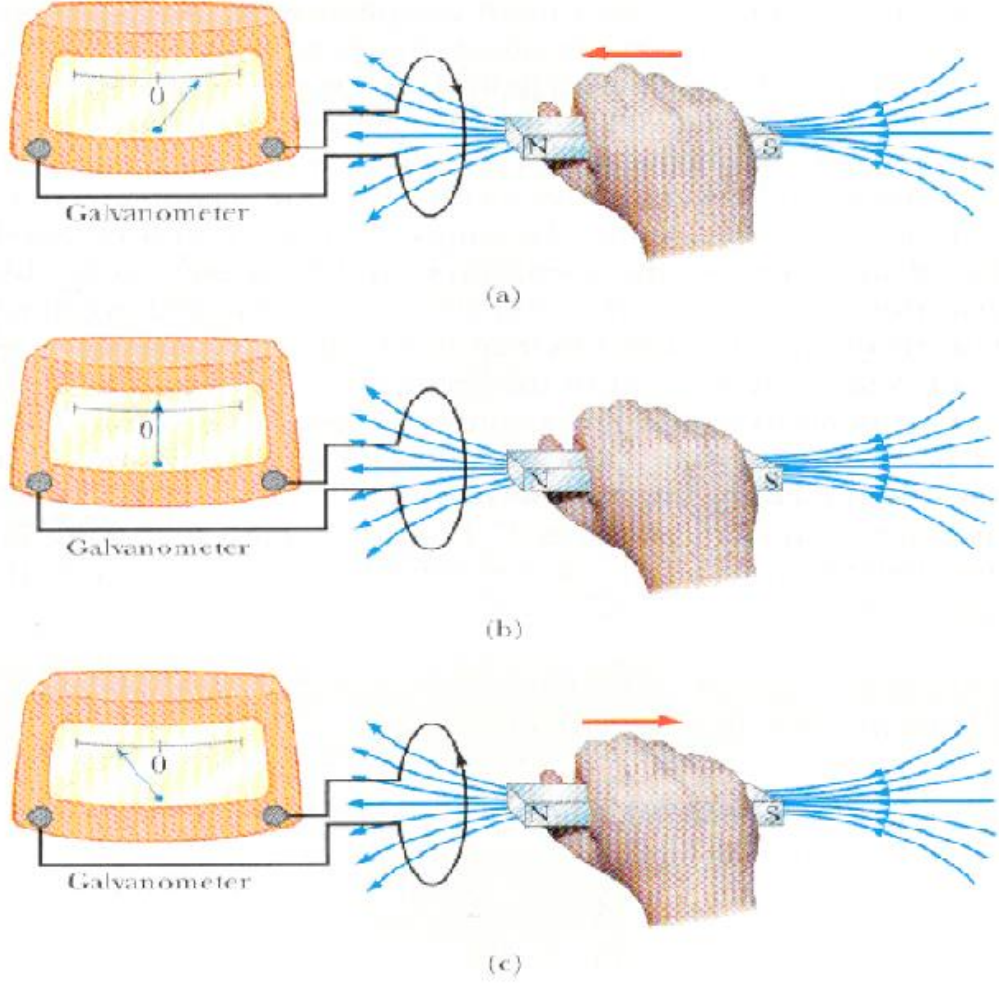


BÖLÜM 9

FARADAY YASASI

9.1. FARADAY'IN İNDÜKSİYON YASASI

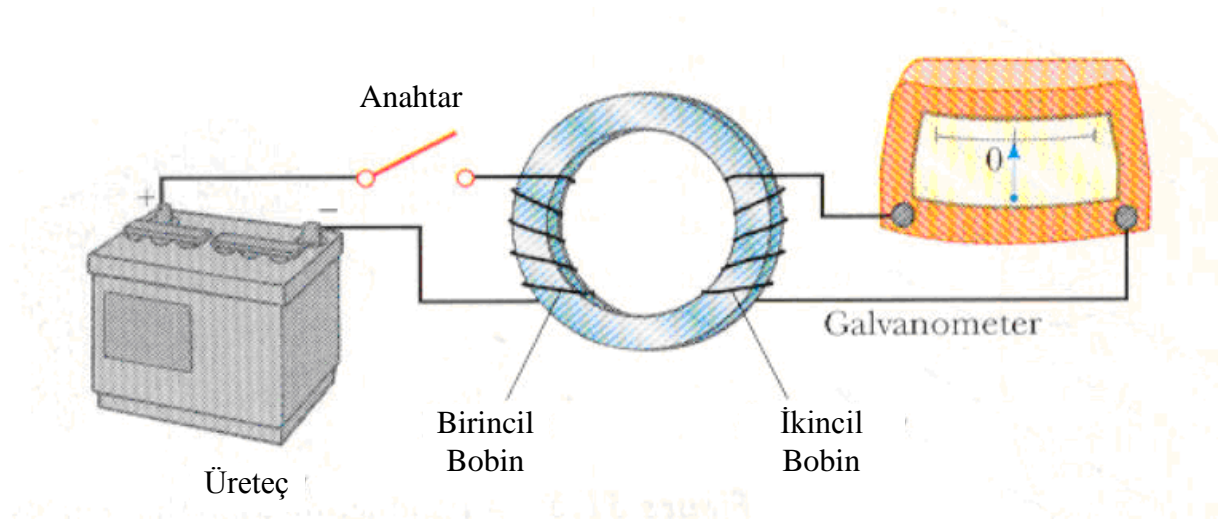


Şekil 1.

Bir mıknatıs halkaya doğru yaklaştırıldığında zaman, galvanometrenin ibresi Şekil a'da gösterildiği gibi belli bir miktar sağa doğru sapar. Mıknatıs halkadan uzaklaştırılırsa ibre ters yönde sapar. Şekil b'de olduğu gibi hareketsiz olduğu zaman hiçbir sapma göstermez.

Tersine durgun halde tutulan mıknatısa yaklaşan veya uzaklaşan yönde halka hareket ettirilirse ibre yine sapar.

O halde devrede hiçbir batarya olmasa bile devrede bir akım başlar. Böyle bir akıma, indüklenmiş *emk* tarafından meydana getirildiği için indüklenmiş akım denir.



Şekil 2. Faraday'ın Deneyi

Şekildeki devrede anahtar kapatıldığında bobinde oluşan akım değişken bir manyetik alan oluşturur. Bu manyetik alanda ikinci devreye nüfuz ederek burada bir manyetik alan oluşturur. Bu da ikinci devrede bir akıma sebep olur. Bu akıma sebep olan aslında birinci devredeki değişken manyetik alandır. Bu gözlemlerden şu sonuca varılır.

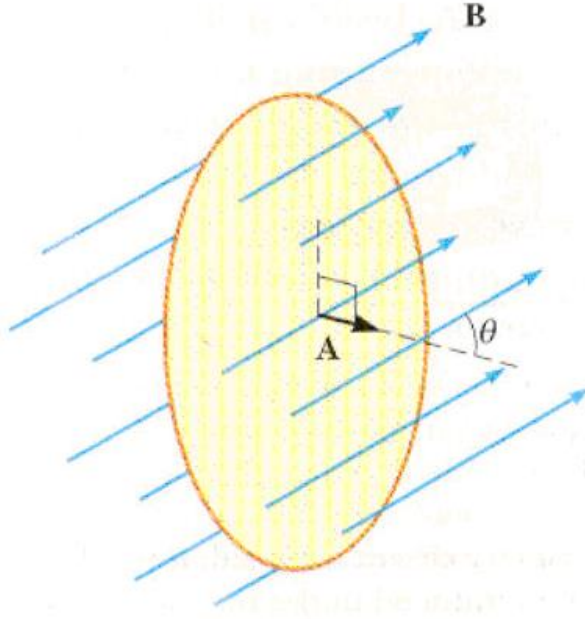
Manyetik alanı değiştirerek, ya da devreden geçen manyetik akı zamanla değiştiğinde, ikincil devrede indüklenmiş bir emk üretilir.

$$\varepsilon = - \frac{d\phi_B}{dt} \quad \text{Faraday İndüksiyon Yasası}$$

Burada $\phi_B = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$ devreden geçen manyetik akıdır. Eğer devreden N tane sarım var ise oluşan emk

$$\varepsilon = - N \frac{d\phi_B}{dt}$$

ile verilir. Buradaki (-)'nin anlamı emk'nın yönü, akım ilmeğinin çevrelediği alandan geçen manyetik akı değişimine karşı koyacak şekilde manyetik akıyı oluşturan akımın yönündedir.



Şekil 3. Düzgün bir manyetik alanın var olduğu bir ortamda A alanına sahip iletken bir ilmek.

Şekildeki gibi düzgün bir **B** manyetik alanı içinde bulunan A alanına sahip bir ilmekten geçen akı $BA\cos\theta$ 'ya eşittir. O halde indüklenmiş emk

$$\varepsilon = -\frac{d}{dt}(BA\cos\theta)$$

olur. Bu ifadeden emk'nın devrede pek çok yolla indükleneceği görülür.

- B'nin büyüklüğü zamanla değişebilir.
- İlmeğin çevrelediği alan zamanla değişebilir.
- B ile ilmeğin normali arasındaki θ açısı zamanla değişebilir.
- Yukarıdakilerin herhangi bir birleşimi olabilir.

Soru: A yüzey alanlı dikdörtgen bir halka, bu halka düzlemine dik olan bir manyetik **B** alanı içine yerleştirilmiştir. Bu alanın büyüklüğü $B = B_{maks}e^{-t/\tau}$ bağıntısına uygun olarak değişmektedir. Burada B_{maks} ve τ sabittirler. $t < 0$ için alanın değeri B_{maks} 'dır.

- a) Faraday yasasını kullanarak halkada indüklenen emk'nın aşağıdaki bağıntı ile verildiğini gösterin.

$$\varepsilon = (AB_{maks} / \tau)e^{-t/\tau}$$

- b) $A = 0,16 \text{ m}^2$, $B_{maks} = 0,35 \text{ T}$ ve $\tau = 2 \text{ s}$ ise $t = 4 \text{ s}$ 'deki ε için sayısal bir değer bulun.

- c) b'de verilen A, B_{maks} ve τ değerleri için ε 'nin maksimum değeri nedir?

Çözüm:

a) $\phi = BA$

$$\phi = AB_{maks}e^{-t/\tau}$$

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = -AB_{maks} \left(-\frac{1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$

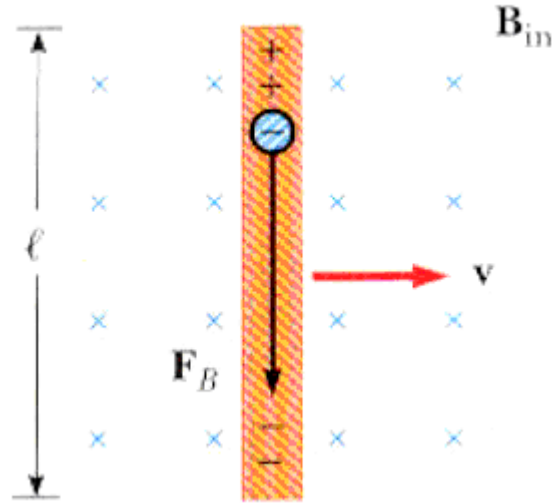
$$\varepsilon = \frac{AB_{maks}}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

b) $\varepsilon = \frac{0,16 \cdot 0,35}{2} e^{-\frac{4}{2}} = 3,79 \text{ mV}$

- c) Maksimum $t = 0$ için

$$\varepsilon = \frac{AB_{maks}}{\tau} = 28 \text{ mV}$$

9.2. HAREKETSEL EMK



Şekil 4. \mathbf{v} 'ye dik durgun bir \mathbf{B} manyetik alan içinde \mathbf{v} hızıyla hareket eden l uzunluğundaki doğrusal iletken çubuk.

İletkendeki elektronlar, iletken boyunca $\mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$ ile verilen, l boyunca \mathbf{v} ve \mathbf{B} 'ye dik bir kuvvetin etkisinde kalacaklardır. Bu kuvvetin etkisi ile elektronlar alt uca hareket ederek orada birikecekler ve üst uçta net bir pozitif yük kalacaktır. Böylece iletken içinde bir elektrik alan meydana getirilir. Uçlardaki yük artışı, aşağıya doğru yönelen qvB manyetik kuvvetinin yukarıya doğru yönelen qE elektrik kuvveti tarafından dengelenmesine kadar devam eder. Denge şartı

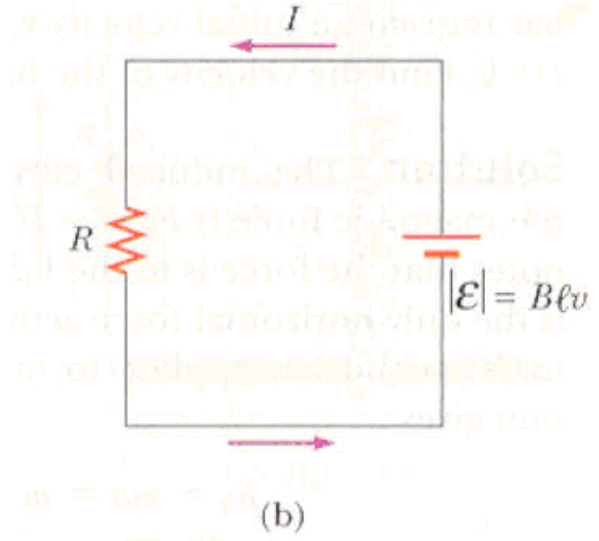
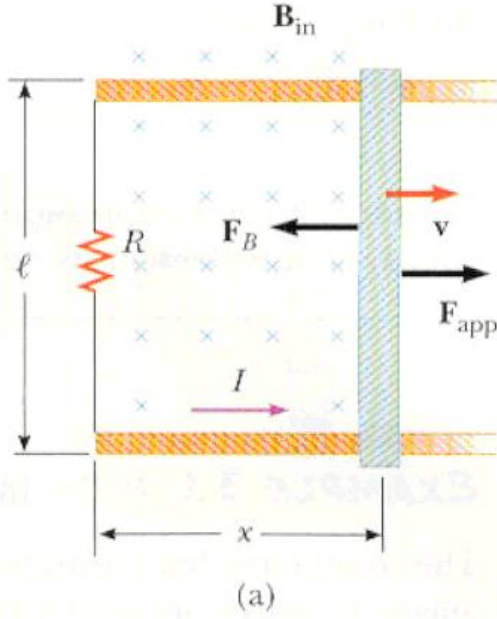
$$qE = qvB \quad \Rightarrow \quad E = vB$$

olur. İletkende oluşan elektrik alan iletkenin uçları arasındaki potansiyel farkına $\Delta V = El$ ile bağlıdır. Böylece

$$\Delta V = El = B/v$$

elde edilir.

O halde iletken düzgün bir manyetik alan içinde hareket ettiği sürece, iletkenin uçları arasında bir potansiyel fark oluşur.



Şekil 5. (a) v hızıyla ve iki iletken ray boyunca \mathbf{F}_{uyg} kuvveti etkisiyle kayan iletken çubuk. **(b)** (a)'ya eşdeğer devre.

İki paralel iletken ray boyunca kayan, ℓ uzunluğunda bir iletken çubuk, uygulanan F_{uyg} kuvvetinin etkisiyle v hızıyla sağa doğru çekildikçe çubuktaki serbest yükler, çubuk boyunca bir manyetik etkisinde kalırlar. Bu kuvvet, yükler kapalı bir iletken boyunca hareket ettiklerinden indüklenmiş bir akım başlatır. Bu durumda halka içinden geçen manyetik akının değişim hızı ve böylece hareketli çubuğun uçları arasındaki indüklenmiş emk, çubuk manyetik alan içinde hareket ettikçe halkanın alanındaki değişimle orantılıdır.

Herhangi bir anda devrenin anda devrenin çevrelediği alan ℓx olduğundan bu alandan geçen manyetik akı

$$\Phi_B = B\ell x$$

olur. Faraday yasasını kullanarak indüklenen hareketssel emk'yı

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -\frac{d}{dt}(B\ell x) = -B\ell \frac{dx}{dt}$$

$$\varepsilon = -B\ell v$$

bulunur.

Devrenin direnci R olduğuna göre indüksiyon akımının büyüklüğü

$$I = \frac{|\mathcal{E}|}{R} = \frac{B\ell v}{R}$$

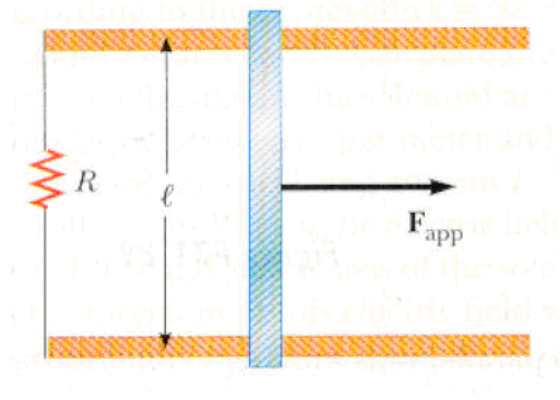
olur.

Çubuk düzgün bir B manyetik alanı içinde hareket ettikçe $I\ell B$ büyüklüğündeki F_B manyetik kuvvetinin etkisi altında kalır. Bu kuvvetin yönü çubuğun hareket yönünün tersidir. Çubuk sabit hızla hareket ettiği için uygulanan kuvvet manyetik kuvvete büyüklük bakımında eşit, fakat zıt yönlü olmalıdır. O halde uygulanan kuvvet tarafından sağlanan güç

$$P = F_{\text{uyg.}} \cdot v = (I\ell B)v = \frac{B^2 \ell^2 v^2}{R} = \frac{\mathcal{E}^2}{R} = I^2 R = I\mathcal{E}$$

olur.

Örnek :



Şekildeki düzenekte iletken bir çubuk, bir tarafından 6Ω 'luk bir dirençle bağlanmış, sürtünmesiz iletken raylar üzerinde kendisine paralel bir biçimde sağa doğru hareket etmektedir. $2,5 \text{ T}$ değerinde bir manyetik alan, kağıt düzleminde içeriye doğru yönelmiştir. $\ell = 1,2 \text{ m}$ ve çubuğun kütlesi ihmal edildiğine göre;

- Çubuğu sağa doğru 2 m/s 'lik sabit bir hızla hareket ettirebilmek için uygulanması gereken kuvveti hesaplayınız.
- Bu dirence hangi hızda enerji verilir.

Çözüm:

a) $\mathcal{E} = B\ell v$

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} \Rightarrow I = \frac{B\ell v}{R}$$

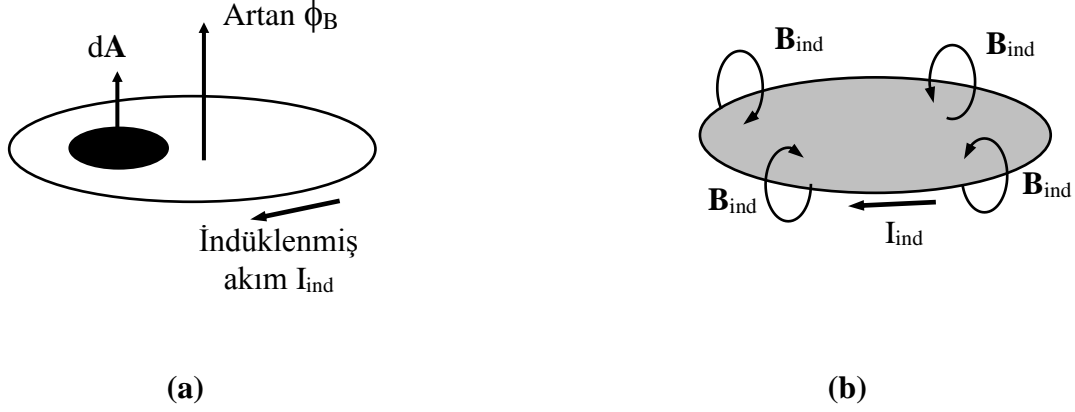
$$\vec{F}_B = I \vec{\ell} \times \vec{B} \Rightarrow F_B = I\ell B = \frac{B\ell v}{R} \ell B$$

$$F_B = \frac{B^2 \ell^2 v}{R} = \frac{(2,5)^2 \cdot (1,2)^2 \cdot 2}{6}$$

$$F_B = 3 \text{ N}$$

b) $P = I^2 R = \frac{B^2 \ell^2 v^2}{R} = 3 \cdot 2 = 6 \text{ W}$

9.3. LENZ YASASI



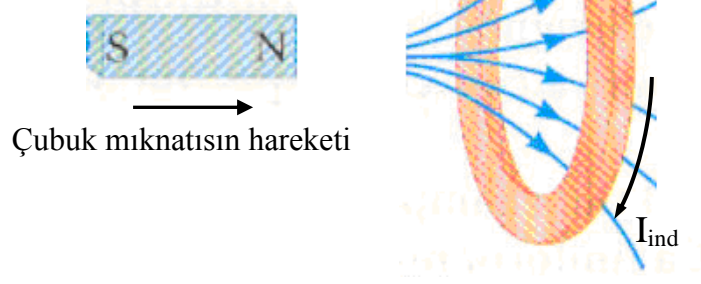
Şekil 6.

Şekilde görüldüğü gibi indüksiyon akımının oluşturduğu manyetik alan yüzeyin içine yönelmiştir. Akımı doğuran manyetik akı değişimi pozitifdir.

Lenz kanununa göre halkadan geçen akım, halkanın, halkaya yaklaşarak manyetik akıyı artıran çubuk mıknatısa bakan yönünü mıknatıs kutbu ile aynı işaretli yapar. Bu durumda bir manyetik dipol gibi davranan halka, kendisine yaklaşan çubuk mıknatısı iter. Bu itme akımı oluşturan nedene, yani mıknatısın çubuğa yaklaşmasına, karşı koyacak yöndedir. Yani, indüksiyon akımı kendisini meydana getiren nedene karşı koyacak yönde akar. Buna Lenz Kanunu denir.

İndüksiyon akımını doğuran manyetik alan, indüksiyon akımını meydana getiren manyetik akı değişimine karşı koyacak yönde oluşur.

Örnek:

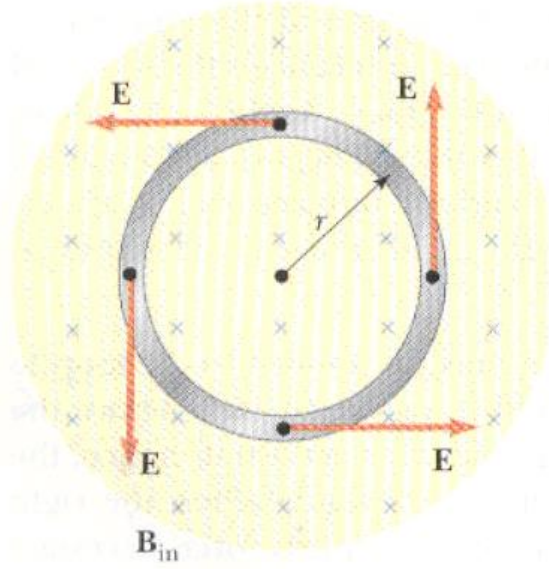


Bir çubuk mıknatısın kuzey kutbu sabit bir halkaya doğru itilmektedir. Bu halkada oluşan indüksiyon akımının yönünü Lenz Kanununa göre bulunuz.

Çözüm:

Mıknatısın kuzey kutbu halkaya yaklaştıkça, mıknatısa dik olan halka yüzeyinden geçen manyetik akı artar. Lenz kanuna göre, indüksiyon akımı halkadan geçen manyetik akı değişimine karşı yöndedir. İndüksiyon akımı, manyetik akıyı (ve manyetik alanı) azaltan bir manyetik alan üretir. İndüklenmiş manyetik alanın yönü sola doğru olacaktır. Dolayısıyla halkadaki akım şekilde gösterildiği gibi saat ibreleri yönündedir.

9.4. İNDÜKSİYON EMK'LARI VE ELEKTRİK ALANLAR



Şekil 7. Halka düzlemine dik düzgün bir manyetik alan içinde r yarıçaplı bir halka. **B** zamanla değişirse halkaya teğet yönde bir elektrik alanı oluşur.

Değişen bir manyetik akı, iletken bir halkada emk ve akım oluşturur. Bu nedenle, manyetik akı değişiminin bir sonucu olarak ta iletkene bir elektrik alanı meydana gelir. İndüklenmiş bu elektrik alanı durgun yüklerin oluşturduğu elektrik alandan ayıran, bu alanın korunumlu olmayıp zamanla değişmesidir.

Şekildeki manyetik alan zamanla değişirse Faraday yasasına göre, halkada bir $\varepsilon = -d\phi/dt$ 'lik emk oluşur. Ortaya çıkan bu indüklemiş akım, indüklenmiş halkaya teğet bir E elektrik alanının varlığını vurgular.

Bir q deneme yükünü halka etrafında bir defa hareket ettirmek için yapılan iş $q\varepsilon$ 'ye eşittir. Bu yüke etkiyen elektriksel kuvvet qE olduğundan, halka etrafında bu yükü hareket ettirmek için kuvvetin yaptığı iş $qE(2\pi r)$ 'dir.

Bu ifadelerin eşitliğinden

$$q\varepsilon = qE(2\pi r)$$

$$E = \frac{\varepsilon}{2\pi r}$$

bulunur. Faraday yasasına ve dairesel halkanın $\phi_B = BA = \pi r^2 B$ gerçeğini kullanarak indüklenmiş alan

$$E = -\frac{1}{2\pi r} \frac{d\phi_B}{dt} = -\frac{r}{2} \frac{dB}{dt}$$

şeklinde elde edilir. (-) işaretinin anlamı, indüklenmiş elektrik alanın manyetik alandaki değişime karşı koyacak yönde olduğudur.

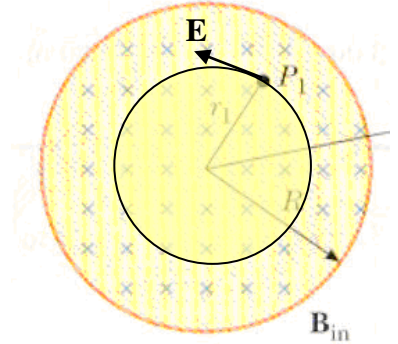
Yukarıdaki ifadelerden, herhangi bir kapalı yol için emk'nın, yol boyunca $\mathbf{E} \cdot d\mathbf{s}$ 'nin çizgisel integrali olduğu görülür. O halde Faraday'ın $\mathcal{E} = -d\phi/dt$ indüksiyon yasasını en genel olarak

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{d\phi_B}{dt}$$

olarak yazılabilir. O halde,

İndüklenmiş E elektrik alanı, korunumlu olmayan değişen bir manyetik alan yardımıyla oluşturulmuş zamanla değişen bir alan olarak tanımlanır.

Örnek: Sayfa düzleminden içeriye doğru yönelmiş bir manyetik alan $B=0,03t^2 + 1,4$ T denklemin uygun olarak zamanla değişmektedir. Manyetik alan $R = 2,5$ cm yarıçaplı dairesel bir kesite sahiptir. $t = 3$ s ve $r_1 = 0,02$ m olduğu zaman P_1 noktasında elektrik alanın büyüklüğü ve yönü nedir?



Çözüm:

$$\Phi = BA = (0,03t^2 + 1,4) \cdot \pi r_1^2$$

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{d\phi_B}{dt}$$

$$E \cdot 2\pi r_1 = -0,06t \cdot \pi r_1^2$$

$$E = -0,03t \cdot r_1$$

$$E = -0,09 \cdot 0,02$$

$$E = -1,8 \cdot 10^{-3} \text{ N/C}$$

Problemler

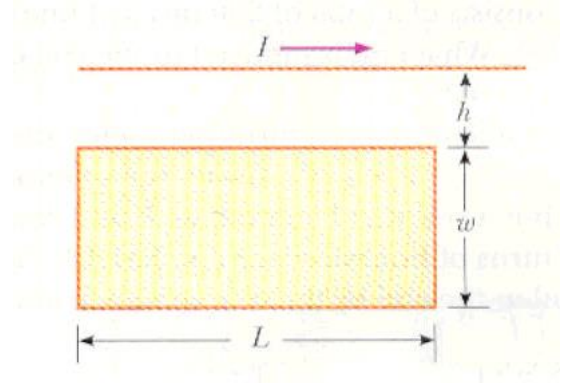
1. Şekilde gösterildiği gibi, w genişliğinde ve L uzunluğunda dikdörtgen biçimindeki bir tel halka ile I akımını taşıyan uzun ve doğru bir tel bir masa üzerinde bulunmaktadır.

- a) Halka içinden geçen ve I akımından kaynaklanan manyetik akıyı bulun.
- b) a ve b sabitler olmak üzere, akımın zamana göre $I = a + bt$ şeklinde değiştiğini kabul ederek, $b = 10 \text{ A/s}$, $h = 1 \text{ cm}$, $w = 10 \text{ cm}$ ve $L = 100 \text{ cm}$ ise halkadaki indüklenmiş olan emk'ı bulun. Dikdörtgende indüksiyon akımının yöneldiği nedir?

Çözüm:

a) $\phi = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$

$$\begin{aligned} \phi &= \int_h^{h+w} B dA = \int_h^{h+w} \frac{\mu_0 I}{2\pi y} L dy \\ &= \frac{\mu_0 I L}{2\pi} \int_h^{h+w} \frac{dy}{y} \\ \phi &= \frac{\mu_0 I L}{2\pi} \ln \frac{h+w}{h} \end{aligned}$$



\vec{B} İçe yönelmiş \vec{B}_{ind} Dışa yönelmiş

b) $\mathcal{E} = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \left(\frac{\mu_0 I L}{2\pi} \ln \frac{h+w}{h} \right)$

$$= -\left(\frac{\mu_0 L}{2\pi} \ln \frac{h+w}{h} \right) \frac{dI}{dt}$$

$I = a + bt$ $\frac{dI}{dt} = b$

$$\mathcal{E} = -\left(\frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1}{2\pi} \ln \frac{0,01 + 0,1}{0,01} \right) \cdot 10$$

$$\mathcal{E} = 2 \cdot 10^{-6} \cdot \ln 11$$

$$\mathcal{E} = -4,8 \cdot 10^{-6} \text{ V}$$

2. Gitarın çelik teli titreşmektedir. Bu telin yakınında bulunan algılama bobininin alanına dik olan manyetik alanın bileşeni

$$B = 50 \text{ mT} + (3,23 \text{ mT})\sin(2\pi 523t /s)$$

ile verilmektedir. Dairesel biçimli olan algılama bobininin sarım sayısı 30 ve yarıçapı 2,7 mm'dir. Bobinde indüklenen emk'yı zamanın fonksiyonu olarak bulunuz.

Çözüm:

$$\phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A} = BA \cos \theta = BA$$

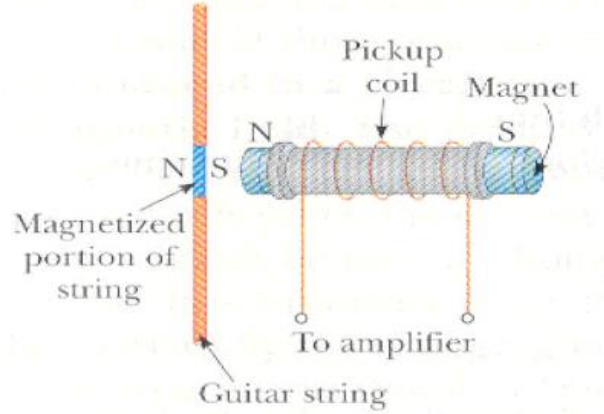
$\theta = 0$ olduğu için

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt}$$

$$\varepsilon = -30 \frac{d}{dt} \left[(50 \cdot 10^{-3} + 3,2 \cdot 10^{-3} \sin 2\pi 523t) (\pi (2,7 \cdot 10^{-3})^2) \right]$$

$$\varepsilon = -30 \cdot \left(\pi (2,7 \cdot 10^{-3})^2 \right) 3,2 \cdot 10^{-3} \cdot 2\pi 523 \cos 2\pi 523t$$

$$\varepsilon = -7,22 \cdot 10^{-3} \cdot \cos 2\pi 523t$$



3. Bir otomobil 1,2 m uzunluğunda düşey bir radyo antenine sahiptir. Dünyanın manyetik alanının $50 \mu\text{T}$ olduğu ve yatayın 65° altında aşağı doğru (kuzeye doğru) yöneldiği bir yerde, otomobil yatay yolda 65 km/saat hızla hareket ediyor (a) Antenin üst kısmı alt kısmına göre pozitif olacak şekilde, antende maksimum hareketssel emk'yı üretmek için, otomobilin hareket etmek zorunda olduğu yönü bulunuz. (b) İndüklenmiş emk'nın büyüklüğünü hesaplayınız.

Çözüm:

$$\varepsilon = B\ell v$$

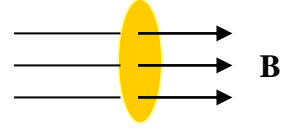
$$= 50 \cdot 10^{-6} \cdot 1,2 \cdot 65 \cdot \frac{1000}{3600} \cdot \cos 65$$

$$\varepsilon = 4,58 \cdot 10^{-4} \text{ V}$$

4. r yarıçaplı dairesel bir halka, manyetik alanın yönü dairesel halkanın düzlemine dik olacak şekilde, uzaysal olarak düzgün bir manyetik alan içindedir. Manyetik alan $B(t) = a + bt$ bağıntısına uygun olarak zamanla değişmektedir.

- a) $t = 0$ 'da halkadan geçen manyetik akıyı hesaplayın.
- b) Halkadaki indüklenmiş emk'yı hesaplayınız.
- c) Halkanın direnci R ise indüklenmiş akım nedir?
- d) Halkanın direncine sağlanan elektriksel enerjinin sağlanma hızı nedir?

Çözüm:



a) $B(t) = a + bt$

$t = 0$ 'da $B = a$ olur.

$$\phi = BA = a\pi r^2$$

b) $\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt} = -\frac{d}{dt}[(a + bt)\pi r^2]$

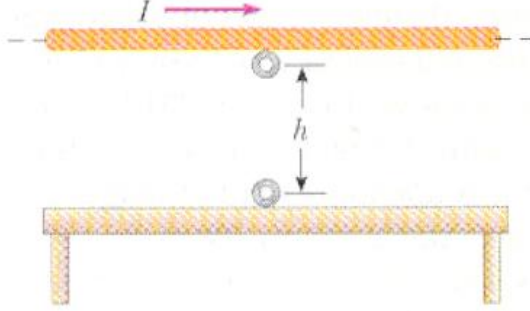
$$\varepsilon = -b\pi r^2$$

c) $I = \frac{\varepsilon}{R} = -\frac{b\pi r^2}{R}$

d) $P = I^2 R = \frac{b^2 \pi^2 r^4}{R}$

5. 0,5 cm yarıçaplı dairesel bir metal pul 10 A akım taşıyan uzun ve doğrusal bir telin tam alt ucuna yakın tutulmuştur. Pul, masanın üst yüzeyinden 0,5 m yukarıda yerleştirilmiştir.

a) Pul, durgun halden aşağıya doğru bırakılırsa, düşmeye başladığı andan itibaren masaya dokunduğu ana kadar geçen zamanda pulda indüklenen ortalama emk'nın büyüklüğü ne kadardır? b) Puldaki indüklenmiş olan akımın yönü nedir?



Çözüm:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = -\frac{\phi_2 - \phi_1}{\Delta t}$$

$$B_2 = \frac{\mu_0 I}{2\pi(h+a)}$$

$$\phi_2 = \frac{\mu_0 I}{2\pi(h+a)} \pi a^2$$

$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$$

$$\phi_1 = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} \pi a^2$$

$$\phi_2 - \phi_1 = \frac{\mu_0 I a^2}{2} \left(\frac{1}{h+a} - \frac{1}{a} \right)$$

$$\Delta\phi = \frac{\mu_0 I a^2}{2} \left(-\frac{h}{a(h+a)} \right)$$

$$\Delta\phi = \frac{\mu_0 I a h}{2(h+a)}$$

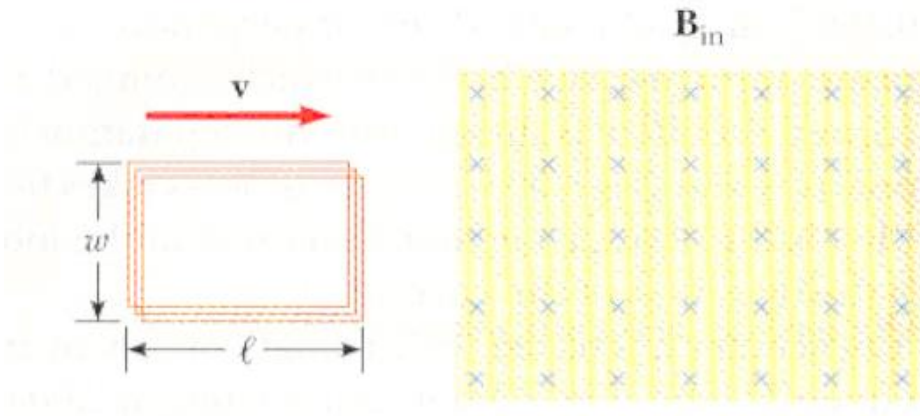
$$h = \frac{1}{2} g \Delta t^2 \quad \Rightarrow \quad \Delta t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\phi}{\Delta t} = -\frac{\mu_0 I a h}{2(h+a)} \sqrt{\frac{g}{2h}}$$

$$\varepsilon = -\frac{\mu_0 I a \sqrt{gh}}{2\sqrt{2}(h+a)} = 97,4 \text{ nV}$$

6. R dirençli dikdörtgen bir bobin, şekilde görüldüğü gibi, her birinin uzunluğu ℓ ve genişliği w olan, N tane sarıma sahiptir. Bu bobin, v hızıyla düzgün bir \mathbf{B} manyetik alanının içine doğru hareket ediyor.

- Bobin alan içine girerken,
- Bobin manyetik alan içinde hareket ederken,
- Bobin manyetik alandan çıkarken, bobine etki eden bileşke kuvvetin büyüklüğü ve yönü nedir?



Çözüm:

$$\text{a)} \quad \varepsilon = -N \frac{\Delta\phi}{\Delta t} = -N \frac{d}{dt}(B\omega x) = NB\omega v$$

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{NB\omega v}{R}$$

$$F = NILB = N \frac{NB\omega v}{R} \omega B = \frac{N^2 B^2 \omega^2}{R} v \quad \text{Sola doğru}$$

- b)** Tamamen alanın içindeyken $\phi = NBA = \text{sabit}$ olduğundan

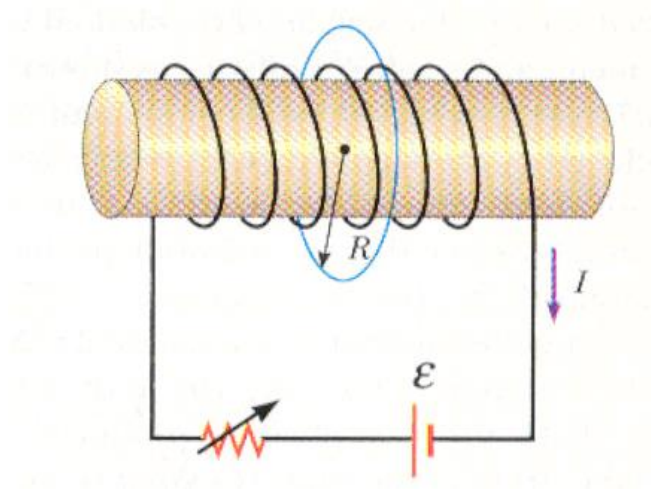
$$\varepsilon = 0 \Rightarrow I = 0 \Rightarrow F = 0$$

- c)** Akım a şıkkındaki ile aynıdır. Fakat zıt yöndedir.

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{NB\omega v}{R}$$

$$F = \frac{N^2 B^2 \omega^2}{R} v \quad \text{Sağa doğru}$$

7. R yarıçaplı dairesel ve tek sarımlı halka, ℓ uzunluğunda ve r yarıçaplı N sarıma sahip uzun bir solenoidle aynı eksenslidir. Solenoidin akımı Δt zaman aralığı içinde I_1 'den I_2 'ye lineer olarak azalacak biçimde direnç değiştiriliyor. Halkada indüklenen emk'yı bulunuz.



Çözüm:

Solenoidin içindeki alan:

$$B = \mu_0 n I = \mu_0 \frac{N}{\ell} I$$

Tek bir ilmekten geçen akı:

$$\phi = B \cdot A_{sol} = \mu_0 \frac{N}{\ell} I \cdot \pi r^2$$

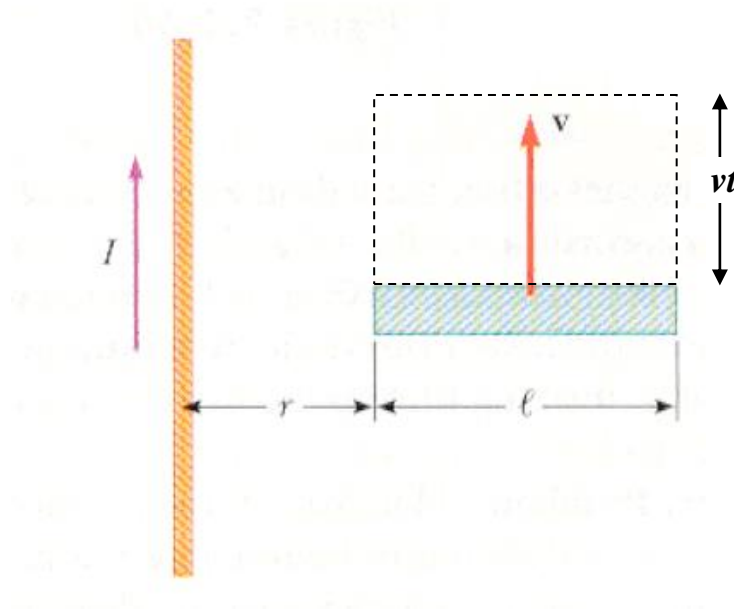
Halkada indüklenen emk:

$$\mathcal{E} = -\frac{\Delta \phi}{\Delta t} = -\mu_0 \frac{N}{\ell} \pi r^2 \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

$$\mathcal{E} = -\frac{\mu_0 N \pi r^2}{\ell} \left(\frac{I_2 - I_1}{\Delta t} \right)$$

8. ℓ uzunluğundaki iletken bir çubuk, I kararlı akımını taşıyan uzun bir tele paralel olacak şekilde v hızıyla hareket etmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, çubuğun eksenini tele daima dik tutulup, çubuğun tele yakın olan ucu r mesafesindedir. Çubukta indüklenen emk'nın aşağıdaki denklemle verildiğini gösterin:

$$|\mathcal{E}| = \frac{\mu_0 I}{2\pi} v \ln \left(1 + \frac{\ell}{r} \right)$$



Çözüm:

Telin oluşturduğu manyetik alan: $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi x}$

Çubukta oluşan akı:

$$\phi = \int B dA = \int \frac{\mu_0 I}{2\pi x} v t dx$$

$$\phi = \frac{\mu_0 I v t}{2\pi} \int_r^{r+\ell} \frac{dx}{x}$$

$$\phi = \frac{\mu_0 I v t}{2\pi} \ln \frac{r+\ell}{r}$$

$$|\mathcal{E}| = \frac{d\phi}{dt} = \frac{\mu_0 I v}{2\pi} \ln \left(1 + \frac{\ell}{r} \right)$$