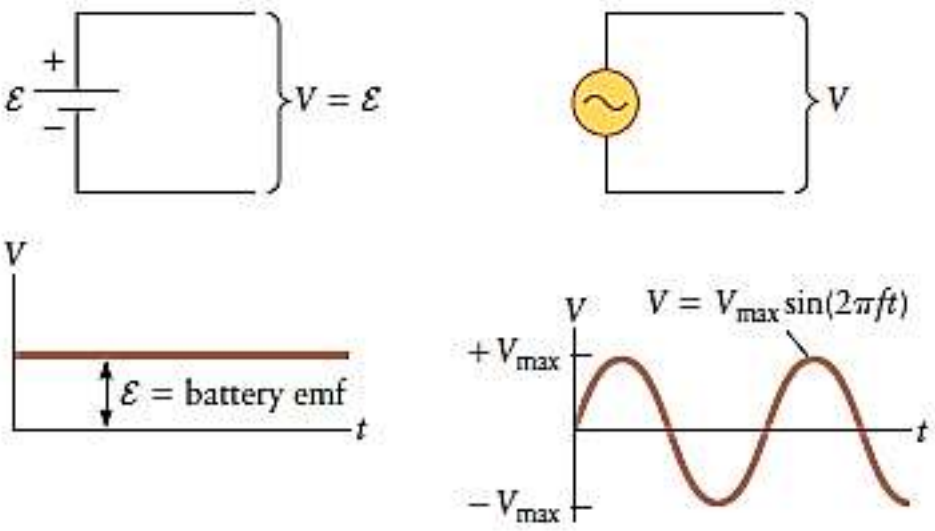
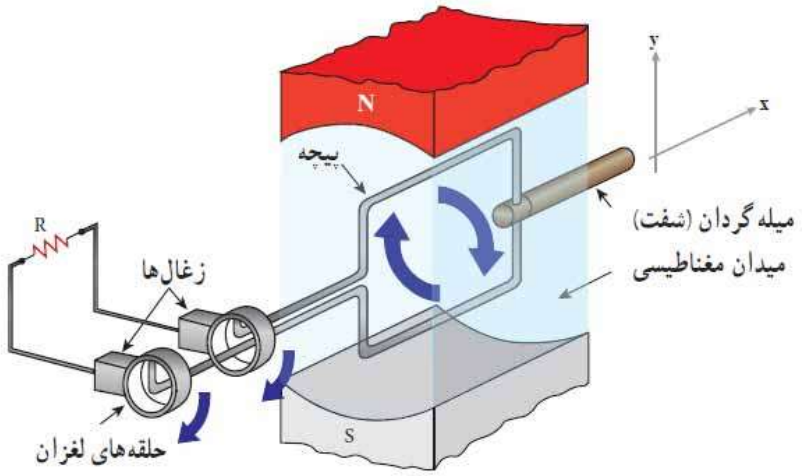
در اواخر قرن نوزدهم، بحث های داغی بین توماس ادیسون و جورج وستینگهاوس درباره بهترین روش انتقال انرژی الکتریکی از محل تولید تا محل مصرف صورت گرفت. ادیسون موافق جریان مستقیم (DC) بود، در حالی که وستینگهاوس از جریان متناوب (AC) حمایت می کرد. سرانجام، و ستینگهاوس پیروز شد و پس از آن سامانه های انتقال و توزیع برق و بی شتر و سایل خانگی با جریان متناوب سینوسی به کار افتادند.



در شکل بالا قسمت سمت چپ می بینید که مولد dc نیروی محرکه الکتریکی ایجاد می کند که مقدارش در طول زمان ثابت است و جریان مستقیم ایجاد می کند. اما در شکل سمت راست مولد، نیروی محرکه الکتریکی با مقادیر مختلف ایجاد می کند که جریان الکتریکی متناوب ac ایجاد می کند. به علامت مولد های ac در شکل توجه کنید. تمامی نیروگاه های برق دنیا و از جمله ایران، جریان متناوب تولید می کنند که تابعی سینوسی از زمان است و به همین دلیل، جریان متناوب سینوسی نامیده می شود.

تولید جریان متناوب سینوسی

یکی از کاربردهای مهم اثر القای الکترومغناطیسی، تولید جریان متناوب است. اگر عامل تغییر شار مغناطیسی، تغییر زاویه بین میدان مغناطیسی و نیم خط عمود بر سطح پیچه باشد، طوری که این زاویه در هر لحظه تغییر کند، جریان القایی در پیچه از نوع جریان متناوب است. رایج ترین روش برای تولید جریان متناوب القایی، چرخاندن پیچه در فضای میدان مغناطیسی یا چرخاندن آهنربای الکتریکی در درون پیچه است. در شکل زیر مشاهده می کنید که پیچه را در فضای میدان مغناطیسی می چرخانند تا جریان الکتریکی در آن القا شود.



هر دور چرخش پیچه، معادل 2π رادیان است. اگر پیچه به طور یکنواخت بچرخد و هر دور چرخش آن T ثانیه طول بکشد، پیچه در مدت t ثانیه به اندازه t/T دور خواهد چرخید. که T دوره یا زمان تناوب است و یکای آن ثانیه است. به تناسب زیر توجه کنید.

θ	t
2π	T

$$\theta = \frac{2\pi}{T}\, t$$

$$\Phi = BA\cos\theta$$

$$\Phi = BA\cos\frac{2\pi}{T}t$$

همانطوری که مشاهده می کنید شار مغناطیسی با گذشت زمان، تغییر می کند. برای اینکه مقدار نیروی محرکه القایی در هر لحظه را بدست آوریم باید از شار مغناطیسی نسبت به زمان مشتق بزنیم.

$$\xi = -N\frac{d\Phi}{dt} = -N(-\frac{2\pi}{T}\ BA)\ \sin\frac{2\pi}{T}t$$

$$\xi = NBA(\frac{2\pi}{T})\ \sin\frac{2\pi}{T}t$$

با تعریف نیروی محرکه القایی بیشینه به صورت زیر می توان رابطه مناسبی را استخراج کرد.

$$\xi_{max} = \xi_m = (\frac{2\pi}{T})NBA$$

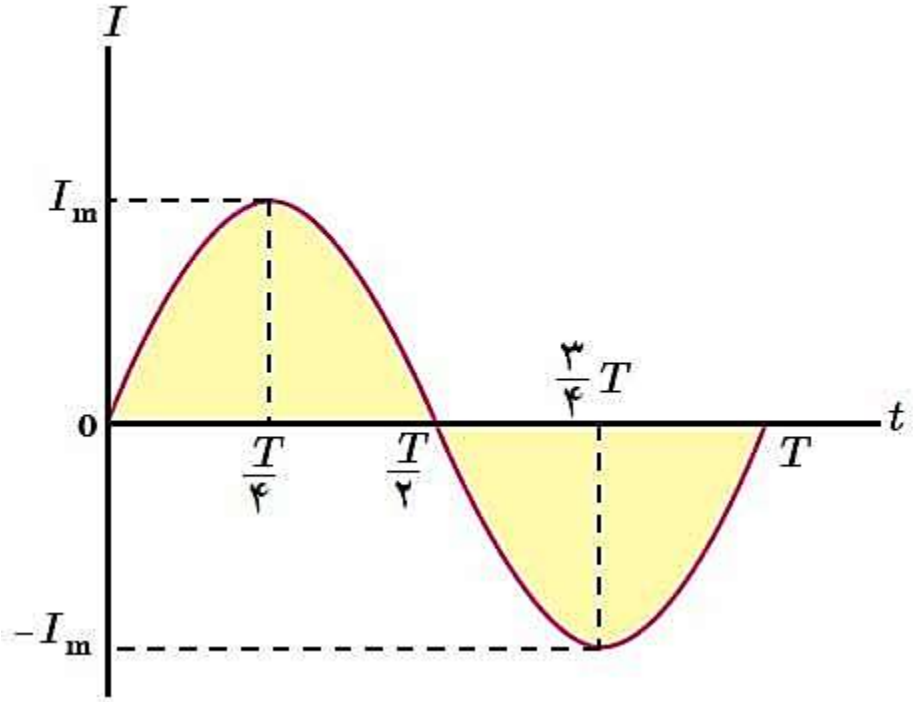
$$\xi = \xi_m \sin\frac{2\pi}{T}t$$

برای محاسبه جریان القایی متناوب کافیست این مقدار را بر مقاومت پیچه (R) تقسیم کنیم.

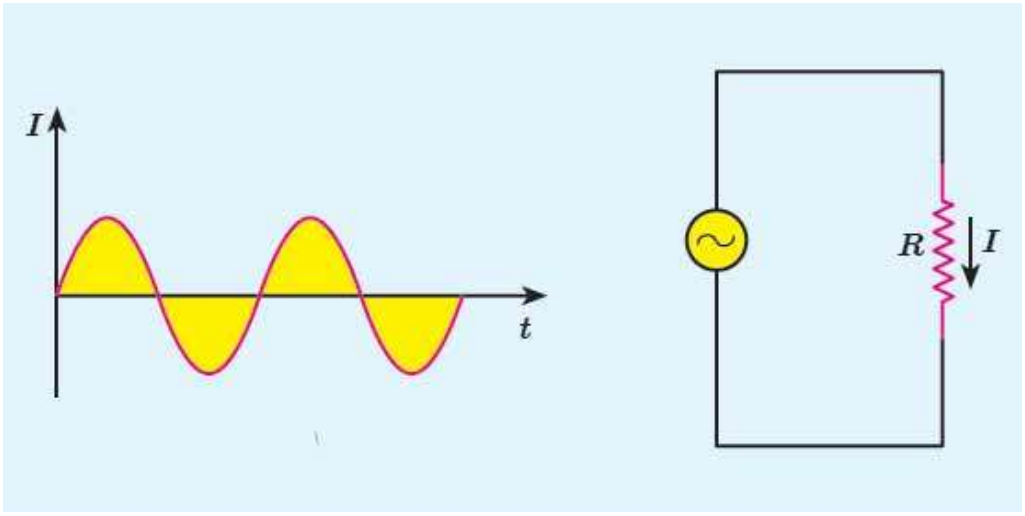
$$I = \frac{\xi}{R} = \frac{\xi_m}{R}\sin\frac{2\pi}{T}t$$

$$I = I_m \sin\frac{2\pi}{T}t$$

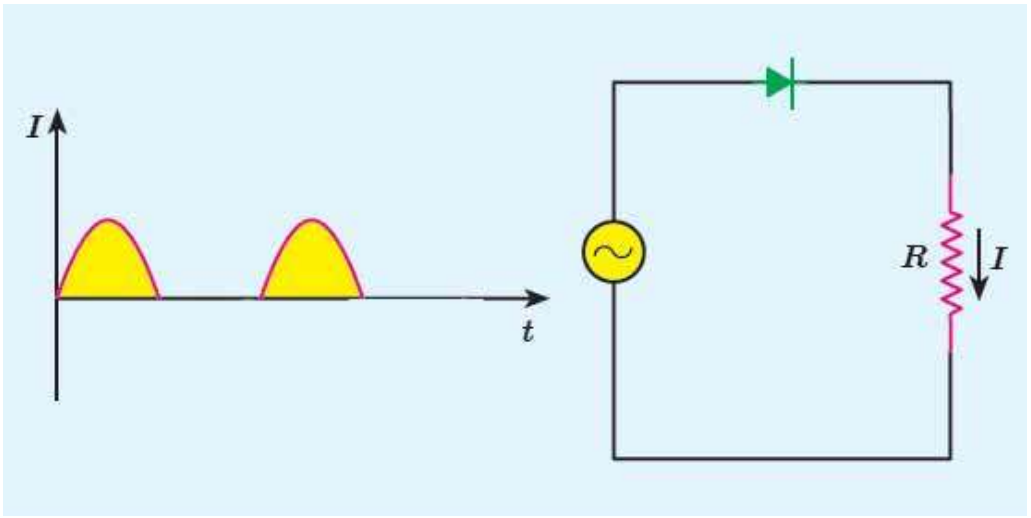
در این رابطه I_m بیشینه جریان القا شده در پیچه است. همچنین این رابطه جریان القایی را به صورت سینوسی نشان می دهد به همین دلیل به آن جریان متناوب گویند. نمودار جریان بر حسب زمان به صورت شکل زیر می شود.



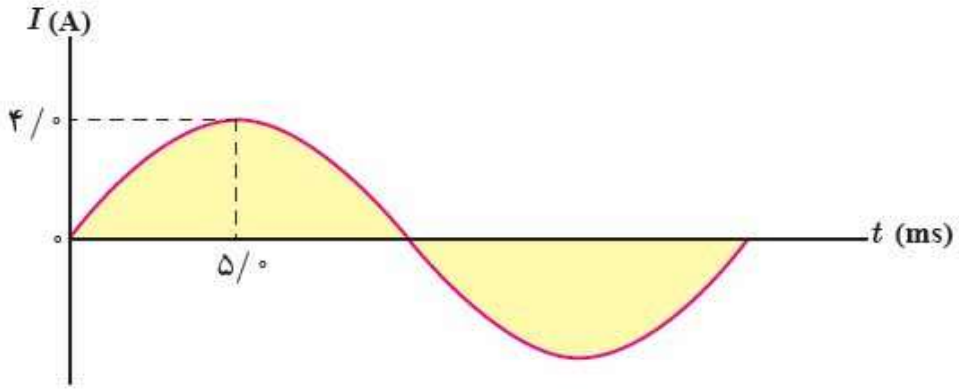
با توجه به رابطه و نمودار جریان بر حسب زمان در بالا، می توان نتیجه گرفت علاوه بر اینکه مقدار جریان تغییر می کند بلکه جهت آن نیز در حال تغییر است. اگر از یک دیود (یکسو کننده جریان) در مدار الکتریکی با جریان متناوب استفاده کنیم، می توانیم جریان در یک جهت داشته باشیم. به طور مثال در شکل زیر یک مدار الکتریکی ساده جریان متناوب داریم که نمودار جریان آن در کنار آن رسم شده است.



اگر یک دیود در این مدار الکتریکی مطابق شکل زیر قرار دهیم فقط جریان الکتریکی را در یک سمت از خود عبور می دهد. یعنی فقط قسمت های بالای نمودار جریان- زمان دیده خواهد شد (یا برعکس).



مثال 1: شکل زیر، نمودار جریان متناوب سینوسی را نشان می دهد که یک مولد جریان متناوب تولید کرده است. معادله جریان بر حسب زمان را بنویسید.



پاسخ مثال 1: چون ربع چرخه در 5 میلی ثانیه طی شده است، دوره تناوب 20 میلی ثانیه می شود. و با توجه به نمودار مقدار جریان بیشینه 4 آمپر است.

$$\frac{T}{4} = 5 \times 10^{-3} \rightarrow T = 20 \times 10^{-3}\ s$$

$$I_m = 4A$$

$$I = I_m \sin\frac{2\pi}{T}t \rightarrow I = 4\sin\left(\frac{2\pi}{0.02}\ t\right) \rightarrow I = 4\sin 100\pi t$$

مثال 2: معادله جریان- زمان یک مولد جریان متناوب بر حسب یکاهای *SI* به صورت معادله زیر است. الف) جریان در دو لحظه $t_1=2ms$ و $t_2=8ms$ چقدر است؟ ب) دوره تناوب جریان با بدست آورید و نمودار جریان-زمان را در یک دوره کامل رسم کنید.

$$I = (4 \times 10^{-3}) \sin 250\pi t$$

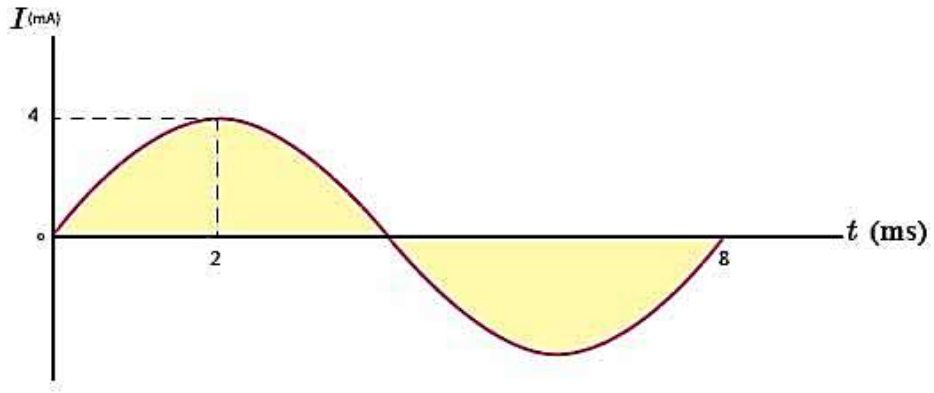
پاسخ مثال 2: الف)

$$t_1 = 2 \times 10^{-3} \rightarrow I_1 = (4 \times 10^{-3}) \sin 250\pi \times 2 \times 10^{-3} = (4 \times 10^{-3}) \sin\frac{\pi}{2} = 4 \times 10^{-3}\ A$$

$$t_2 = 8 \times 10^{-3} \rightarrow I_2 = (4 \times 10^{-3}) \sin 250\pi \times 8 \times 10^{-3} = (4 \times 10^{-3}) \sin 2\pi = 0$$

ب)

$$\frac{2\pi}{T} = 250\pi \rightarrow T = 8 \times 10^{-3}\ s$$



مثال 3: جریان متناوبی که بیشینه آن 2 آمپر و دوره آن 0.02 ثانیه است، از یک رسانای 5 اهمی می گذرد.

الف) اولین لحظه ای که در آن جریان بیشینه است چه لحظه ای است؟ در این لحظه نیروی محرکه القایی چقدر است؟

ب) در لحظه t=1/400 ثانیه جریان چقدر است؟

پاسخ مثال 3: الف) برای اولین بار در لحظه $t = \frac{T}{4} = 0.005\ s$ جریان بیشینه می شود.

$$\xi_m = I_m R = 2 \times 5 = 10\ A$$

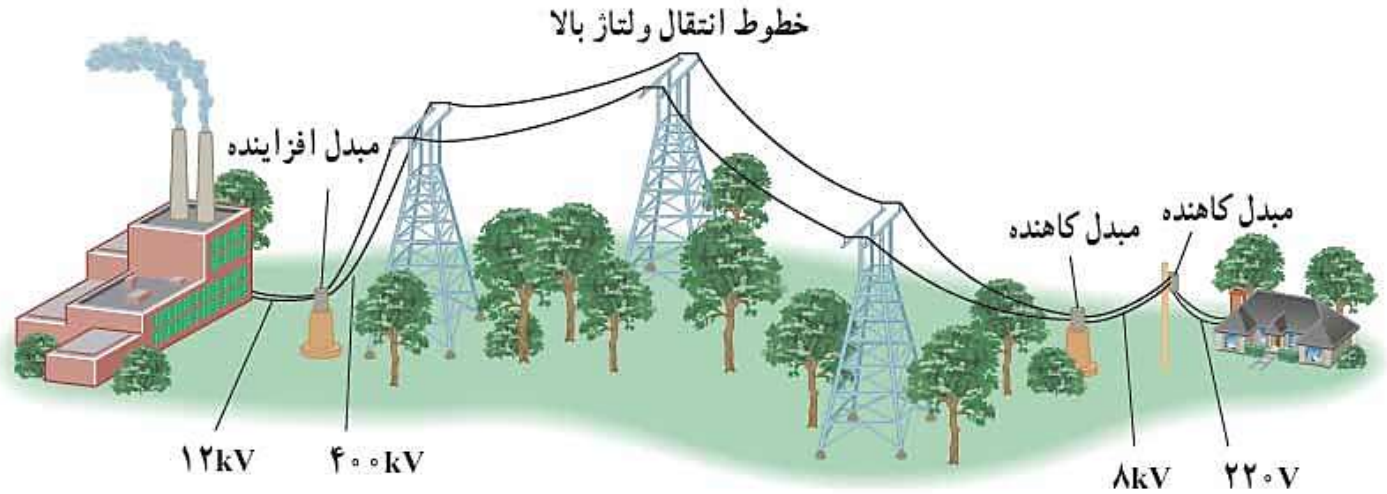
ب)

$$I = I_m \sin\frac{2\pi}{T}t = 10\ \sin\frac{2\pi}{0.02} \times \frac{1}{400} = 10\ \sin\frac{\pi}{4} = 10 \times \frac{\sqrt{2}}{2} = 5\sqrt{2}\ A$$

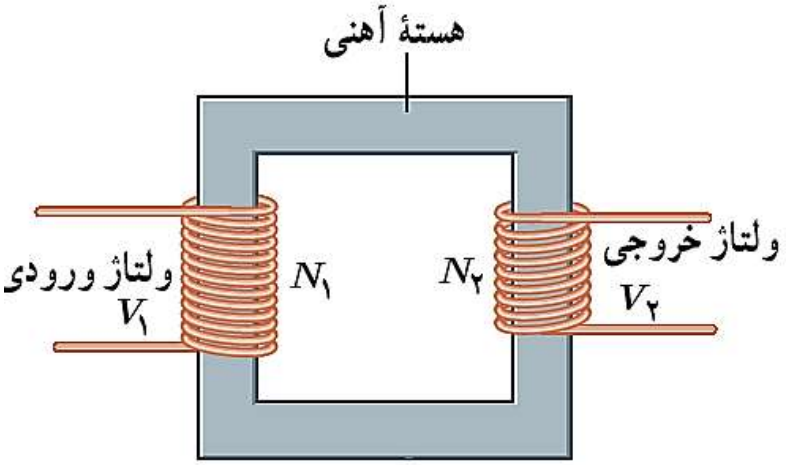
مبدل ها

یکی از مزیت های مهم توزیع توان الکتریکی ac بر dc آن ات که افزایش و کاهش ولتاژ ac ، بسیار آ سان تر ا ست. برای انتقال توان الکتریکی در فاصـــله های دور، باید از ولتاژهای بالاتر و جریان های کمتر اســـتفاده کنیم تا اتلاف را به حداقل برســـانیم. همچنین با توجه به کاهش جریان می توان از سیم های نازک تری استفاده کرد که موجب صرفه جویی در هزینه ها می شود.

خط های انتقال توان الکتریکی از ولتاژهایی بالا در حدود 400 کیلوولت استفاده می کنند در حالی که وسایل خانگی و صنعتی با ولتاژ 220 ولت (در ایران) کار می کنند. بنابراین باید در خروجی نیروگاه و ورودی مصارف خانگی و صنعتی تغییر ولتاژ صورت گیرد. برای اینکار از مبدل ها استاده می کنند.

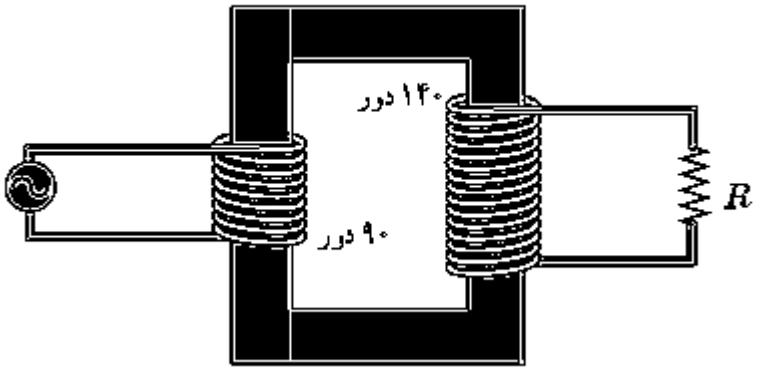


در شکل زیر مبدلی شامل دو پیچه با تعداد دورهای متفاوت را می بینید که دور یک هسته آهنی (فرومغناطیس نرم) پیچیده شده اند. در عمل پیچه اولیه با N_1 دور به ولتاژ V_1 بسته شده است و پیچه ثانویه با N_2 دور ولتاژ V_2 را تامین می کند. برای یک مبدل آرمانی که مقاومت پیچه های آن نا چیز است، از رابطه زیر استفاده می کنیم.



$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

مثال 4: در مبدل آرمانی شکل زیر، اگر بیشینه ولتاژ دو سر مقاومت R برابر 7 ولت باشد، بیشینه ولتاژ مولد چقدر است؟



$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

$$\frac{7}{V_1} = \frac{140}{90} \rightarrow V_1 = 4.5\ V$$

محاسبات قسمت مبدل ها، مخصوص رشته ریاضی و فیزیک است و دانش آموزان رشته علوم تجربی به آن نیاز ندارند.

تمرین 1: در یک ر سانای اهمی، به مقاومت 20 اهم جریان متناوبی با بیشینه نیروی محرکه 120 ولت می گذرد. اگر دوره تناوب این جریان 0.02 ثانیه باشد، معادله شدت جریان را بر حسب زمان در SI بنویسید.

$R = ۲۰\,\Omega \qquad \mathcal{E}_m = ۱۲۰\,V \qquad T = ۰/۰۲\,s$

$$I_m = \frac{\mathcal{E}_m}{R} = \frac{۱۲۰}{۲۰} = ۶\,A$$

$$I = I_m \sin\frac{۲\pi}{T} t$$

$$I = ۶ \sin\frac{۲\pi}{۰/۰۲} t$$

$$\boxed{I = ۶ \sin ۱۰۰\pi t}$$

تمرین 2: جریان متناوبی که بیشینه آن 0.3 آمپر ا ست و دوره آن 0.02 ثانیه ا ست از سیملوله ای به ضریب القاوری 200 میلی هانری می گذرد. الف) معادله جریان بر حسب زمان را بنویسید. ب) بیشینه انرژی ذخیره شده در این سیملوله چند ژول است؟

$I_m = ۰/۳\,A \qquad T = ۰/۰۲\,s \qquad L = ۲۰۰\,mH$

الف) $I = I_m \sin\frac{۲\pi}{T} t = ۰/۳ \sin\frac{۲\pi}{۰/۰۲} t$

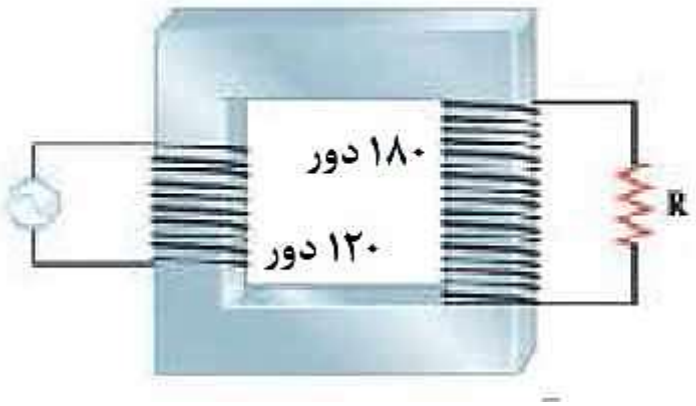
$$\boxed{I = ۰/۳ \sin ۱۰۰\pi t}$$

تبدیل به هانری

ب) $U_{max} = \frac{۱}{۲} L I_m^۲ = \frac{۱}{۲} \times ۲\times ۱۰^{-۱} \times (۹\times ۱۰^{-۲})$

$$U_{Max} = ۹\times ۱۰^{-۳}\,J = \boxed{۹\,mJ}$$

تمرین 3: الف) در شکل زیر از پیچه اولیه، با مقاومت 40 اهم جریانی به معادله $I=0.8\sin 200\pi t$ در SI می گذرد. بیشینه ولتاژی که از سیم پیچ ثانویه می گذرد، چند ولت است؟ ب) اگر ضریب القاوری پیچه اولیه 0.02 هانری باشد، بیشینه انرژی ذخیره شده در این پیچه چند ژول است؟



الف) بیشینه جریان پیچه اول $I_{m_1} = 0.8\ A$ ، $R = 40\ \Omega$

سمت چپ $V_1 = \mathcal{E}_{m_1} = I_{m_1} R = 0.8 \times 40 = 32\ V$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

$$\frac{V_2}{32} = \frac{180}{120} \rightarrow V_2 = 48\ V$$

سمت راست

$$U_{max_1} = \frac{1}{2} L I_{m_1}^2 = \frac{1}{2} \times 0.02 \times (64 \times 10^{-2})$$

$$U_{max_1} = 6.4 \times 10^{-3}\ J = 6.4\ mJ$$

تمرین 4: جریان متناوبی که بیشـــینه آن 4 آمپر و دوره آن 0.02 ثانیه اســـت، از یک رســـانای 6 اهمی می گذرد. الف) معادله جریان-زمان را بنویسید. ب) بیشینه نیروی محرکه القایی چند ولت است؟

$I_m = 4A \quad , \quad T = 0.02s \quad R = 4\Omega$

الف) $I = I_m \sin \frac{2\pi}{T} t$

$I = 4 \sin \frac{2\pi}{0.02} t = 4 \sin 100\pi t$

ب) $\mathcal{E}_m = I_m R = 4 \times 4 = 24V$

تمرین 5: جریان متناوبی که معادله آن در SI به صورت I=0.4Sin20πt است از یک رسانای 5 اهمی می گذرد. برای اولین بار در چه لحظه ای بر حسب ثانیه نیروی محرکه القایی در رسانا برابر 2 ولت می شود؟

$I = 0.4 \sin 20\pi t \quad , \quad R = 5\Omega$

($0.4 = I_m$)

$\mathcal{E}_m = I_m R = 0.4 \times 5 = 2V$

$\mathcal{E} = \mathcal{E}_m \sin \frac{2\pi}{T} t$

$\mathcal{E} = 2 \sin 20\pi t$

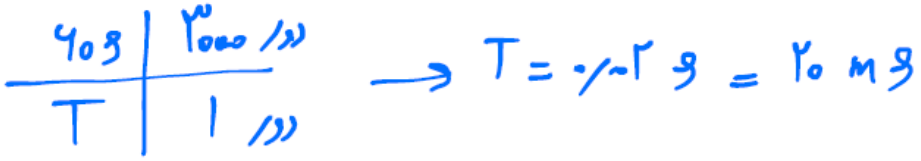
$\mathcal{E} = 2V \rightarrow 2 = 2 \sin 20\pi t \rightarrow \sin 20\pi t = 1$

$20\pi t = \frac{\pi}{2} \rightarrow t = \frac{1}{40} s$

برای اولین بار در $\frac{T}{4}$ بیشینه می شود.

$\sin 90$ یعنی در

تمرین 6: در یک مولد جریان متناوب، پیچه در هر دقیقه 3000 دور می گردد. اگر در لحظه t=0 ســطح قاب بر خطوط میدان مغناطیسی عمود باشد، در چه زمان هایی، اندازه نیروی محرکه القایی در پیچه صفر است؟



در لحظه $t=0$ سطح قاب بر خطوط میدان عمود است یعنی شار بیشینه است.

چون رابطه شار با $\cos\omega t$ و رابطه جریان القایی با $\sin\omega t$ است وقتی شار بیشینه است، جریان القایی و نیروی محرکه القایی صفر هستند.

$$t = 0, \frac{T}{2}, T, \frac{3T}{2}, 2T, \dots$$

زمان هایی که نیروی محرکه القایی صفر هستند.

$$t = 0, 10\,ms, 20\,ms, 30\,ms, 40\,ms, \dots$$