبه می‌شود.

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



شکل ۴۹ـ۱۰ـ مدار معادل کریستال کوارتز

مثال۱۲: در مدار نوسان‌ساز کریستالی شکل ۵۰ـ۱۰ چنانچه ظرفیت خازن معادل(C_t) برابر۱۰ نانو فاراد، و ضریب خودالقایی در کریستال ۰/۱ میلی‌هانری باشد، فرکانس رزونانس نوسان‌ساز را به‌دست آورید.

$$f_r = \frac{۱}{۲\pi\sqrt{L_s C_t}} \Rightarrow f_r = \frac{۱}{۲\times۳/۱۴\sqrt{۰/۱\times۱۰^{-۳}\times۱۰\times۱۰^{-۹}}} \Rightarrow f_r = ۱۵۹۲۳۵/۶Hz = ۱۵۹/۲۳۵KHz$$

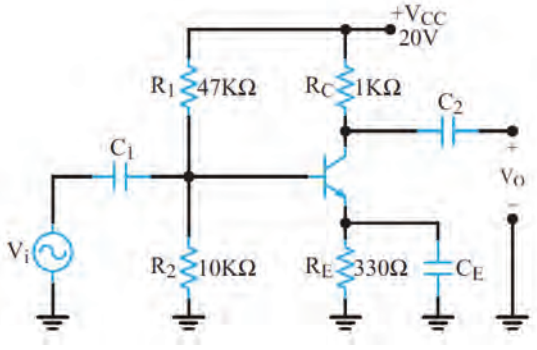
آزمون نظری پایان واحد یادگیری

۱ـ در تقویت‌کننده شکل ۵۰ـ۱۰ اگرحداقل فرکانس سیگنال ورودی (V_{in}) ۲۰۰ هرتز و $r_\pi \cong ۱k\,\Omega$ باشد، مطلوب است:

الف) ظرفیت خازن بای پس C_E

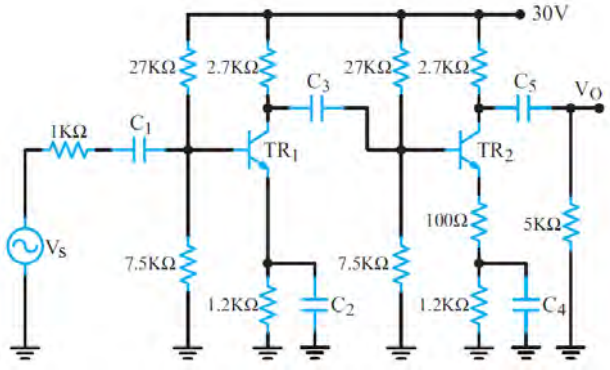
ب)مقاومت ورودی تقویت‌کننده

۲ـ نقش R_E به عنوان فیدبک منفی را شرح دهید.



شکل ۵۰ـ۱۰ـ تقویت‌کننده امیتر مشترک

۳ـ در مدار شکل ۵۱ـ۱۰ خازن‌های کوپلاژ و بای‌پاس را مشخص کنید.



شکل ۵۱ـ۱۰

۴ـ مدل DC و AC تقویت‌کننده شکل ۵۱ـ۱۰ را رسم کنید.

۵ـ انواع فید بک در مدارهای پل وین و انتقال فاز و کول‌پیتس را رسم کنید و رابطه فرکانس هر یک را بنویسید.

۶ـ اگر در نوسان ساز کول‌پیتس خازن معادل ۱۰۰ pF ظرفیت داشته باشد و $L=۱\mu H$ باشد، مقدار فرکانس نوسان را محاسبه کنید.

۷ـ در تقویت‌کننده دو طبقه با کوپلاژخازنی شکل ۵۱ـ۱۰با فرض $V_{BE}=۰/۷V$ و $\beta = ۱۰۰$ ، مقدار مقاومت دیود بیس‌امیتر ترانزیستور طبقه اول($r_{\pi ۱}$)را محاسبه کنید.

۸ـ امپدانس ورودی و خروجی تقویت‌کننده دو طبقه شکل ۵۱ـ۱۰ را به‌دست آورید.

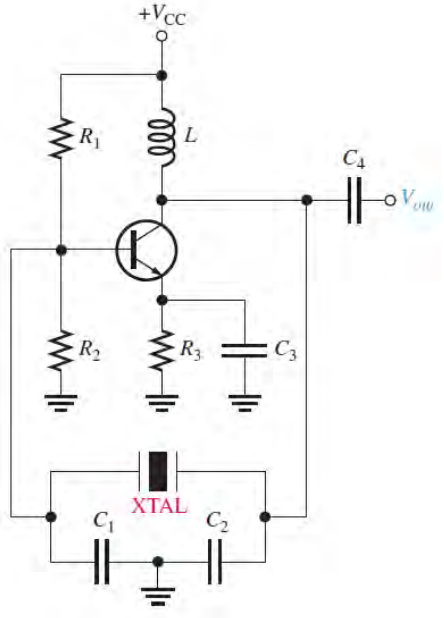
۹ـ فرکانس رزونانس یک نوسان‌ساز پل وین را با مقاومت‌های $R=10k\Omega$ و خازن‌های $C=47nF$ محاسبه کنید.

۱۰ـ در شبکه RC یک نوسان‌ساز انتقال فاز، مقدار مقاومت‌ها $R=22k\Omega$ و خازن‌ها $C=10nF$ است فرکانس رزونانس نوسان‌ساز را محاسبه کنید.

۱۱ـ فرکانس سیگنال خروجی نوسان‌ساز هارتلی را برای مقادیر زیر محاسبه کنید.

$L_{F1}=1/5mH$، $L_{F2}=1/5mH$، $L_m=0/5\ mH$ و $C_F=250pF$

۱۲ـ در مدار نوسان‌ساز کریستالی شکل ۵۲ـ۱۰ چنانچه ظرفیت خازن معادل C_t برابر با ۴۰ نانو فاراد و ضریب خودالقایی کریستال ۱۰میلی‌هانری باشد، فرکانس رزونانس نوسان‌ساز را به‌دست آورید.



شکل ۵۲ـ۱۰ـ نوسان‌ساز کریستالی

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

شرح کار:

۱ـ شرح مدار معادل خازن در مدارهای DC و AC ۲ـ شرح مدار معادل سلف در مدار DC و AC ۳ـ تشریح نقش خازن بای‌پاس، محاسبه ظرفیت خازن بای‌پاس در مدار CE ۴ـ شرح چگونگی ترسیم مدار معادل AC تقویت‌کننده امیتر مشترک ۵ـ تشریح منحنی پاسخ فرکانسی و پهنای باند تقویت‌کننده CE ۶ـ شرح چگونگی محاسبه کمیت‌های تقویت‌کننده CE یک طبقه و دو طبقه در حالت AC ۷ـ تشریح فیدبک و انواع آن، شرایط نوسان‌سازی و اصل بارک‌هاوزن۸ـ کاربرد فیلتر و تقویت‌کننده در نوسان‌ساز و محاسبه فرکانس در نوسان‌سازهای پل وین، انتقال فاز، آرمسترانگ، هارتلی، کولپیتس و کریستالی۹ـ استفاده از شبیه‌سازی نرم‌افزاری برای اصل بارک‌هاوزن و محاسبه فرکانس در نوسان‌سازها

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

شاخص‌ها:

انتخاب فضای مورد نظر و مناسب بودن آن (میز کار)	
ترسیم مدار معادل DC و AC تقویت‌کننده امیتر مشترک	(۲۰ دقیقه)
محاسبه خازن بای پس در مدار تقویت‌کننده امیتر مشترک	(۱۰ دقیقه)
ترسیم مدار معادل AC تقویت‌کننده دوطبقه کوپلاژ خازنی	(۱۰ دقیقه)
حل مسائل و محاسبه کمیت‌های تقویت‌کننده 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 ـ نور مناسب ـ ابعاد حداقل ۶ مترمربع و دارای تهویه یا پنجره ـ دمای طبیعی ($18^{\circ}C$ـ$27^{\circ}C$) و مجهز به وسایل اطفای حریق ـ لوازم‌التحریر ـ ماشین حساب ـ رایانه ـ 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 تقویت‌کننده CE و اجرای نرم‌افزاری	۲	
۳	محاسبه کمیت‌های تقویت‌کننده 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 (کول‌پیتس)، کریستالی و محاسبه فرکانس نوسان‌سازLC و اجرای نرم افزاری	۲	
شایستگی‌های غیرفنی، ایمنی، بهداشت، توجهات زیست محیطی و نگرش: ۱ـ رعایت نکات ایمنی دستگاه‌ها ۲ـ دقت و تمرکز در اجرای کار ۳ـ شایستگی تفکر و یادگیری مادام‌العمر ۴ـ اخلاق حرفه‌ای		۲	
میانگین نمرات			*

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

منابع

۱ـ برنامه درسی رشته الکترونیک، شورای برنامه‌ریزی رشته الکترونیک، دفتر تألیف کتاب‌های درسی فنی و حرفه‌ای و کاردانش، ۱۳۹۳.

۲ـ راهنمای برنامه درسی رشته الکترونیک، شورای برنامه‌ریزی رشته الکترونیک، دفتر تألیف کتاب‌های درسی فنی و حرفه‌ای و کاردانش، ۱۳۹۳.

۳ـ اصول و مبانی مدارهای الکتریکی، فلوید توماس، مترجم مهرداد عابدی، انتشارات جهاد دانشگاهی، دانشگاه امیرکبیر.

۴ـ 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 ـ 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.

۶ـ مبانی دیجیتال، یدالله رضازاده، غلامحسین نصری، فتح‌الله نظریان، مهین ظریفیان جولایی، رسول ملک محمد، محمد شبانی، شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، ۱۳۹۴.

۷ـ مدارهای الکتریکی، علی عراقی، فریدون علومی، شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، ۱۳۹۴.

۸ ـ آزمایشگاه مجازی ۲، مهین ظریفیان جولایی، سید محمود صموتی، سید علی صموتی، محمود شبانی، شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، ۱۳۹۴.

۹ـ کتاب آزمایشگاه مبانی مخابرات و رادیو جلد اول پایه سوم هنرستان شاخه فنی و حرفه‌ای، یداالله رضازاده، سید محمود صموتی، شهرام نصیری سوادکوهی، محمود شبانی، شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، ۱۳۹۴.

۱۰ـ سایت‌های اینترنتی برگه‌های اطلاعات Data book ، کتاب اطلاعات Data book و دستینه Hand book، ۲۰۱۸.

۱۱ـ Electronic Devices and circuit theory, Robert Boilstad luis Nashlasky, prentice - Hall, ۲۰۰۵.

۱۲ـ Electronic Devices (Conventional Current Version), 10th Edition, Thomas L.Floyd, McGraw - Hall, ۲۰۱۸.

۱۳ـ TinyAVR Microcontroller Projects for the Evil Genius (Evil Genius Series) 1 st Edition, Dhananjay Gadre, Nehul Malhotra, McGraw - Hall.

۱۴ـ Digital Electronics, Roger L.Tokheim, McGraw - Hall, ۱۹۹۰.

۱۵ـ Digital Design, M.Morris Mano, prentice - Hall, ۱۹۸۴.

۱۶ـ Schaum's Outline of Electronic Communication, Lioyd Temes, McGraw - Hall, ۱۹۹۸.

۱۷ـ Electronic communication, Lioyd Temes, McGraw - Hall, ۱۹۸۸.

۱۸ـ 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 دربارهٔ 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 دبیرخانهٔ 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 ارائهٔ 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 ـ کد ۲۱۲۲۷۵

ردیف	نام و نام خانوادگی	استان محل خدمت	ردیف	نام و نام خانوادگی	استان محل خدمت
۱	علی صادقی	قزوین	۱۱	ماشاالله 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 زارعی‌خیرآبادی	چهارمحال و بختیاری	۱۵	علی نیکوصحبت	قم
۶	حسین رعنایی	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 دهقان‌تنها	خراسان جنوبی	۲۰	مژگان میرشاهی	شهرستان‌های تهران