Ankara Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi, Fizik Mühendisliği Bölümü

FZM207

Temel Elektronik-I

Prof. Dr. Hüseyin Sarı

4. Bölüm

Üstel Uyarım ve Dönüşmüş Devreler-1

4. Bölüm: Üstel Uyarım ve Dönüşmüş Devreler

İçerik

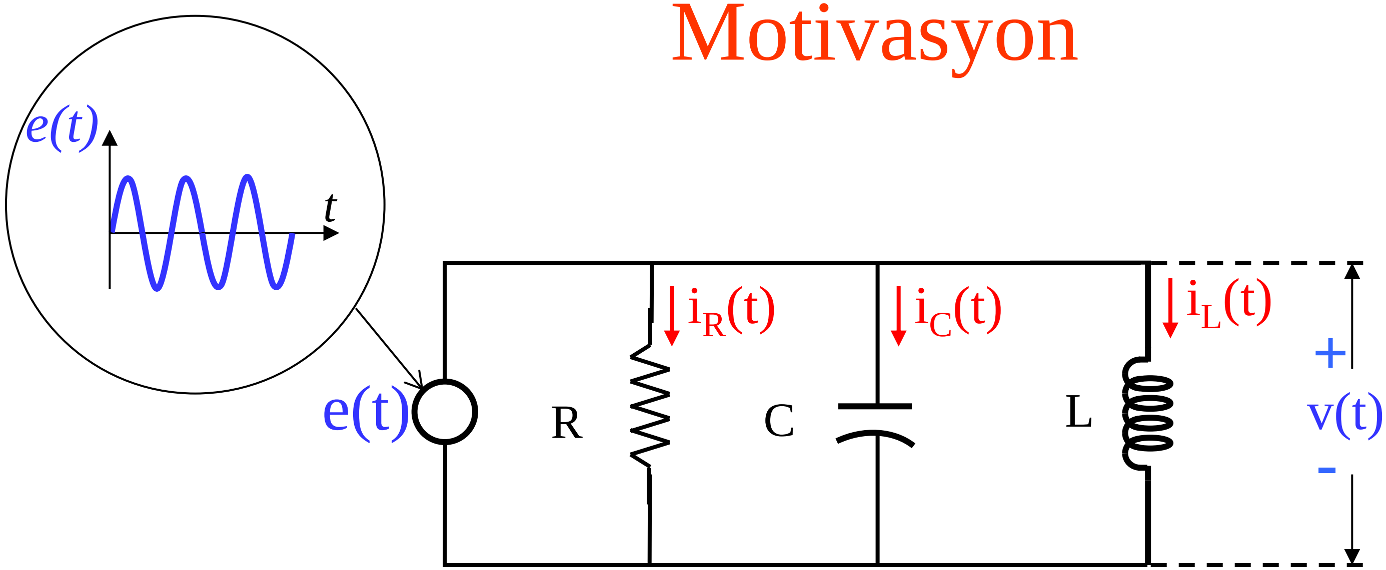
- Uyarımın Üstel Fonksiyonlarla Gösterilmesi
- Tek Öğe Tepkileri
- Üstel Uyarım ile Zorlanmış Tepki
- Sinüsel Uyarım ile Zorlanmış Tepki
- Dönüşmüş Devre
- Giriş İmpedansı ve Edmitansı
- Dönüşmüş Devreler Kullanarak Çözümleme
- Devre Fonksiyonlarının Genel Değerlendirilmesi

Bu derste,

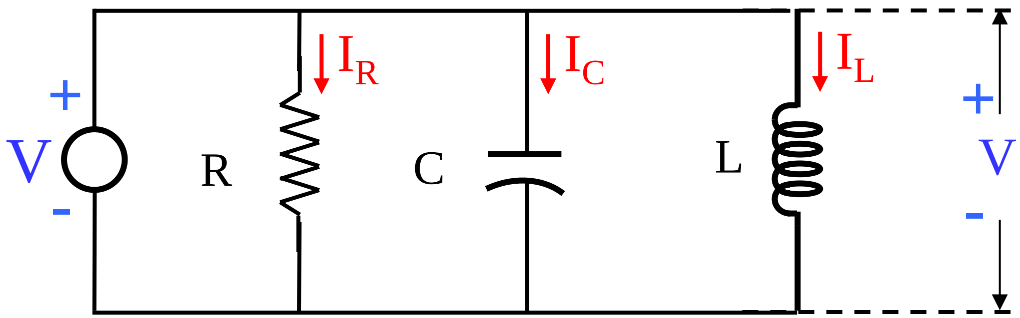
- Zamanla üstel olarak değişen uyarılmalara devrenin verdiği tepkiler,
- Sığa ve bobin içeren devrelerin basit dirençli devrelere dönüştürülmesi,
- İmpedans ve edmitans kavramları,

öğrenilmiş olacak.

Motivasyon



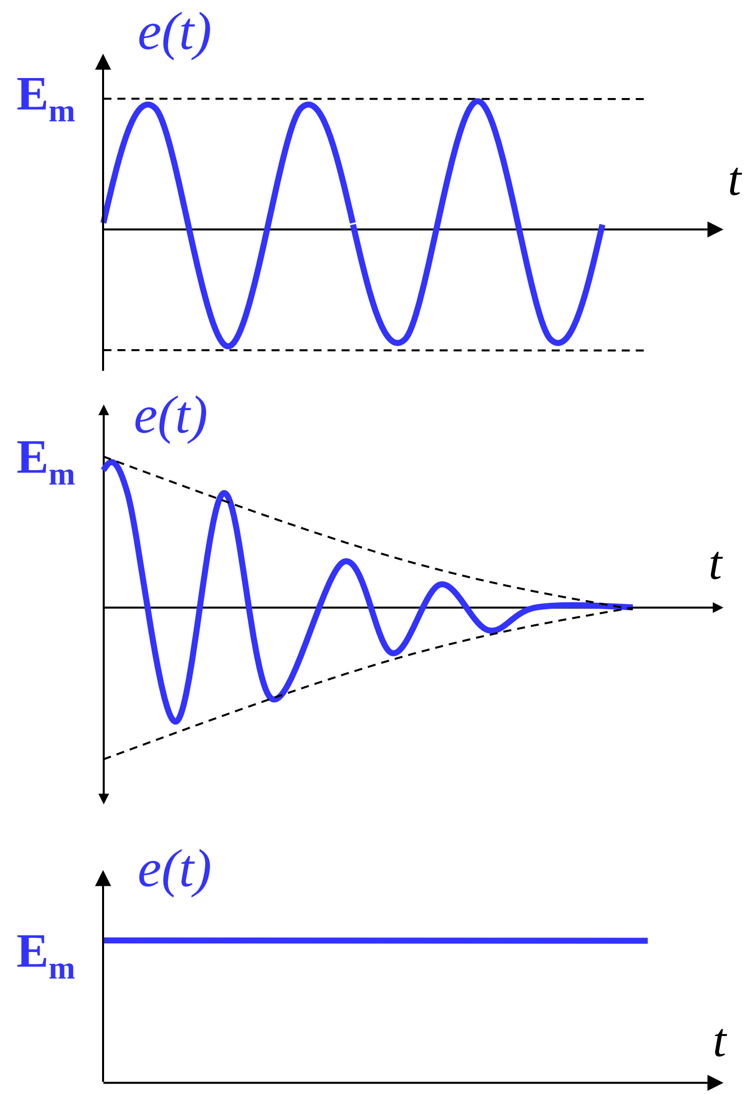
Yukarıdaki devre (ac) nasıl doğru akım (dc) devresi gibi incelenebilir?

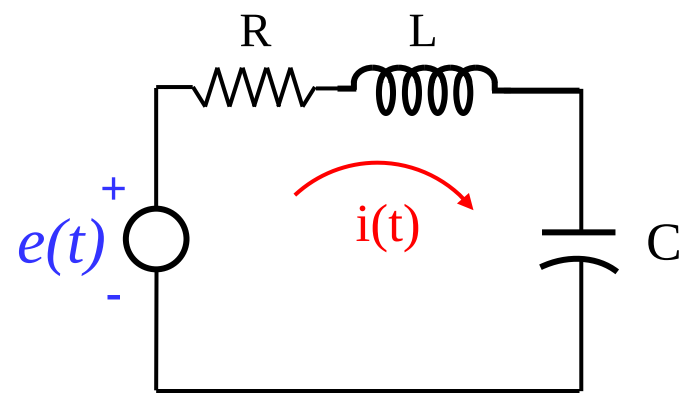


Direnç, bobin ve sığa içeren devrenin eşdeğer direnci (empedans) nasıl hesaplanır? Böyle devrelerde direnç frekansa bağlı mıdır?

Uyarımların Üstel Fonksiyonlarla Gösterilmesi

Uygulamalarda pek çok devre uyarılmaları üstel fonksiyonlarla gösterilebilir. Dolayısıyla peryodik değişen bir sinyal (ac) ve doğru akım (dc) da üstel fonksiyonlarla gösterilebilir.





$$e(t) = E_m e^{st}$$

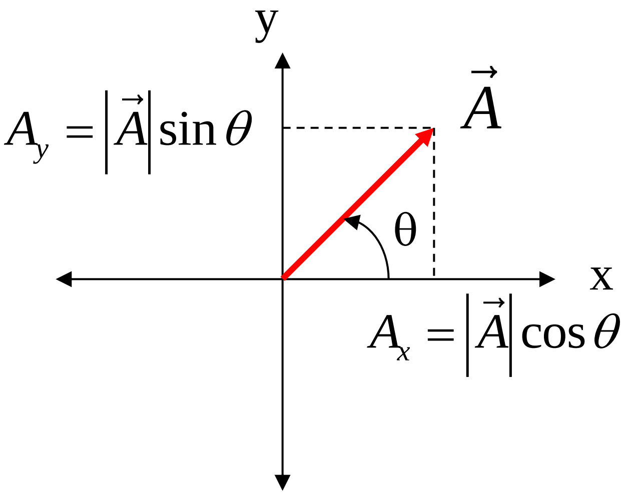
s=a+jb karmaşık sayı

$$i(t) = Ie^{i\omega t}$$

$$v(t) = Ve^{i\omega t}$$

Karmaşık Sayılar-Hatırlatma

Düzlem üzerindeki bir vektör, bileşenlerine ayrılarak ifade edilebilir.



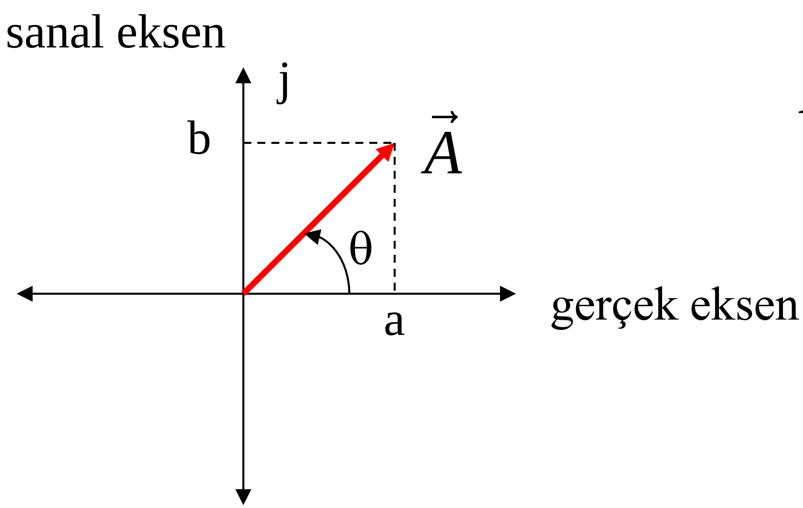
$$\vec{A} = \left(\left|\vec{A}\right| \cos\theta\right)\hat{i} + \left(\left|\vec{A}\right| \sin\theta\right)\hat{j}$$

$$\vec{A} = \left(A_x\right)\hat{i} + \left(A_y\right)\hat{j}$$

$$|A| = \sqrt{A_x^2 + A_y^2}$$

$$\theta = -\tan^{-1}\left(\frac{A_y}{A_x}\right)$$

A vektörü, karmaşık düzlemde karmaşık bir sayı ile ifade edilebilir.

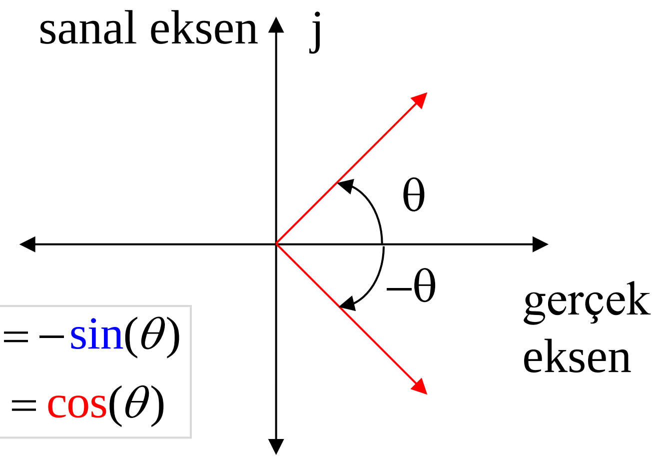


$$\vec{A} = a + jb$$

$$\boxed{\begin{aligned} |A| &= (a + jb).(a - jb) \\ &= \sqrt{a^2 + b^2} \\ \theta &= -\tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) \end{aligned}}$$

Uyarımların Üstel Fonksiyonlarla Gösterilmesi

Karmaşık sayı, trigonometrik ve üstel fonksiyonlar arasındaki ilişki:



$\sin(-\theta) = -\sin(\theta)$

$\cos(-\theta) = \cos(\theta)$

$$e^{j\theta} = \cos\theta + j\sin\theta$$

$\theta \rightarrow -\theta$

$$e^{-j\theta} = \cos\theta - j\sin\theta$$

$$\cos\theta = \frac{e^{j\theta} + e^{-j\theta}}{2}$$

$$\sin\theta = \frac{e^{j\theta} - e^{-j\theta}}{2j}$$

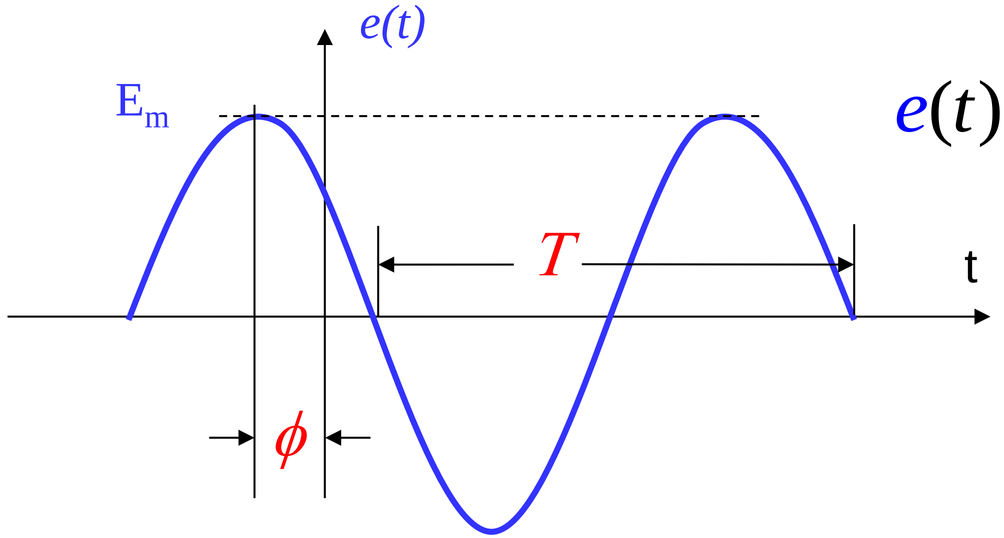
Trigonometrik Fonksiyonlar:

$$\sin(\omega t + \phi) = \cos(\omega t + \phi - \pi/2)$$

$$A\cos(\omega t) + B\sin(\omega t) = \sqrt{A^2 + B^2}\cos(\omega t - \tan^{-1}(B/A))$$

Not:
$\tan^{-1}(B/A)$, *rad* olarak ifade edilmelidir.

Periyodik bir fonksiyon, üstel fonksiyonlarla ifade edilebilir.



$$e(t) = E_m \cos(\omega t + \phi)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\upsilon$$

ϕ = faz açısı
ω = açısal frekans
T = periyot
ν = frekans

$$e(t) = E_m \cos(\omega t + \phi) \quad \Longrightarrow \quad e(t) = \frac{E_m}{2}\left[e^{j(\omega t+\phi)} + e^{-j(\omega t+\phi)}\right]$$

$$e(t) = \frac{E_m}{2} e^{j\phi} e^{j(\omega t)} + \frac{E_m}{2} e^{-j\phi} e^{-j(\omega t)} = \left(\frac{E_m}{2} e^{j\phi}\right) e^{j(\omega t)} + \left(\frac{E_m}{2} e^{-j\phi}\right) e^{-j(\omega t)}$$

$$\boxed{e(t) = \mathbf{E_1} e^{j(\omega t)} + \mathbf{E_2} e^{-j(\omega t)}}$$

Genlikler:

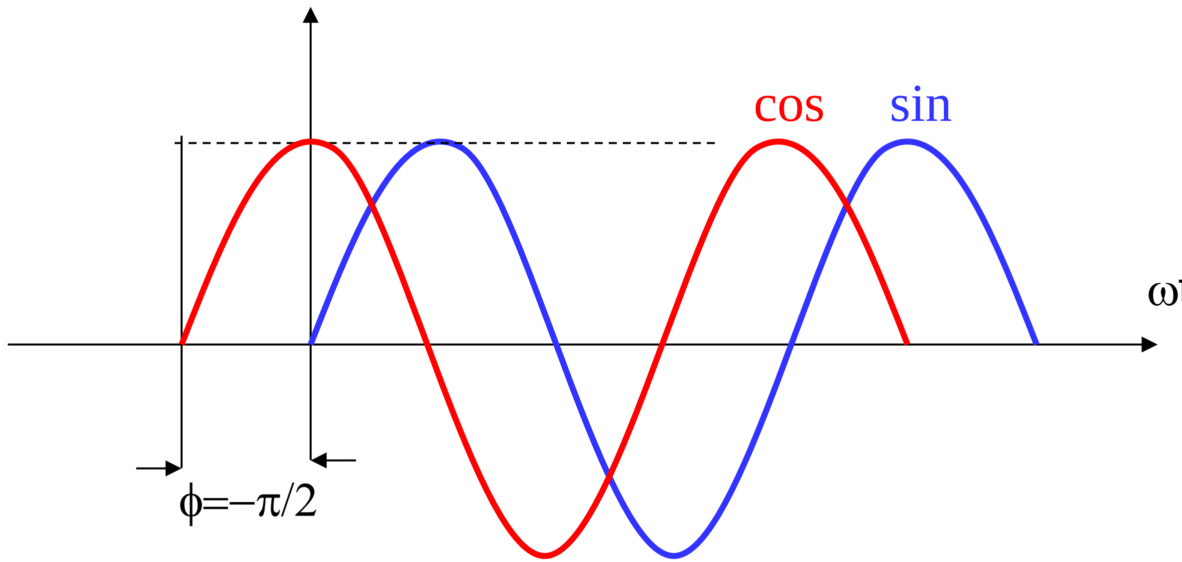
$$\mathbf{E_1} \equiv \frac{E_m}{2} e^{j\phi} \qquad \mathbf{E_2} \equiv \frac{E_m}{2} e^{-j\phi}$$

$\mathbf{E_1}$ ve $\mathbf{E_2}$ karmaşık sayılarla gösterilen genliklerdir.

Bir devrede gerilimleri, akımları veya akım-gerilim, gerilim-akım oranlarını karmaşık sayılarla ifade etmek hesaplamaları oldukça basitleştirir.

Diğer fonksiyonlar da üstel olarak gösterilebilir.

$$\sin(\omega t+\phi)=\cos(\omega t+\phi-\pi/2)$$



Not:
$\tan^{-1}(B/A)$, *rad* olarak ifade edilmelidir.

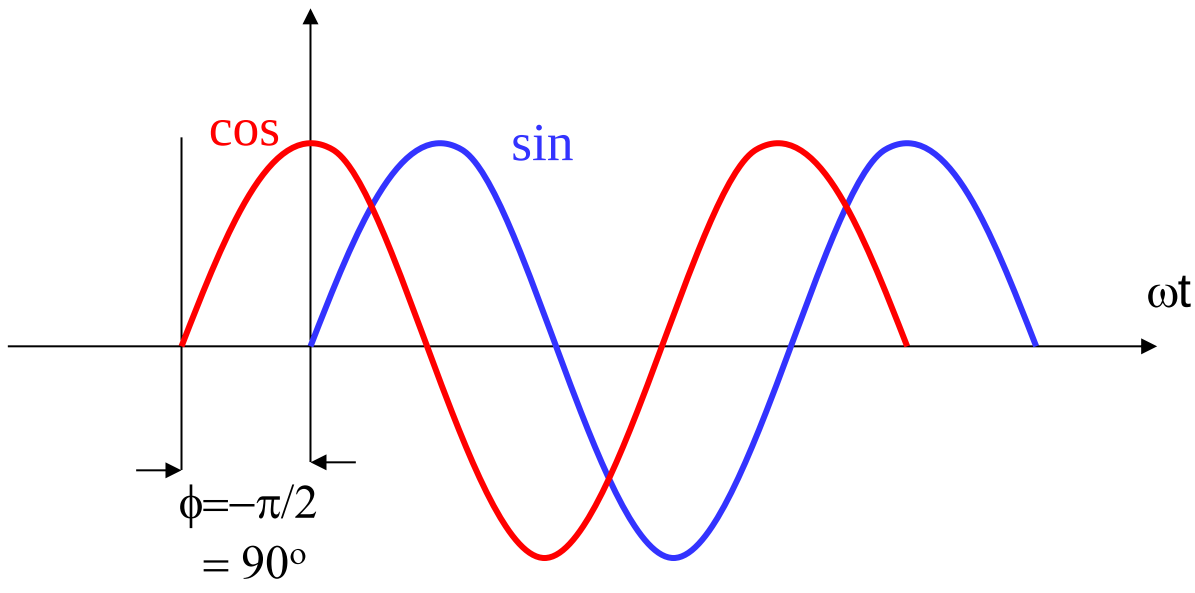
$$A\cos(\omega t)+B\sin(\omega t)=\sqrt{A^2+B^2}\cos(\omega t-\tan^{-1}(B/A))$$

$$\left[A\cos(\omega t)+B\sin(\omega t)\right]^2=A^2\cos^2(\omega t)+B^2\sin^2(\omega t)+2AB\cos(\omega t)\sin(\omega t)$$

$$\sin(x)\cos(y)=\frac{1}{2}\left[\sin(x+y)+\cos(x-y)\right]$$

$$\sin^2(x)=1-\cos^2(y)$$

$$\left[A\cos(\omega t)+B\sin(\omega t)\right]^2=(A^2-B^2)\cos^2(\omega t)+B^2+2AB\cos(\omega t)\sin(\omega t)$$ 0



Sinüs fonksiyonu, cosinüs fonksiyonunun 90^o (veya π/2 kadar) <u>gerisinde</u>dir.

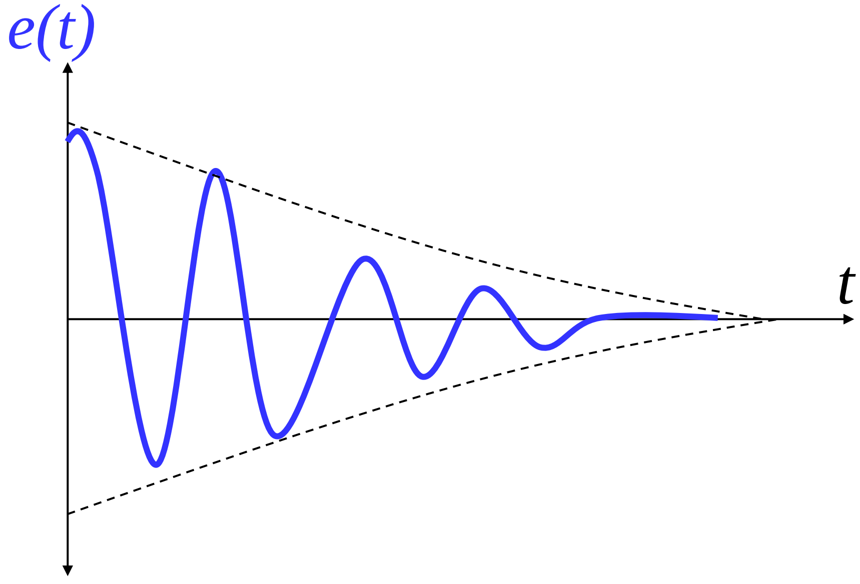
$$\sin(\omega t) = \cos(\omega t - \pi/2)$$

$$\frac{d\sin(t)}{dt} = \cos(t) \qquad \frac{d\cos(t)}{dt} = -\sin(t)$$

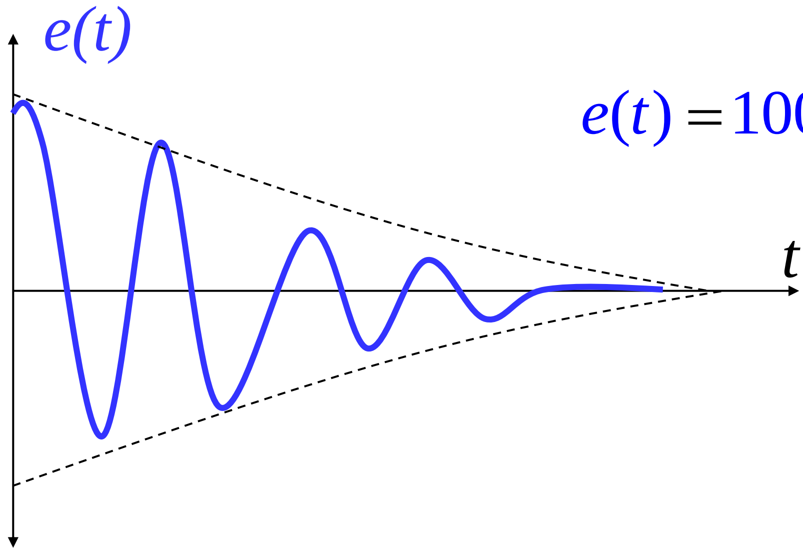
Cosinüs fonksiyonu, sinüs fonksiyonunun 90^o (veya π/2 kadar) <u>önünde</u>dir.

Örnek 4.1: Aşağıdaki dalga biçimini üstel uyarım olarak gösteriniz.

$$e(t) = 100e^{-2t}\sin(2t + \frac{\pi}{4})$$



Çözüm 4.1:



$$e(t) = 100e^{-2t}\sin(2t+\frac{\pi}{4})$$

Önce, sin (2t+π/4) niceliği cosinüs biçimine dönüştürülür.

$$\boxed{\sin(x) = \cos(x-\pi/2)}$$

$$\sin(2t+\frac{\pi}{4}) = \cos(2t+\frac{\pi}{4}-\frac{\pi}{2})$$

$$e(t) = 100e^{-2t}\cos(2t+\frac{\pi}{4}-\frac{\pi}{2}) = 100e^{-2t}\cos(2t-\frac{\pi}{4})$$

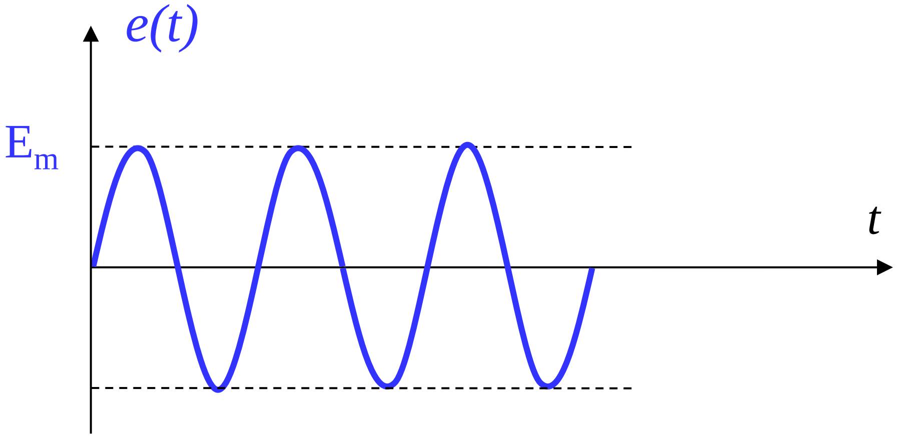
$$\boxed{\cos\theta = \frac{e^{j\theta}+e^{-j\theta}}{2}}$$

$$e(t) = 100e^{-2t}\left[\frac{e^{j(2t-\pi/4)}+e^{-j(2t-\pi/4)}}{2}\right]$$

$$e(t) = 50e^{-j\pi/4}e^{-t(2-j2)} + 50e^{j\pi/4}e^{-t(2+j2)}$$

s=-(2±j2)

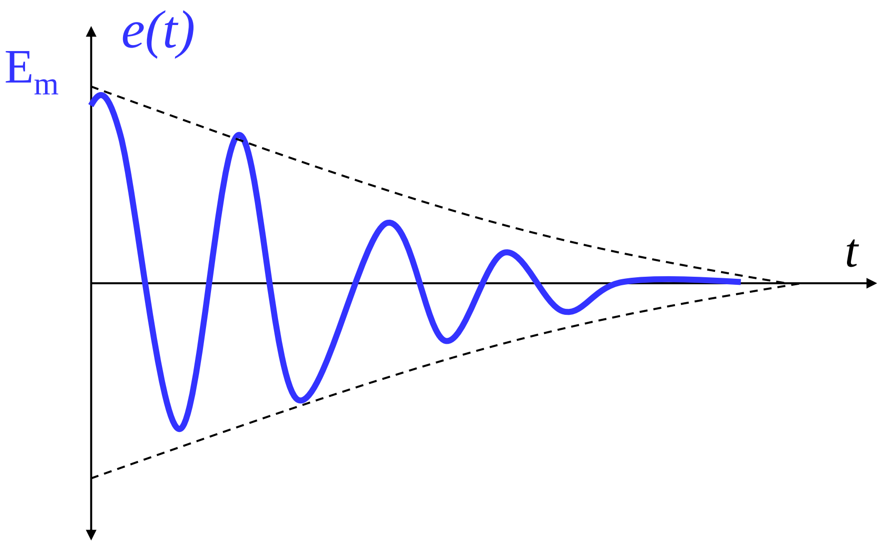
Periyodik bir Fonksiyonun Üstel Fonksiyonlarla İfadesi



$$e(t) = E_m e^{st}$$

s=0+jb (saf) karmaşık sayı:

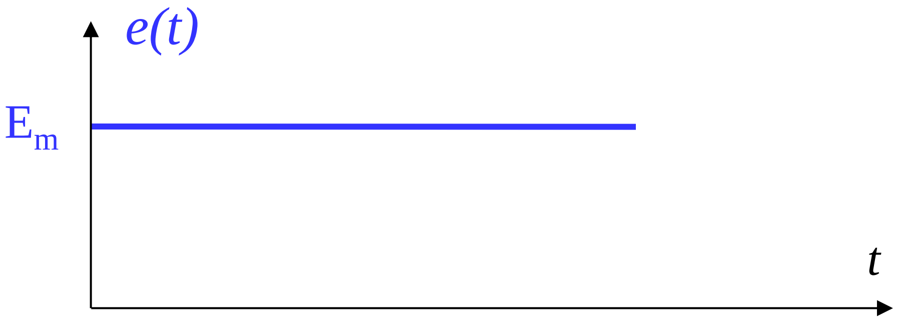
$$e(t) = E_m e^{-(0-jb)t} = E_m e^{jbt}$$



$$e(t) = E_m e^{st}$$

s=a+jb karmaşık sayı:

$$e(t) = E_m e^{-(a-jb)t} = (E_m e^{-at})\sin(bt)$$



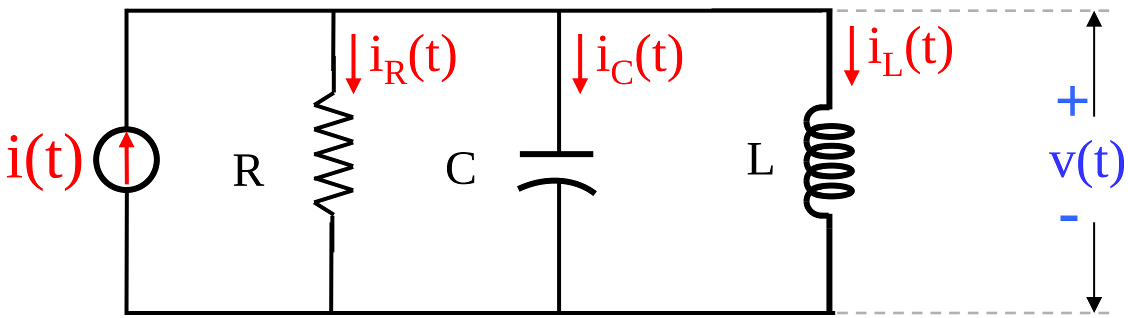
$$e(t) = E_m e^{st}$$

s=0

$$e(t) = E_m e^{-(0)t} = E_m$$

Tek Öğe Tepkileri

Uyarımın **e**st olduğu en genel duruma bakalım. Aşağıdaki devreye i(t)=Ie^{st} şeklinde bir **akım** uygulandığını düşünelim:



Devre elemanlarından her biri v(t)=Ve^{st} şeklinde bir **gerilim** görecektir (V gerilimin genliğidir).

Akımın ve gerilimin genlikleri:

$$i_R(t) = \frac{v(t)}{R} = \frac{V}{R}e^{st} = I_R e^{st}$$

$$i_C(t) = C\frac{dv(t)}{dt} = CsVe^{st} = I_C e^{st}$$

$$i_L(t) = \frac{1}{L}\int v(t)dt = \frac{1}{sL}Ve^{st} = I_L e^{st}$$

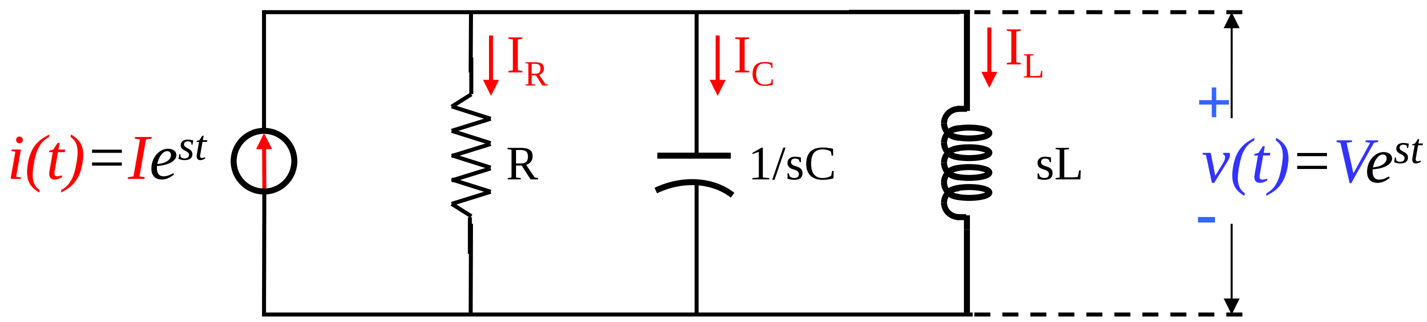
$$\Rightarrow$$

$$I_R = \frac{V}{R} \Rightarrow \frac{V}{I_R} = \boxed{R = R_R} = \frac{1}{G}$$

$$I_C = CsV \Rightarrow \frac{V}{I_C} = \boxed{\frac{1}{sC} \equiv R_C}$$

$$I_L = \frac{1}{sL}V \Rightarrow \frac{V}{I_L} = \boxed{sL \equiv R_L}$$

Tek Öğe Tepkileri-2



Bir devrede üstel (periyodik) bir uyarıcı varsa devre elemanlarının direnci sabit değildir! uyarıcının frekansının (s) bir fonksiyonudur.

$$i(t) = I_R e^{i\omega t}$$

$$v(t) = V e^{i\omega t}$$

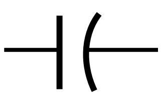
s=frekans (ω)

$$i(t) = Ie^{st} \qquad v(t) = Ve^{st}$$

R

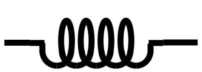
Direncin direnci!: $$\frac{V}{I_R} = R_R$$ Frekansdan etkilenmiyor!

C



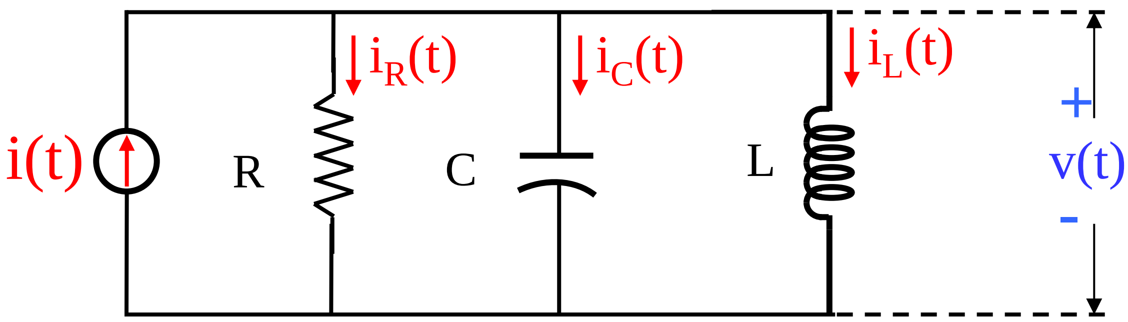
Sığanın direnci: $$\frac{V}{I_C} = \frac{1}{sC} \equiv R_C$$ Frekans ile azalıyor!

L



Bobinin direnci: $$\frac{V}{I_L} = sL \equiv R_L$$ Frekans ile artıyor!

Tek Öğe Tepkileri-3



Genel olarak devredeki elemanların dirençleri s'nin (frekans) fonksiyonu olduğu ve ayrıca üstel gerilim ve akımların genlikleri arasındaki bağıntılar oluşturdukları için bu Gerilim-Akım bağıntılarına *devre elemanlarının frekansa bağlı frekans bölgesindeki gösterimleri* denir.

$$I_R = \frac{V}{R} \Rightarrow \quad \frac{V}{I_R} = R = \frac{1}{G}$$

$$I_C = CsV \Rightarrow \frac{V}{I_C} = \frac{1}{sC} \equiv R_C$$

$$V_C = \left(\frac{1}{i\omega C}\right) I_C \equiv R_C I_C$$

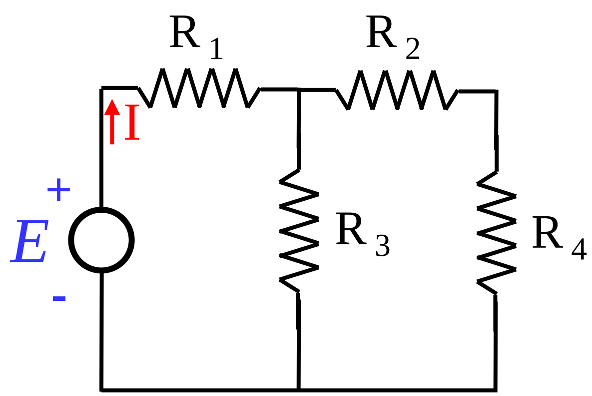
$$V_L = i\omega L I_L \equiv R_L I_L$$

$$I_L = \frac{1}{sL} V \Rightarrow \frac{V}{I_L} = sL \equiv R_L$$

R_L ve R_C karmaşık bir sayı; bir vektör

İmpedans, Edmitans

Doğru Akım ve Gerilim

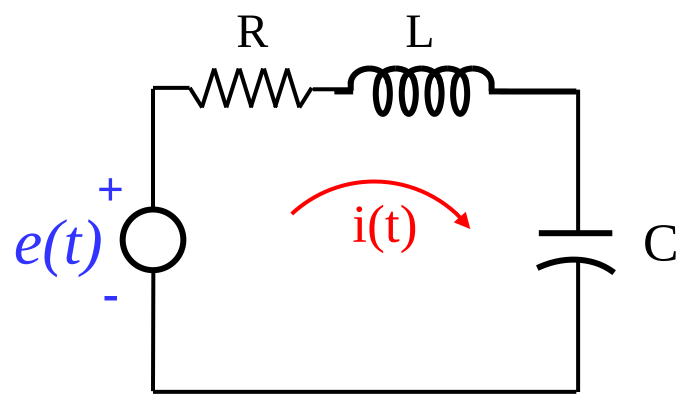


Eşdeğer Direnç $\frac{V}{I} = R_{eş}$

Eşdeğer iletkenlik $G_{eş} = \frac{1}{R_{eş}}$

$$R_{eş} = sabit$$

Periyodik değişen Akım ve Gerilim



İmpedans (Empedans) $\frac{V}{I} = Z(s)$

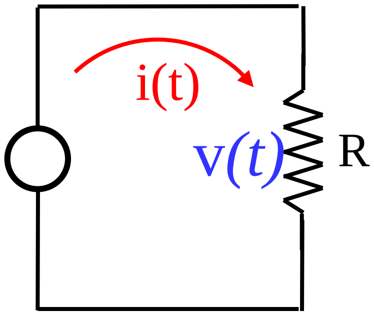
Edmitans (Admitans) $Y(s) = \frac{1}{Z(s)}$

$$Z(s) = frekansın(s)\,fonksiyonu\,!$$

Empedans

$i(t) = Ie^{st}$ $v(t) = Ve^{st}$

$e(t)=E_o e^{\omega t}$
$=E_o Sin(\omega t+\phi)$



$$R_R = \frac{V}{I_L} = R = sabit$$

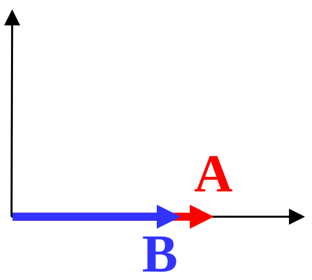
$$V = RI$$

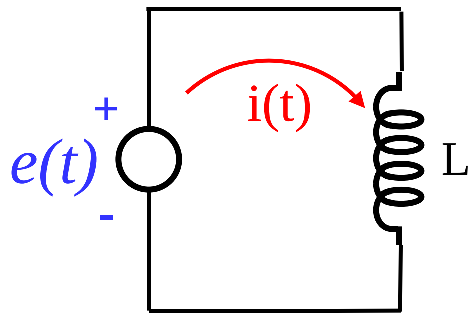
R=1Ω

ω=50Hz => R=1Ω

ω=1000Hz => R=1Ω

$$B = R_R A$$





$$R_L = \frac{V}{I_L} = sL = j\omega L \equiv Z_L(\omega)$$

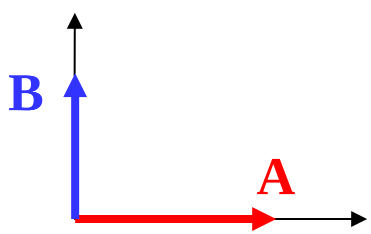
$$V = (j\omega L) I$$

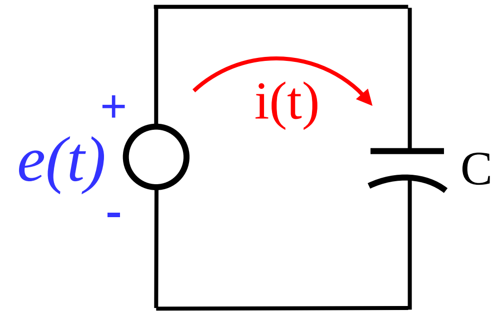
L=1H

ω=50Hz => Z=50Ω

ω=1000Hz => Z=1000Ω

$$B = j|Z_L| A$$





$$R_C = \frac{V}{I_C} = \frac{1}{sC} = \frac{1}{j\omega C} = -j\frac{1}{\omega C} \equiv Z_C(\omega)$$

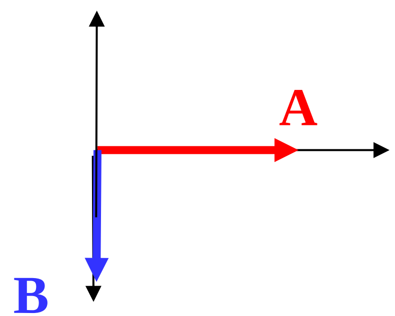
$$V = \left(-j\frac{1}{\omega C}\right) I$$

C=1F

ω=50Hz => Z=0,02Ω

ω=1000Hz => Z=0,001Ω

$$B = -j|Z_C| A$$



İmpedans, Edmitans

Akımın gerilime oranını tanımlamak için kullanılan çok genel bir terim Y(s) simgesi ile gösterilen *edmitans* dır.

Edmitansın frekans s'nin bir fonksiyonu olduğuna dikkat edilmelidir.

$$I_R = \frac{V}{R} \Rightarrow \frac{V}{I_R} = R = \frac{1}{G}$$

Pek çok uygulamalar için iki uç arasındaki gerilimin akıma oranı önemlidir. Bu orana *impedans* denir ve Z(s) simgesi ile gösterilir.

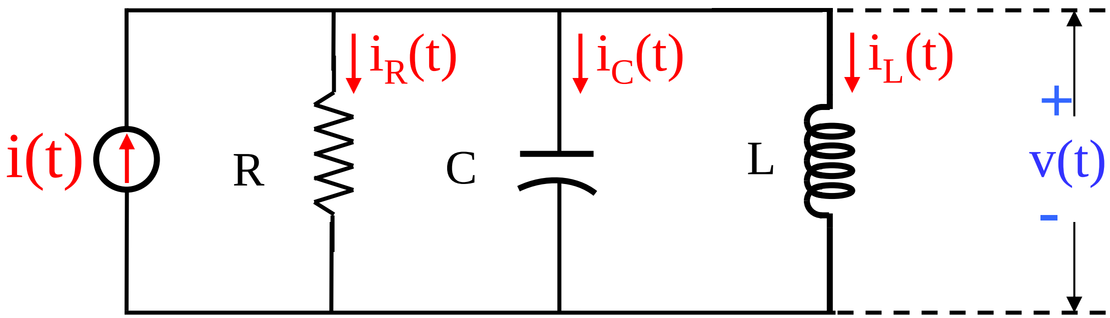
Bunu genelleştirebiliriz:

$$\frac{V}{I} \equiv Z(s)$$ İmpedans (Empedans)

İmpedansın birimi ohm dur ve edmitans ile impedans birbirinin tersidir.

$$Y(s) \equiv \frac{1}{Z(s)}$$ Edmitans (Admitans)

Aşağıdaki devrede kaynak akımı Kirchhoff Akım Yasası’nın (KAY) uygulanması ile belirlenebilir.



Kirchhoff Akım Yasası (KAY):

$$i(t) = i_R(t) + i_C(t) + i_L(t) = \frac{1}{R}v(t) + C\frac{dv(t)}{dt} + \frac{1}{L}\int v(t)dt$$

Devre elemanlarının frekansa bağlı değerleri yerine konursa:

$$i(t) = (\frac{1}{R} + sC + \frac{1}{sL})Ve^{st} = Ie^{st}$$

İmpedans

$$Z(s) = \frac{V}{I} = \frac{1}{1/R + sC + 1/sL}$$

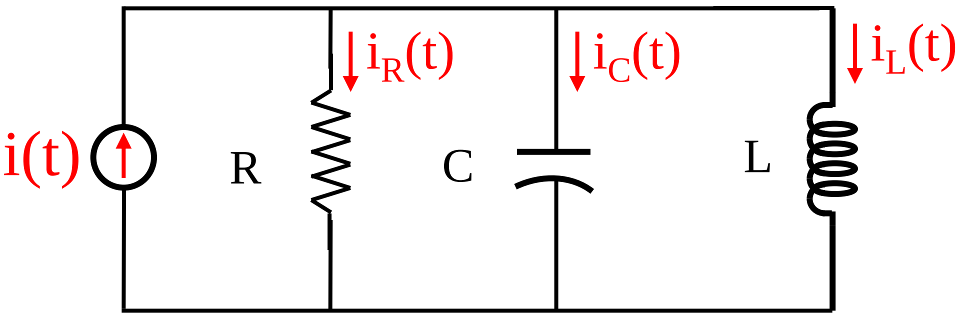
Edmitans

$$Y(s) = \frac{I}{V} = \frac{1}{R} + sC + \frac{1}{sL}$$

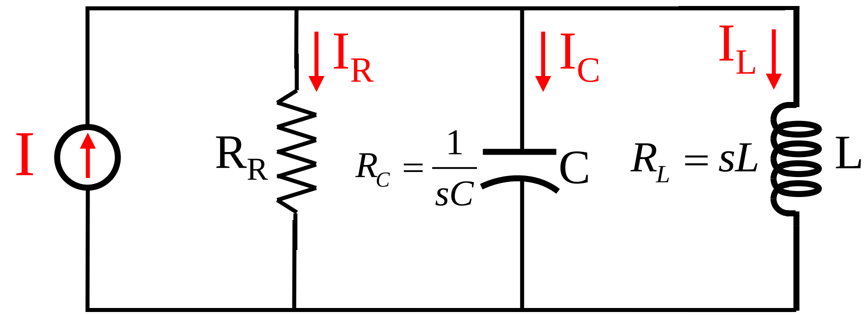
Zamanla periyodik olarak değişen uyarıcının olduğu bir devreyi frekans bölgesine dönüştürerek sanki sadece dirençlerden oluşan sabit uyarımlı bir devre gibi analiz edebiliriz.

Dönüşmüş Devre

Zaman bölgesinde



Frekans bölgesinde



$$i(t) = Ie^{\omega t}$$

$$v(t) = Ve^{\omega t}$$

$$i_R(t) = \frac{v(t)}{R}$$

$$i_C(t) = C\frac{dv(t)}{dt}$$

$$i_L(t) = \frac{1}{L}\int v(t)dt$$

$$i(t) = Ie^{(\omega=0)t} = I$$

$$v(t) = Ve^{(\omega=0)t} = V$$

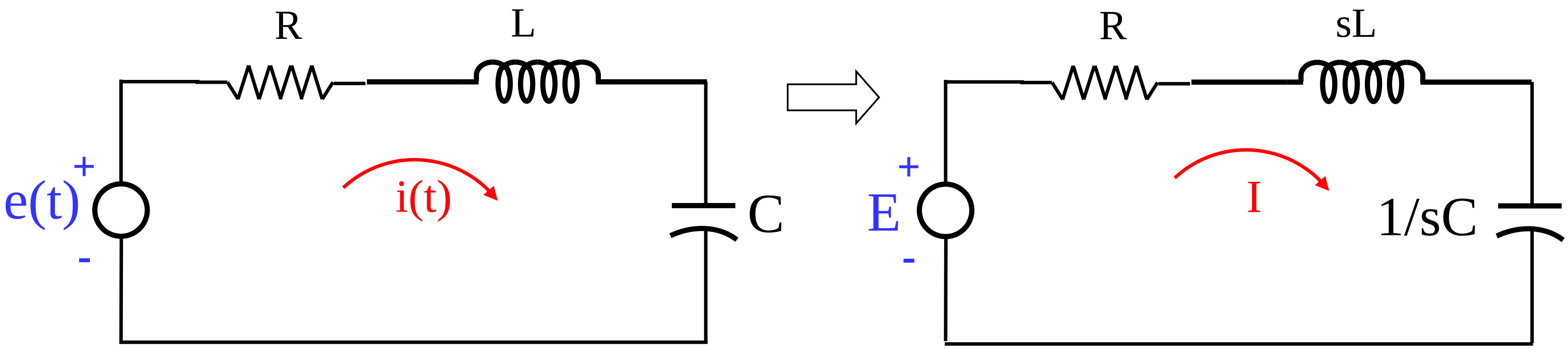
$$I_R = \frac{V}{R}$$

$$I_C = \frac{V}{R_C} = \frac{V}{1/sC}$$

$$I_L = \frac{V}{R_L} = \frac{V}{sL}$$

Üstel Uyarımla Zorlanmış Tepki

Bu kesimde en genel olarak **Ae**st biçimindeki bir üstel uyarımın oluşturduğu zorlanmış tepki bileşeni bulunacaktır.



Zaman bölgesinde　　　　Frekans bölgesinde

$$e(t) = Ri(t) + L\frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C}\int i(t)dt \quad \Rightarrow \quad E = RI + sLI + (1/sC)I$$

$$I = \frac{E}{R + sL + (1/sC)} = \frac{E}{Z(s)}$$

Payda, devrenin seri impedansına eşittir. Yukarıdaki frekansa bağlı tepkiye karşı gelen akımın zaman fonksiyonu:

$$i(t) = Ie^{st} = \frac{E}{R + sL + (1/sC)}e^{st}$$

Tepkiyi bulmak için gerekli basamaklar:

1- Uyarım $\mathbf{Ae}^{st}$ biçiminde tanımlanır.
2- Devre dönüşümü yapılır (zaman bölgesinden frekans bölgesine).
3- Uygun Kirchhoff yasası denklemleri (KAY veya KGY) yazılır ve frekans bölgesindeki tepki bulunur.
4- Frekans bölgesindeki tepki e^{st} ile çarpılarak zaman bölgesindeki tepkiye (zaman fonksiyonu ile çarpılarak) dönüştürülür.

Frekans Uzayına dönüşüm

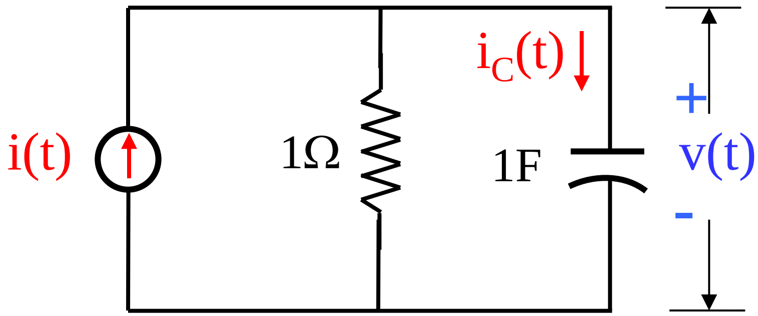
$$e(t) = Ri(t) + L\frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C}\int i(t)dt \quad \Rightarrow \quad E = RI + sLI + (1/sC)I$$

$$\Downarrow$$

$$i(t) = Ie^{st} = \frac{E}{R + sL + (1/sC)}e^{st} \quad \Leftarrow \quad I = \frac{E}{R + sL + (1/sC)} = \frac{E}{Z(s)}$$

Zaman Uzayına ters dönüşüm

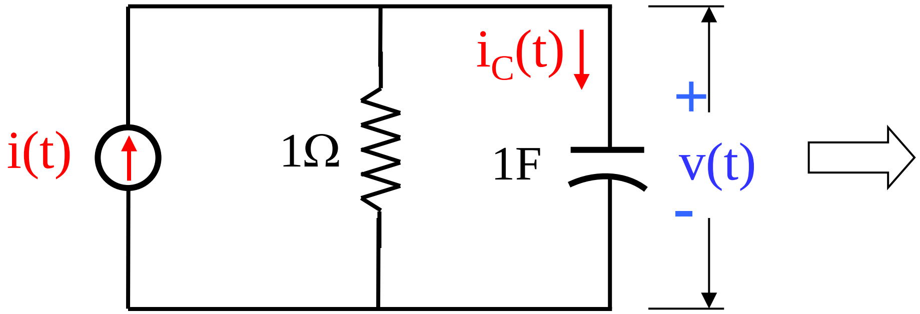
Örnek 4.2: Aşağıdaki devrede $i(t)$'nin **a)** $10e^{-2t}$ ve **b)** 10 A değerleri için sığaçtan geçen akımın zorlanmış bileşenini bulunuz.



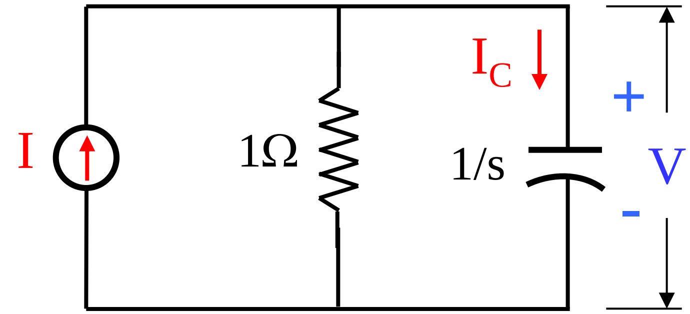
Çözüm 4.2:

(a) $i(t)=10e^{-2t}$

Zaman bölgesinde



Frekans bölgesinde



$$I = (1mho)V + sV \Rightarrow V = \frac{I}{1+s}$$

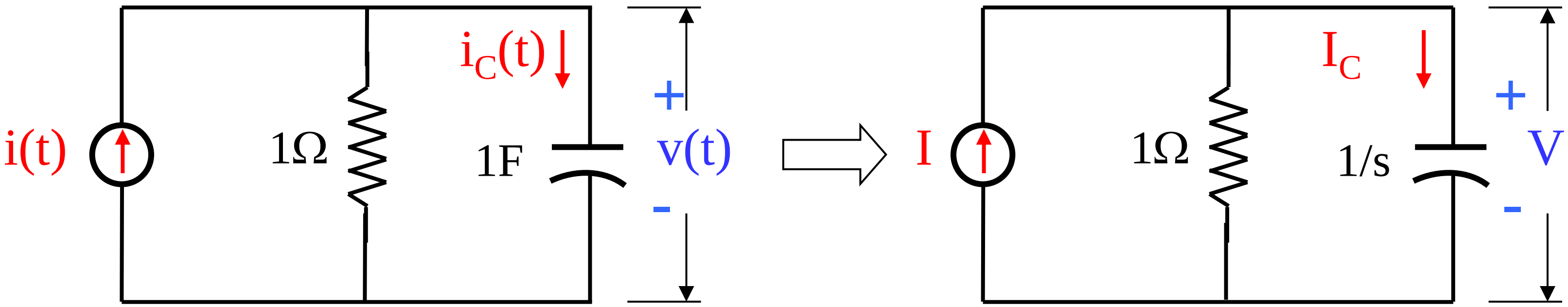
Sığaçtan geçen akım $\quad I_C = sV = \dfrac{s}{1+s} I$

$$\left.\begin{aligned} i(t) = 10e^{-2t} &= Ie^{st} \\ I = 10;\, s &= -2 \end{aligned}\right\} \Rightarrow I_C = \frac{s}{1+s} I = \frac{-2}{1-2}(10) = 20 \Rightarrow \boxed{i_C(t) = 20e^{-2t}}$$

(b) i(t)=10 A

Zaman bölgesinde

Frekans bölgesinde

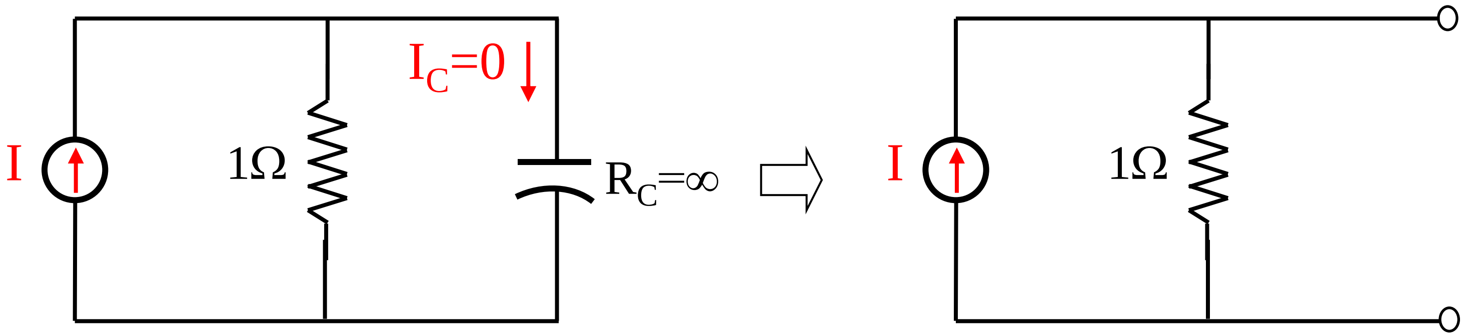


$$I = (1mho)V + sV \Rightarrow V = \frac{I}{1+s}$$

Sığaçtan geçen akım $\quad I_C = sV = \frac{s}{1+s} I$

$$\left.\begin{aligned} i(t) &= 10e^{st} = 10 \\ I &= 10;\ s = 0 \end{aligned}\right\} \Rightarrow \quad I_C = sV = \frac{s}{1+s} I = 0 \quad \Rightarrow \quad \boxed{i_C(t) = 0}$$

Sığaç, kararlı durumda açık devre gibi davranır (s=0 için impedansı sonsuza gider)

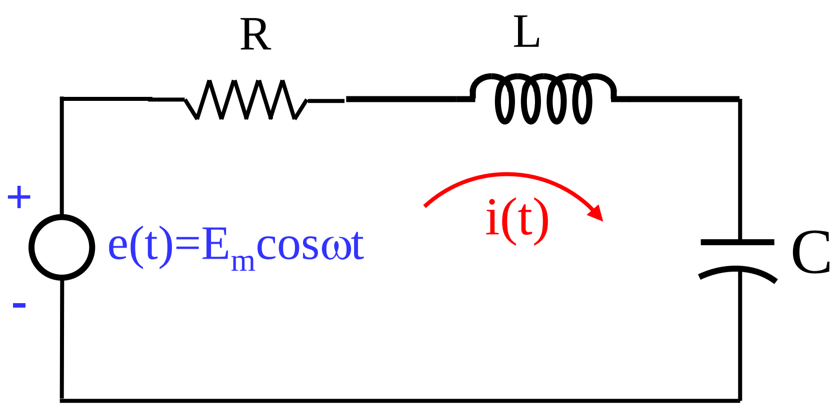


Sinüssel Uyarımla Zorlanmış Tepki

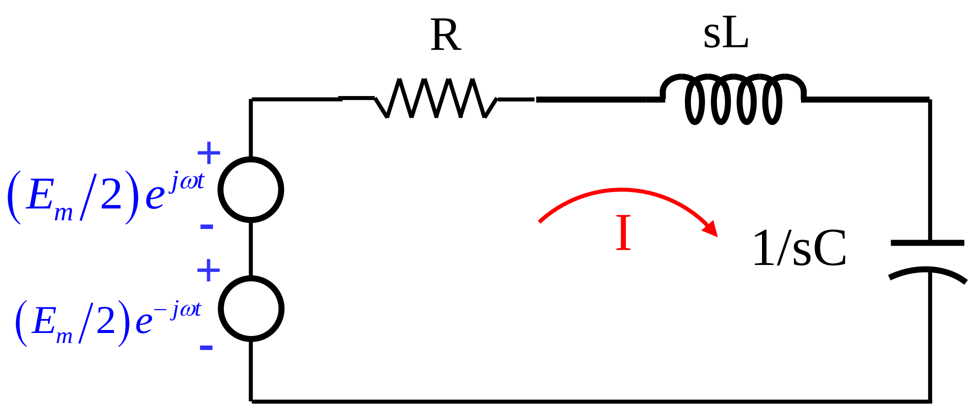
Bu kesimde sinüssel uyarımın (sinωt, cosωt) oluşturduğu zorlanmış tepki bileşeni bulunacaktır.

$e(t)=E_m\cos\omega t$ biçimindeki bir kaynak gerilimi ile uyarılan aşağıdaki devreyi düşünelim.

Kaynak gerilimi iki üstel fonksiyonun toplamı olarak tanımlanabilir



Zaman bölgesinde



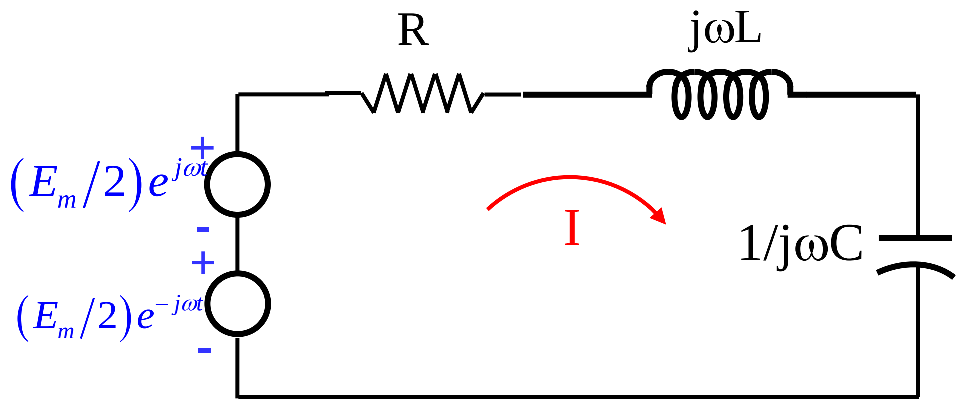
Frekans bölgesinde

$$e(t)=E_m\cos(\omega t+\phi) \quad \Rightarrow \quad e(t)=\frac{E_m}{2}\left[e^{j(\omega t+\phi)}+e^{-j(\omega t+\phi)}\right]$$

$$e(t)=E_1e^{j(\omega t)}+E_2e^{-j(\omega t)} \quad \Rightarrow \quad s_1=j\omega \qquad E_1\equiv\frac{E_m}{2}e^{j\phi}$$

$$s_2=-j\omega \qquad E_2\equiv\frac{E_m}{2}e^{-j\phi}$$

Sinüssel Uyarımla Zorlanmış Tepki



Frekans bölgesinde

$$E = (R)I + (sL)I + (1/sC)I \quad \Rightarrow \quad I = \frac{E}{R + j\omega L + 1/j\omega C}$$

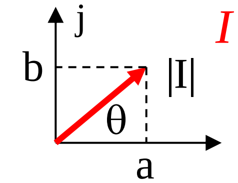
Zorlanmış tepki üst üste binme ilkesi ile hesaplanabilir:

$$s = j\omega \qquad\qquad s = -j\omega$$

$$I_1 = \frac{E_m/2}{R + j\omega L + 1/j\omega C} \qquad\qquad I_2 = \frac{E_m/2}{R - j\omega L + 1/(-j\omega C)}$$

Akım ifadeleri: $I_1 = \dfrac{E_m/2}{R + j\omega L + 1/j\omega C}$ $\qquad$ $I_2 = \dfrac{E_m/2}{R - j\omega L + 1/(-j\omega C)}$

Akımlar üstel gösterim ile gösterilebilirler: $\mathbf{I}_1 = |I_1| e^{j\theta_1}$ $\qquad$ $\mathbf{I}_2 = |I_2| e^{j\theta_2}$



$I = a + jb$

$$|I| = \sqrt{(a + jb).(a - jb)}$$

$$= \sqrt{a^2 + b^2}$$

$$\theta = -\tan^{-1}\left(\frac{b}{a}\right)$$

$$I_{1,2} = \frac{E_m/2}{R \pm j(\omega L + 1/\omega C)}$$

$$|I_{1,2}| = \left(\frac{1}{(a \pm jb)} . \frac{(a \mp jb)}{(a \mp jb)}\right)^{1/2} = \frac{1}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

Genlikler: $|I_1| = |I_2| = \dfrac{E_m/2}{\sqrt{R^2 + (\omega L + 1/\omega C)^2}} \equiv I$

Evre açısı: $\theta_1 = -\theta_2 = -\tan^{-1}\left(\dfrac{\omega L - 1/\omega C}{R}\right)$

Zaman bölgesinde akımlar: $i_1(t) = |I_1| e^{j\theta_1} e^{j\omega t}$ $\qquad$ $i_2(t) = |I_2| e^{-j\theta_1} e^{-j\omega t}$

Toplam tepki üst üste binme ilkesi ile hesaplanabilir: $i(t) = i_1(t) + i_2(t) = I\left[e^{j(\omega t + \theta_1)} + e^{-j(\omega t + \theta_1)}\right]$

Genliklerin ve faz açısının yerine konulması ile zaman bölgesinde aranan çözüm:

$$i(t) = \frac{E_m/2}{\sqrt{R^2 + (\omega L + 1/\omega C)^2}} \cos(\omega t + \theta_1) = I_m \cos(\omega t + \theta_1)$$

Toplam tepki, I_m genliği ve θ_1 **evre açısı** ile belirlenir.

İmpedans Z(jω) ve edmitans Y(jω) periyodik uyarım durumunda karmaşık sayılardır.

impedans

$$\mathbf{Z} = \underset{\substack{\uparrow \\ \textbf{\textit{direnç}}}}{R} + j\underset{\substack{\uparrow \\ \textbf{\textit{reaktans}}}}{X}$$

edmitans

$$\mathbf{Y} = \underset{\substack{\uparrow \\ \textbf{\textit{iletkenlik}}}}{G} + j\underset{\substack{\uparrow \\ \textbf{\textit{saseptans}}}}{B}$$

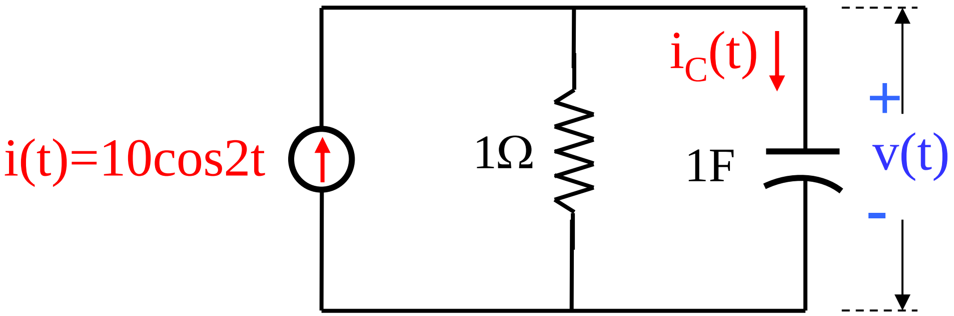
R ve G, **Z**(jω) ve **Y**(jω)'nin gerçek bileşenleridir ve sırası ile ***direnç*** ve ***iletkenlik*** olarak adlandırılır.

X ve B, **Z**(jω) ve **Y**(jω)'nin sanal bileşenleridir ve sırası ile ***reaktans*** ve ***saseptans*** olarak adlandırılır.

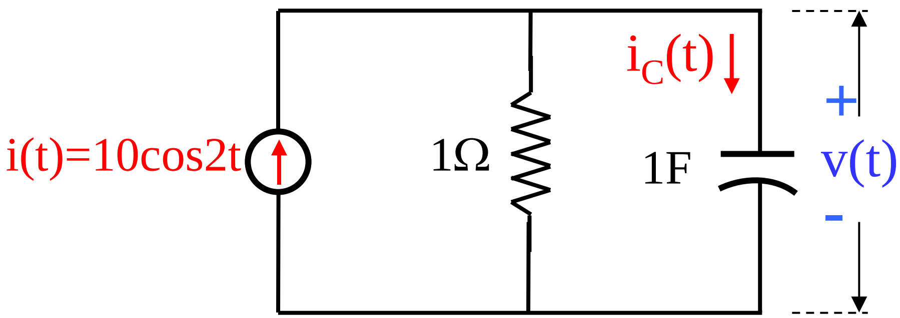
İndüksel ve sığasal reaktanslar: $X_L = \omega L \quad X_C = \dfrac{1}{\omega C}$

İndüksel ve sığasal saseptanslar: $B_L = -\dfrac{1}{\omega L} \quad B_C = \omega C$

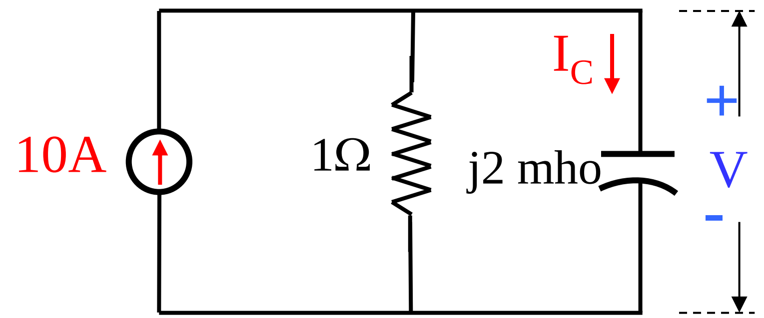
Örnek 4.3: Aşağıdaki devrede $i(t)=10\cos 2t$ için sığaçtaki zorlanmış akımı bulunuz.



Çözüm 4.3:



Zaman bölgesinde



Frekans bölgesinde

$$i(t) = Ie^{st} \qquad s = 2j \qquad I = 10$$

$$R_C = \frac{1}{sC} = \frac{1}{2j(1F)} = \frac{1}{2j}$$

$$G_C = 2j(1F) = 2j \ mho$$

$$I = \frac{V}{1\,\Omega} + \frac{V}{R_C} \Rightarrow V = \frac{1}{1+2j} I$$

$$I_C = 2jV \Rightarrow I_C = \frac{2j}{1+2j} I$$

Genlik $I = 10$

$$I_C = \frac{20j}{1+2j} = \frac{20j(1-2j)}{(1+2j)(1-2j)} = \frac{40+20j}{5} = 8+4j$$

$$I_C = 8+4j$$

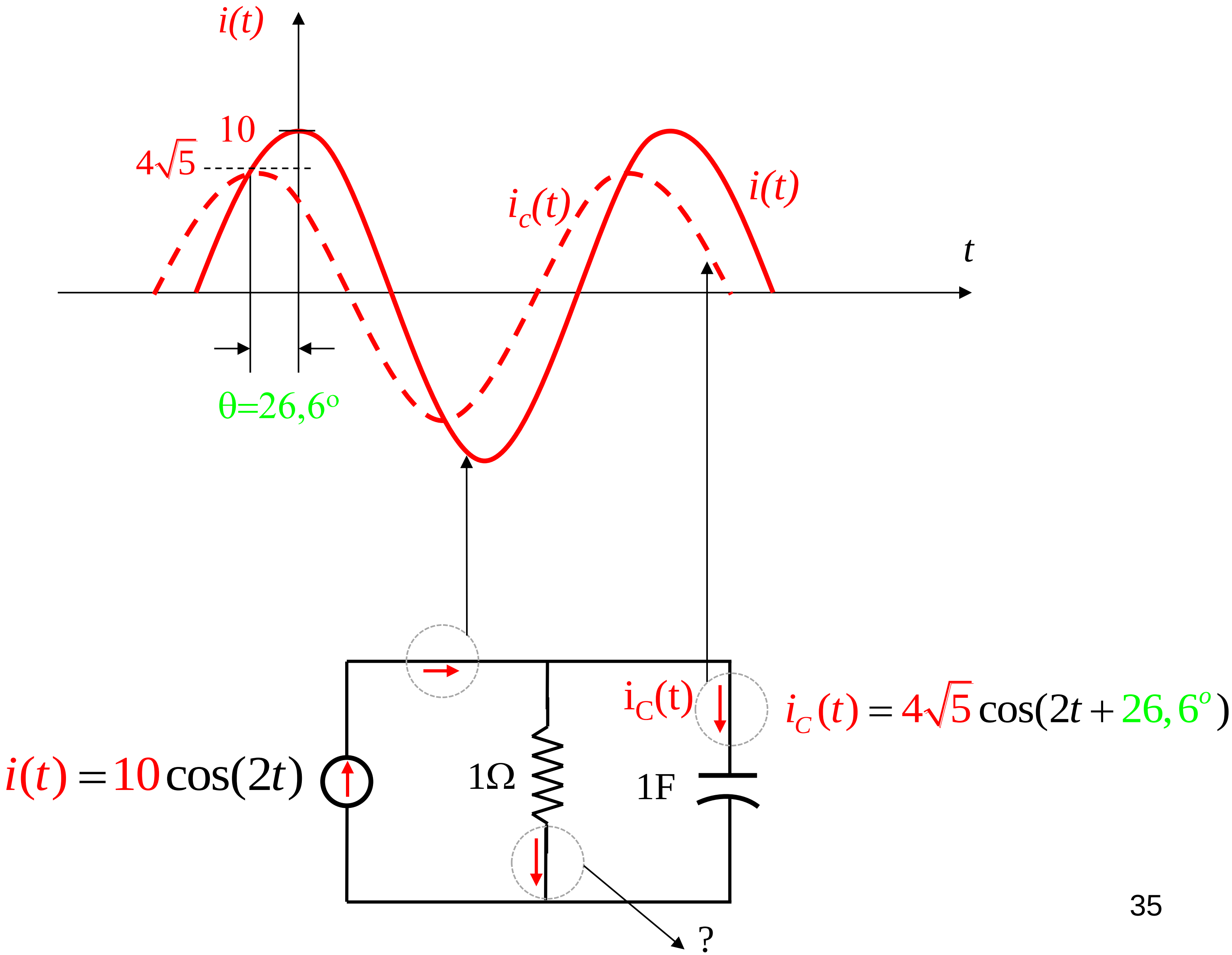
$$|I_C| = \sqrt{(8+4j)(8-4j)} = \sqrt{80} = 4\sqrt{5}$$

$$\tan^{-1}(4/8) = 26,6^o$$

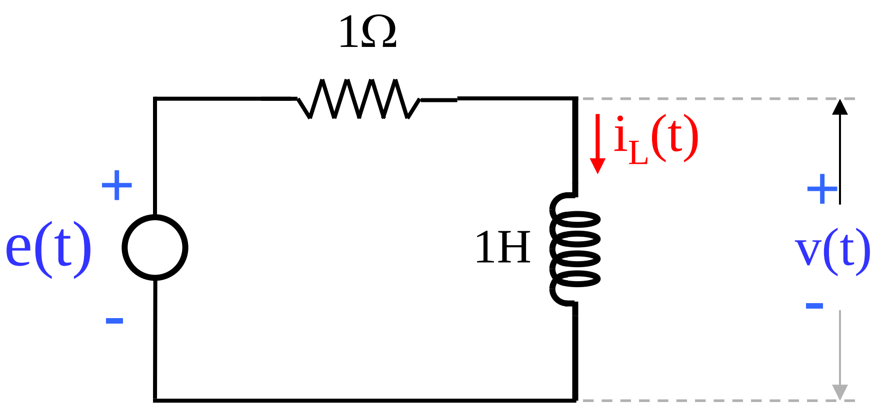
$$I_C = 4\sqrt{5} e^{j(26,6^o)}$$

$$i_C(t) = I_m \cos(2t + \theta^o) \Longrightarrow i_C(t) = 4\sqrt{5}\cos(2t + 26,6^o)$$

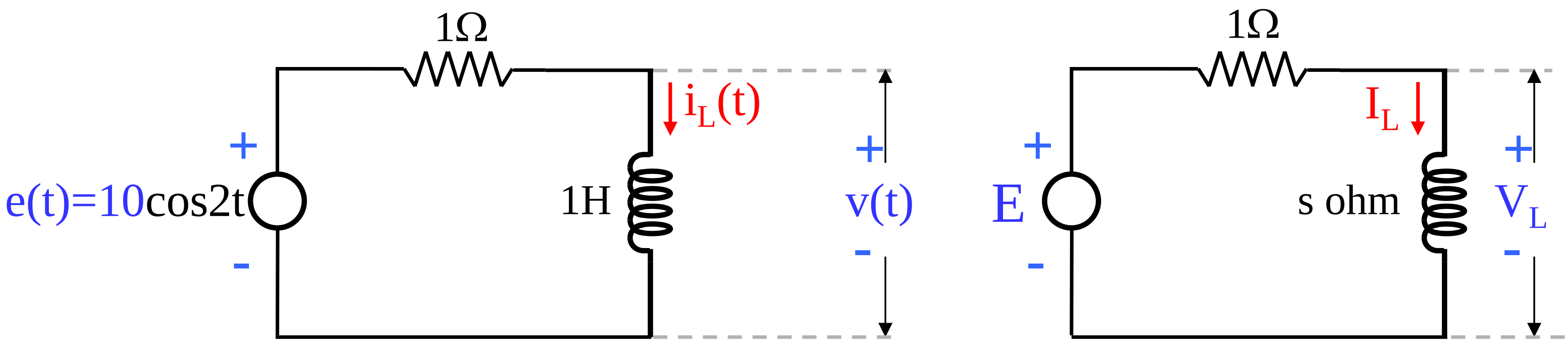
Sığa üzerinden geçen akım $i_C(t)$, devreyi uyaran akımdan $i(t)$, 26,6° geriden gelmektedir.



Örnek 4.4: Aşağıdaki devrede a) $e(t)=10\cos(2t)$ ve b) 10 V için indüktör üzerindeki gerilimi bulunuz.



Çözüm 4.4: (a)



$$s = 2j \qquad E = 10$$

$$E = 1\Omega I + sI = (1+s)I \Rightarrow I = \frac{E}{1+s}$$

$$V_L = \frac{s}{1+s}E$$

$$V_L = \frac{20j}{1+2j} = 4\sqrt{5}e^{j26,6^o}$$

$$v_L(t) = 4\sqrt{5}\cos(2t + 26,6^o)$$

(b) Sabit uyarım:

Sabit uyarım $10e^{0t}$ şeklinde gösterilir. s=0 konularak yukarıdaki iafdede V_L=0 elde edilir ve sonuç olarak $v_L(t)$=0 bulunur.

Kararalı durumda indüktans kısa devreymiş gibi davranır. s=0 için indüktansın empedansının sıfır olduğu görülür. Sıfır empedans, kısa devre anlamına gelmektedir.