



Doç. Dr. Şuayb Çağrı YENER

EEM 465 - Elektromanyetik Uyumluluk



7. EMU Açılarından Elektrik Devre Elemanları

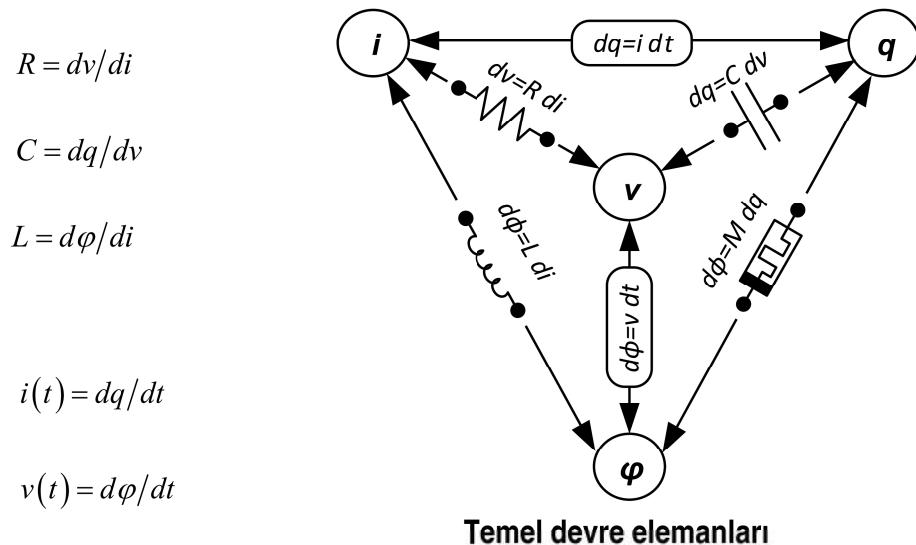
2

Elektronik Devre Komponentlerinin Doğrusal Olmayan Davranışı

- Bu bölümde elektronik devre elemanları, doğrusal olmayan davranışları ile yayının ve iletim yolu emisyonları bastırma özellikleri temelinde incelenecaktır.
- Elektronik devre eleman ve bileşenlerin doğrusal olmayan davranışları hakkında eşdeğer devreler ve matematiksel yaklaşımalar sunulacaktır.
- DeneySEL olarak elde edilen çalışma dinamikleri ile uyumlu olmak kaydıyla, modellerde bazı basitleştirmeler yapılacaktır.
- Bir bileşenin istenen karakteristiği/performansı ilgili frekans aralığında sağlayıp sağlayamayacağı konusunda gerçek durum yapılan ölçümlerle(örn., empedans analizörü) ile belirlenebilir.



Temel Elektrik Devre Elemanları



Temel Elektrik Devre Elemanları

- Direncin zaman domeni ve fazör gösterim tanım bağıntıları:
 $v(t) = R i(t)$ $\mathbf{V} = R \mathbf{I}$
- Kondansatörün zaman domeni ve fazör gösterim tanım bağıntıları:
 $i(t) = C \frac{dv(t)}{dt}$ $\mathbf{V} = \frac{1}{j\omega C} \mathbf{I}$
- İndüktörün zaman domeni ve fazör gösterim tanım bağıntıları:
 $v(t) = L \frac{di(t)}{dt}$ $\mathbf{V} = j\omega L \mathbf{I}$



Kablo ve İletkenler

- İletkenler (kablolar ya da PCB yolları) genelde önemli komponentler olarak dikkate alınmazlar. Bu iletkenlerin uzunları, odaklanılan frekansa karşılık gelen dalga boyuna göre çok küçük ise bu yaklaşım sorun oluşturmaz.
- Ancak iletkenler, dalga boyu ile mukayese edilebilir uzunluklarda iseler ($\ell > \lambda/10$) iletim hatları gibi davranışları ve böyle bir ihmali yapılması mümkün olmaz.
- Önemli bir nokta olarak, yasal ve teknik düzenlemelerin öngördüğü inceleme frekansları seviyelerinde özellikle de yayınım yoluyla emisyonlar açısından iletkenlerin dirençlerinden ziyade endüktanslarının değeri büyük önem taşır.



Bazı Malzemelerin İletkenlik Değerleri

Malzeme	İletkenlik σ [S/m]
Gümüş	$6.3 \cdot 10^7$
Bakır	$5.9 \cdot 10^7$
Endüstriyel bakır	$5.8 \cdot 10^7$
Altın	$4.5 \cdot 10^7$
Alüminyum	$3.8 \cdot 10^7$
Endüstriyel Alüminyum	$3.7 \cdot 10^7$
Kurşun	$4.8 \cdot 10^6$
Fosfor bronz	$4 \cdot 10^6$
Alüminyum nikel bronz	$2 \cdot 10^7$
Kalay	$9.2 \cdot 10^6$
Pirinç	$1.5 \cdot 10^7 - 3 \cdot 10^7$
Çelik	$10^6 - 10^7$

Bazı malzemelerin iletkenlik değerleri



Katsayıları

Malzeme	σ_r	μ_r
Gümüş	1.05	1
Bakır	1	1
Altın	0.7	1
Alüminyum	0.61	1
Pirinç	0.26	1
Bronz	0.18	1
Kalay	0.15	1
Kurşun	0.08	1
Nikel	0.2	600
Paslanmaz Çelik (430)	0.02	500
Çelik (SAE 1045)	0.1	1000
Mumetal (1 kHz)	0.03	30,000
Superpermalloy (1 kHz)	0.03	100,000

Çeşitli malzemelerin bağıl iletkenlik ve manyetik geçirgenlik katsayıları



Kablarda Yalıtkanlar

- Kablo şlebekenlerinin etrafı yalıtkan malzemelerle kaplanarak gerekli izolasyon sağlanır. Buradaki kalınlık kablo iletkeninin kalınlığı ve diğer tasarım kriterelerine göre belirlenir.
- Bu amaçlı malzemelerin bağıl dielektrik katsayıları (ϵ_r) katolaglardan elde edilebilir.
- Bu malzemeler ferromanyetik bir özellik gösteremeyecelerinden manyetik geçirgenlik katsayıları boşluğun değeri gibi $\mu_r=1$ 'dir. Dolayısıyla yalıtkan malzemeler, kablonun manyetik özelliği üzerinde etki oluşturmazlar.



İletkenin Direnci

- Yarıçapı a olan dairesel kesitli bir iletkenin düşük frekanslarda empedansı

$$R_{LF} \cong R_{DC} = \frac{\ell}{\pi a^2 \sigma} [\Omega]$$

- İletkenin birim uzunluk başına direnci:

$$r_{LF} \cong r_{DC} = \frac{1}{\pi a^2 \sigma} [\Omega/m]$$

$$Z_{cond,LF} = \frac{1}{\pi a^2 \sigma} + j\omega \frac{\mu l}{8\pi} = R_{DC} + j\omega L_{DC}$$

$$Z_{cond,LF} \cong r_{DC} = \frac{1}{\pi a^2 \sigma}$$

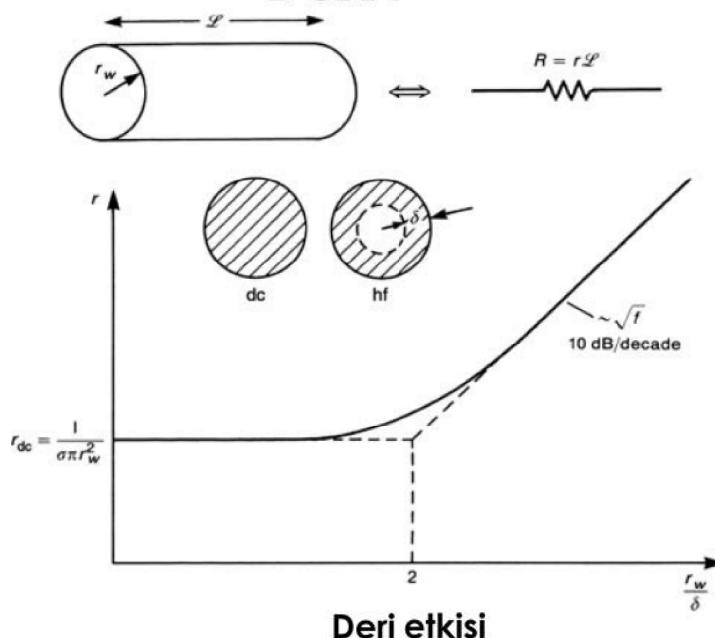


Deri Etkisi

- Elektromanyetik dalgaların mükemmel olmayan iletken içine girmeleri deri etkisi (skin effect), girdikleri seviye de deri kalınlığı olarak adlandırılır.
- Mükemmel olmayan bir iletkende DC akımlar için kesit boyunca homojen bir akım dağılımı görülür. AC akımlar için indüklenen gerilim elektrik yüklerinin iletkenin dışına doğru yönelmesine neden olur (deri etkisi).
- Dalgaının zayıflayarak $\%37$ ($1/e$) seviyesine düşüğü nokta deri kalınlığı olarak tanımlanır.



Deri Etkisi



Deri Kalınlığı

- Deri kalınlığı:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu\sigma}} [m]$$

- Boşluğa ilişkin manyetik geçirgenlik ve bilinenler yerine yazılırsa:

$$\delta = \frac{1}{\pi\mu_0} \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}} \cong 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}}$$



Deri Kalınlığı

f	δ
50 Hz	9.35 mm
60 Hz	8.53 mm
100 Hz	6.61 mm
1 kHz	2.09 mm
10 KHz	0.66 mm
100 KHz	0.21 mm
1 MHz	66.09 μm
10 MHz	20.90 μm
100 MHz	6.61 μm
1 GHz	2.09 μm
10 GHz	0.66 μm
100 GHz	0.21 μm

Bakır için çeşitli frekanslardaki deri kalınlığı değerleri



Çeşitli Malzemelerin Deri Kalınlığı

Değerleri

Frekans	Bakır (in)	Alüminyum (in)	Çelik (in)	Mumetal (in)
60 Hz	0.335	0.429	0.034	0.014
100 Hz	0.260	0.333	0.026	0.011
1 kHz	0.082	0.105	0.008	0.003
10 kHz	0.026	0.033	0.003	—
100 kHz	0.008	0.011	0.0008	—
1 MHz	0.003	0.003	0.0003	—
10 MHz	0.0008	0.001	0.0001	—
100 MHz	0.00026	0.0003	0.00008	—
1000 MHz	0.00008	0.0001	0.00004	—

Çeşitli malzemelerin deri kalınlığı değerleri



İletkenin Direnci

- Yarıçapı a ve deri kalınlığı δ olan dairesel kesitli bir iletkenin birim uzunluk başına direnci yüksek frekanslarda aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$r_{HF} = \frac{1}{\sigma(\pi a^2 - \pi(a-\delta)^2)} \quad r_{HF} = \frac{1}{\pi\sigma(2a\delta - \delta^2)} \quad \delta \ll a$$

$$r_{HF} \cong \frac{1}{\pi 2a\delta\sigma} \quad r_{HF} \cong \frac{a}{2\delta} r_{DC} \quad r_{HF} \cong \frac{1}{2a} \sqrt{\frac{\mu}{\pi\sigma}} \sqrt{f}$$

$$Z_{cond, HF} = \frac{1}{2\pi a} \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}} + j \frac{1}{2\pi a} \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}} = R_{cond} + jX_{cond}$$

$$Z_{cond, HF} \cong \frac{1}{2\pi\sigma a\delta} = \frac{a}{2\delta} R_{L_f} = \frac{1}{2\pi a} \sqrt{\frac{\omega\mu}{2\sigma}}$$



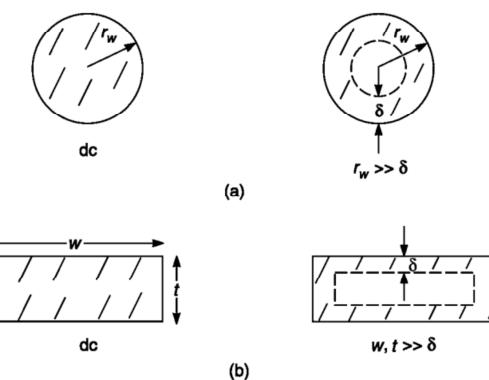
• Doç. Dr. Ş. Çağrı YENER

EEM465 – Elektromanyetik Uyumluluk

•

İletkenin Direnci

- Bu ifadeden, direnç frekansın karekökü ile arttığı sonucu elde edilir.
- Dairesel olmayan kesitli iletkenler için aynı prensipler geçerlidir ve denklem uygun modifikasyonlarla kullanılabilir.
- Akımin dağıtımını etkileyen diğer bir faktör de diğer iletkenlerin veya bileşenlerin yakınlığıdır.
- Proximity effect gibi nedenlerle iletken kesitindeki akımın dağılımindaki herhangi bir değişiklik kaçınılmaz olarak iletkenle ilişkili direnç ve endüktansı değiştirecektir.



Deri etkisi ve yüksek frekanslarda akım akışı



• Doç. Dr. Ş. Çağrı YENER

EEM465 – Elektromanyetik Uyumluluk

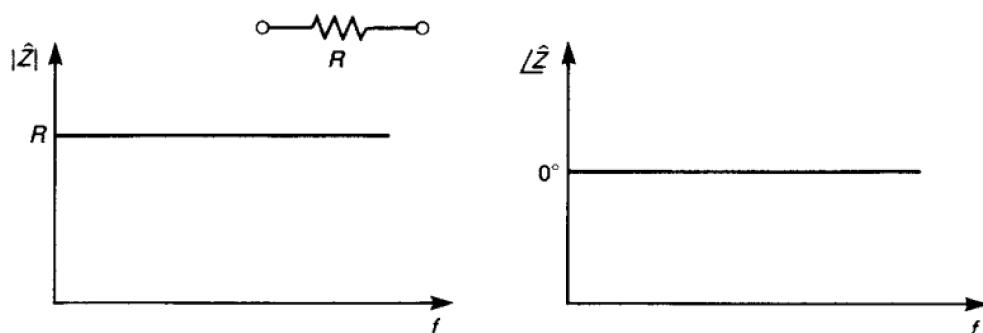
•

Dahili ve Harici Endüktans

- Harici endüktans kaynaklı empedans frekansla artar. Dahili endüktansın empedansı frekansın kareköküyle değişir.
- Bu nedenle harici endüktans kaynaklı empedans bileşeni artan frekansla birlikte daha baskın olur. Bunun yanında harici endüktans doğal olarak birçok tel/kablo bağlantı yapısında dahili endüktanstan büyüktür.
- Örnek olarak 50 mils ($1/1000\text{inc}$) aralıklı iki 20-gauge solid bakır tel arasındaki dahili endüktans $I_{i,DC}=0.05\mu\text{H}/\text{m}$ iken dahili endüktans $I_e=0.456\mu\text{H}/\text{m}$ olur. Arada görüldüğü gibi yaklaşık 10 kat fark söz konusudur. Artan frekansla dahili endüktans frekansla karesel azaldığından, yüksek frekanslarda bu oran daha büyük olur.
- Sonuç olarak, genellikle dahili endüktans kaynaklı empedans harici endüktans empedansından çok daha küçük olup ihmal edilebilir.



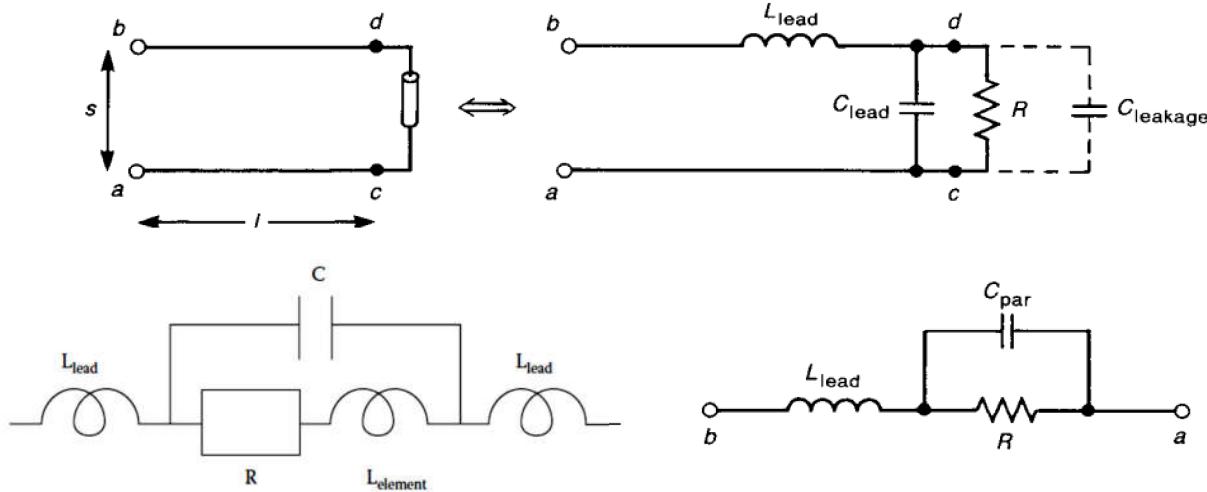
İdeal Direnç



İdeal bir direncin frekansa bağlı olarak empedans değişimi



İdeal Olmayan Direnç



Gerçek bir direncin eşdeğer modeli



• Doç. Dr. Ş. Çağrı YENER

EEM465 – Elektromanyetik Uyumluluk

İdeal Olmayan Direnç

- İdeal olmayan direncin basitleştirilmiş empendası:

$$Z_R = \frac{j\omega L + R(1 - \omega^2 LC)}{1 + j\omega RC}$$

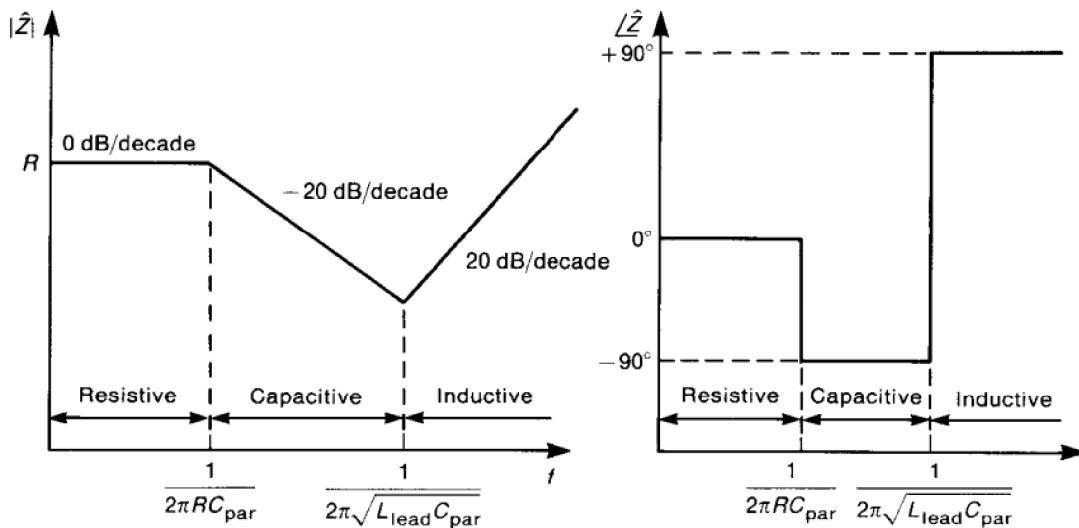
- Basitlik açısından L_{lead} olarak gösterilen iki ayrı induktörün toplamı L_{lead} olarak yeniden ifade edilmiştir. $L_{element}=0$.



• Doç. Dr. Ş. Çağrı YENER

EEM465 – Elektromanyetik Uyumluluk

İdeal Olmayan Direnç



Gerçek bir direncin frekansa bağlı olarak empedans değişimi



İdeal Olmayan Direnç

- $f=0$ için, $Z_R=R$.
- Frekans artırılırsa C tarafından belirlenen pay azalmaya başlar. Bu durumda eşitlik:

$$Z_R = \frac{1}{j\omega RC}$$

- Frekans bu değerin üstünde artırılmaya devam ederse C yolundan akım akmeye başlar ancak L hala çok küçük ve kısa devre gibi davranmaya devam eder.



İdeal Olmayan Direnç

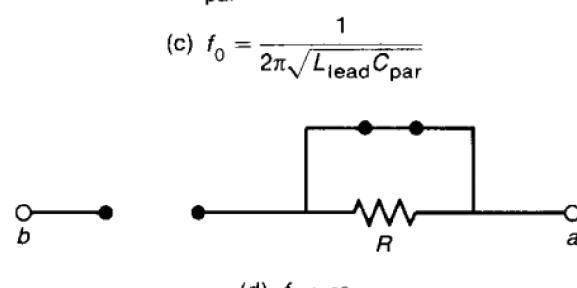
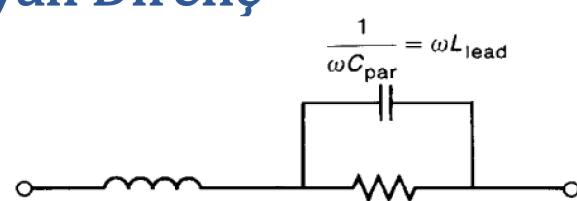
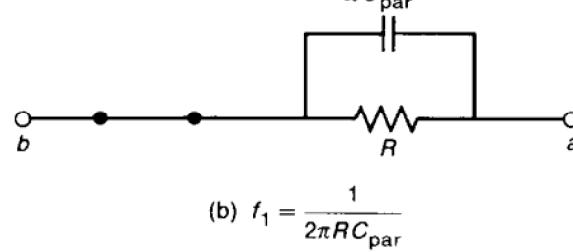
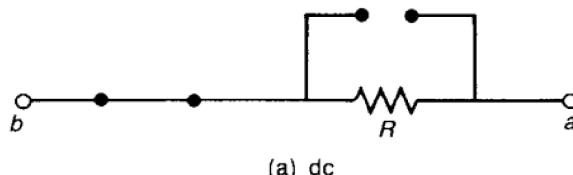
- Frekans arttırılmaya devam ederse eşdeğer empedans küçülmeye devam eder. Bu azalış rezonans frekansına kadar sürer ve bu noktada empedans minimum olur.

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

- Frekans daha da artırılır ve sonsuza doğru yaklaşırsa indüktör empedansı çok büyük ve buna karşılık kapasite empedansı sıfıra yaklaşır. Bu durumda direnç kapasite tarafından kısa devre edilirken, indüktör açık devre benzeri davranış gösterir. Dolayısıyla eşdeğer empedans da sonsuza gider.



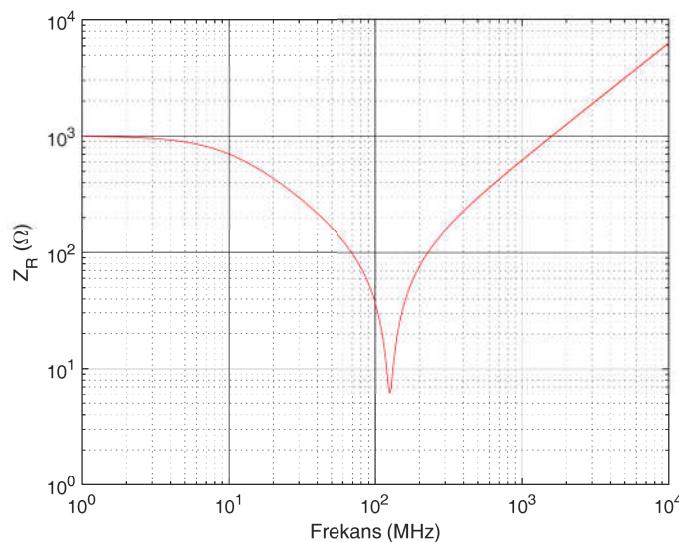
İdeal Olmayan Direnç



Gerçek bir direncin basitleştirilmiş modeli için bazı spesifik frekanslara karşılık durum



İdeal Olmayan Direnç



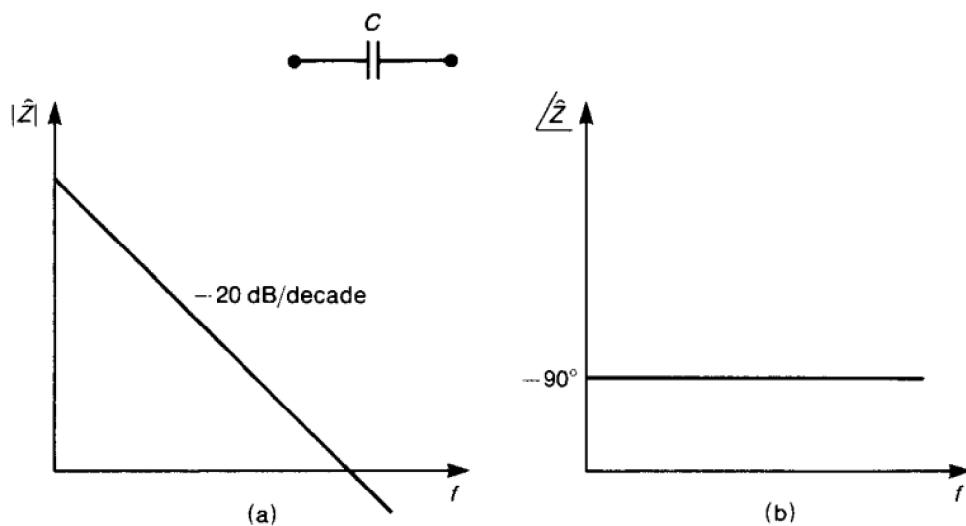
Direncin empedansının frekansla değişimi $R=1\text{k}\Omega$, $L=100\text{nH}$, $C=16\text{pF}$.



• Doç. Dr. Ş. Çağrı YENER

EEM465 – Elektromanyetik Uyumluluk

İdeal Kondansatör



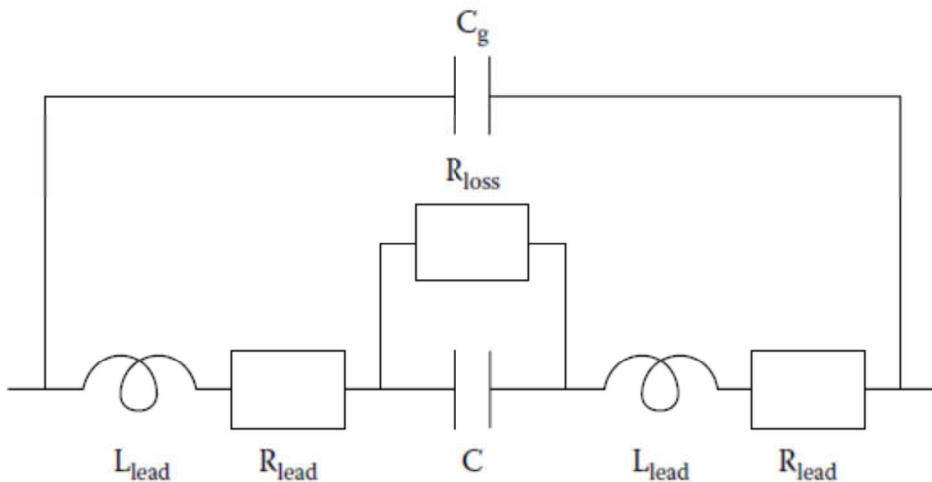
İdeal kondansatörün eşdeğer modeli



• Doç. Dr. Ş. Çağrı YENER

EEM465 – Elektromanyetik Uyumluluk

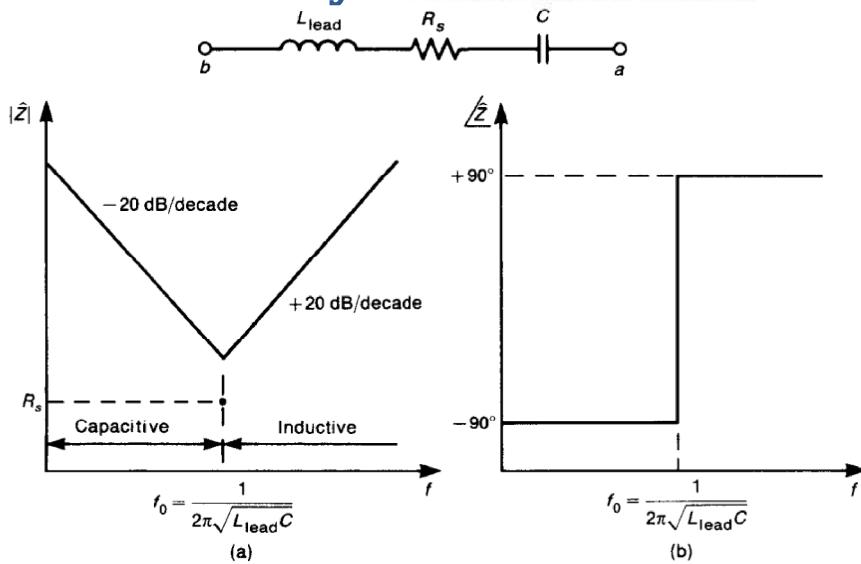
İdeal Olmayan Kondansatör



İdeal olmayan kondansatörün eşdeğer modeli



İdeal Olmayan Kondansatör



Gerçek bir kondansatörün frekansa bağlı olarak empedans değişimi



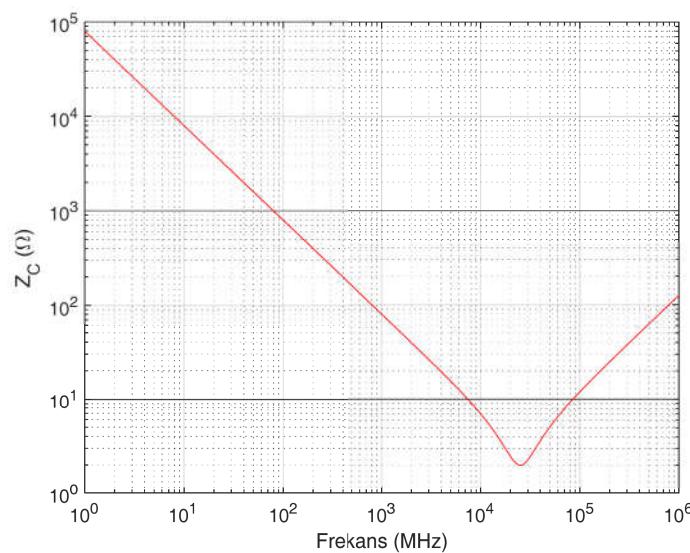
İdeal Olmayan Kondansatör

- İdeal olmayan kondansatör için basitleştirilmiş eşdeğer empedans:

$$Z_C = j\omega L + R + \frac{1}{j\omega C} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$



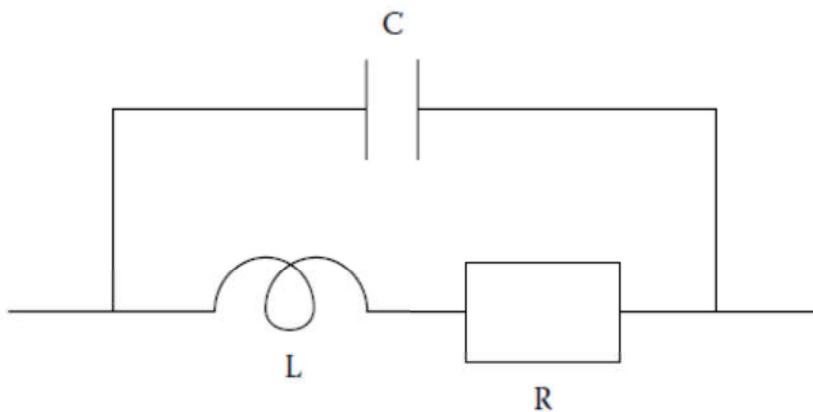
İdeal Olmayan Kondansatör



Direncin empedansının frekansla değişimi C=2nF, R=2Ω, L=20nH.



İdeal Olmayan İndüktör



İdeal olmayan indüktörün eşdeğer modeli



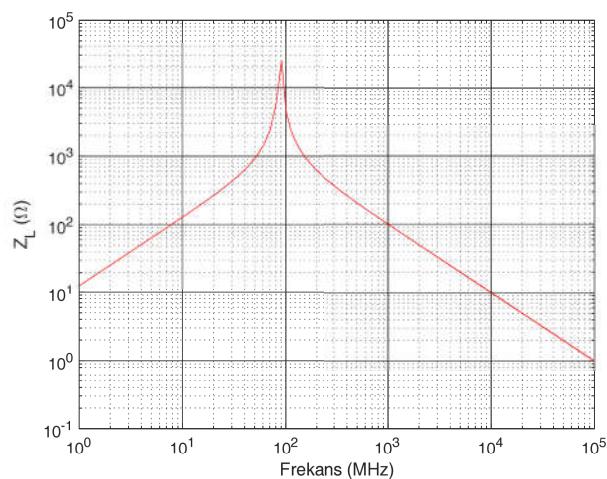
İdeal Olmayan İndüktör

- İdeal olmayan indüktör için basitleştirilmiş eşdeğer empedans:

$$Z_L = \frac{R + j\omega L}{1 - \omega^2 LC + j\omega RC}$$



İdeal Olmayan İndüktör



Direncin empedansının frekansla değişimi $C=1.6\text{pF}$, $R=2\Omega$, $L=2\mu\text{H}$.

