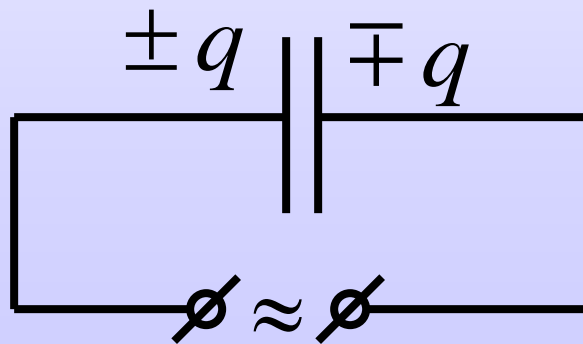


## 48. Nihkevool.

Maxwell'i II hüpotees. Eksisteerib I hüpoteesi pöördhüpotees.

Igasugune elektrivälja muutus kutsub esile pööriselise muutuva magnetvälja tekke.

Vaatame kondensaatorit vahelduvvoolu ahelas.



Leiame kvantitatiivse seose elektri- ja magnetvälja vahel kondensaatori plaatidevahelises alas.

Arvestame, et vooluringis on igal ajahetkel vool pidev. On täidetud pidevuse tingimus elektrivoolu jaoks.

Kuna kondensaatori plaatide vahel puudub juhtiv keskkond, siis eeldame seal nn. nihkevoolu olemasolu. Juhtmetes on siis nn. juhtivusvool.

$\vec{j}$  Juhtivusvoolu tihedus.

$$\vec{j} = \vec{j}_{nihke}$$

$\vec{j}_{nihke}$  Nihkevoolu tihedus.

Pidevus.

Voolutihedus juhtmes:  $j = \frac{I}{S} = \frac{1}{S} \cdot \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{q}{S} \right)$

See on aga laengu pindtihedus plaadil.

$$\frac{q}{S} = \sigma$$

$$\dot{j}_{nihke} = \frac{d\sigma}{dt}$$

Kondensaatori plaatide vahel on elektriväli.

$$\vec{E}$$

Seal on ka elektrinihkevektor.

$$\vec{D}$$

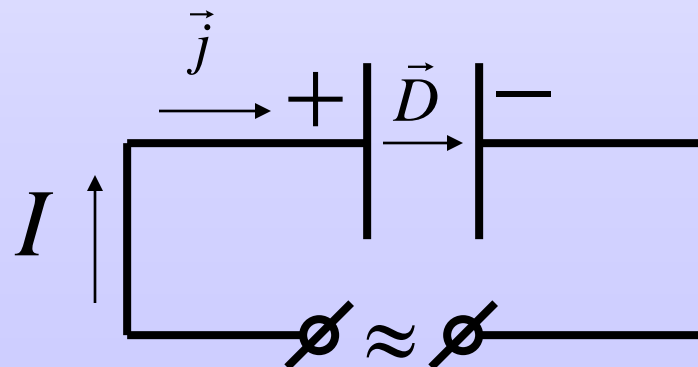
$$\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \vec{E} \quad \text{Oletame, et on vaakumis.}$$

Varasemast on teada:  $D = \sigma$

Seega:

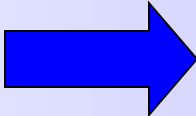
$$\vec{j}_{nihke} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

Vaatame ka märgi probleemi detailselt:

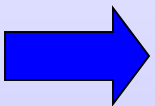
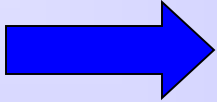


Kondensaator hakkab laaduma ja väli plaatide vahel kasvab.

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} > 0$$

Seega vektorid:  $\vec{D} \uparrow \uparrow \frac{\partial \vec{D}}{dt}$    $\frac{\partial \vec{D}}{dt} \uparrow \uparrow \vec{j}$

Kui kondensaator tühjeneb, siis  $j$  on vastupidine ja :

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} < 0$    $\vec{D} \uparrow \downarrow \frac{\partial \vec{D}}{dt}$    $\frac{\partial \vec{D}}{dt} \uparrow \uparrow \vec{j}$

Seega:

$$\vec{j}_{nihke} \uparrow \uparrow \vec{j}$$

Dielektriku olemasolu korral kondensaatori plaatide vahel:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

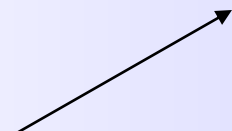
$$\vec{j}_{nihke} = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{P}}{\partial t}$$

Nihkevoolutiheduse osa  
vaakumis

Nihkevoolutiheduse osa  
dielektrikus.

Kõik põhjustavad pööriselise magnetvälja tekke.

Üldjuhul:  $\vec{j}_{kogu} = \vec{j} + \vec{j}_{nihke}$



Juhis on see osa madalatel sagedustel väike.

Maxwell üldistas koguvooluseaduse.

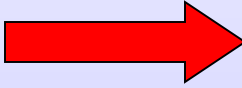
$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \left( \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{S}$$

## 49. Maxwell'i võrrandid integraalkujul.

Need on elektromagnetismi põhivõrrandid. Võib öelda, et tänapäeva tehnika üks põhialustest, mida iga päev ohtralt pruugime.

1) Elektriväli võib olla nii potentsiaalne, kui ka pööriseline.

$$\vec{E} = \vec{E}_q + \vec{E}_B$$

Kuna:  $\oint_L \vec{E}_q \cdot d\vec{l} = 0$  

$$\oint_L \vec{E}_B \cdot d\vec{l} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S}$$

See võrrand näitab, et muutuva elektrivälja allikaks on muutuv magnetväli.



2) Tsirkulatsiooniteoreem ehk üldistatud koguvooluseadus.

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \left( \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{S}$$

See võrrand näitab, et magnetvälja põhjustab liikuv laeng või muutuv elektriväli.

3) Gauss'i teoreem elektrivälja jaoks.  $\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \sum q_i$

Pideva laengujaotuse korral.

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \int_V \rho \cdot dV$$

4) Gauss'i teoreem magnetinduktsiooni vektori jaoks.

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

Tähistab fakti, et magnetlaenguid ei eksisteeri.

Neljale võrrandile lisatakse nn. seosvõrrandid.

$$\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot \vec{E}$$

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \mu \cdot \vec{H}$$

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E}$$

Ohm'i seadus dif. kujul.

# 50. Võnkering

**Kuidas tekitada lihtsaid so. harmoonilisi elektromagnetilisi võnkumisi?**

Võnkering. Olgu  $R=0$  st. Soojuskadusid pole.

$$E_i = -L \frac{dI}{dt}$$



$$U_C = \frac{q}{C}$$

Esialgse energia anname nii, et laeme mingist välisest allikast kondensaatori ja siis ühendame pooliga, millel on induktiivsus  $L$ .

$$W = \frac{q^2}{2C}$$

Pärast ühendamist tekib vool ja kondensaatori energia hakkab vähenema, pooli magnetvälja energia aga hakkab kasvama.

Kehtib energia jäävuse seadus.

$$W = \frac{q^2}{2C} + \frac{L\dot{q}^2}{2} = \text{const}$$

$$\dot{q} = \frac{dq}{dt} = I$$

Ohm'i seadus kogu ahela kohta suvalisel ajahetkel.

$$U_C = \frac{q}{C} \quad U_C = E_i \quad E_i = -L \frac{dI}{dt} = -L \cdot \ddot{q}$$

$$\frac{q}{C} = -L \cdot \ddot{q}$$

$$\frac{q}{C} + L \cdot \ddot{q} = 0 \quad \left| \cdot \frac{1}{L} \right.$$

$$\frac{1}{LC} q + \ddot{q} = 0$$

Tähistame lähtudes dimensioonide analüüsist. Omavõnkesagedus.

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$$

See on harmoonilise võnkumise diferentsiaalvõrrand. Lahend teada tuntud.

$$q = q_m \cos(\omega_0 t + \varphi)$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC} \Rightarrow T = 2\pi\sqrt{L \cdot C}$$

Thompsoni valem perioodi arvutamiseks.

Vaatame voolutugevuse muutumist võnkeringis.

$$\begin{aligned} I &= \dot{q} = -\omega_0 \cdot q_m \sin(\omega_0 t + \varphi) = \\ &= I_m \cos\left(\omega_0 t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right) \end{aligned}$$

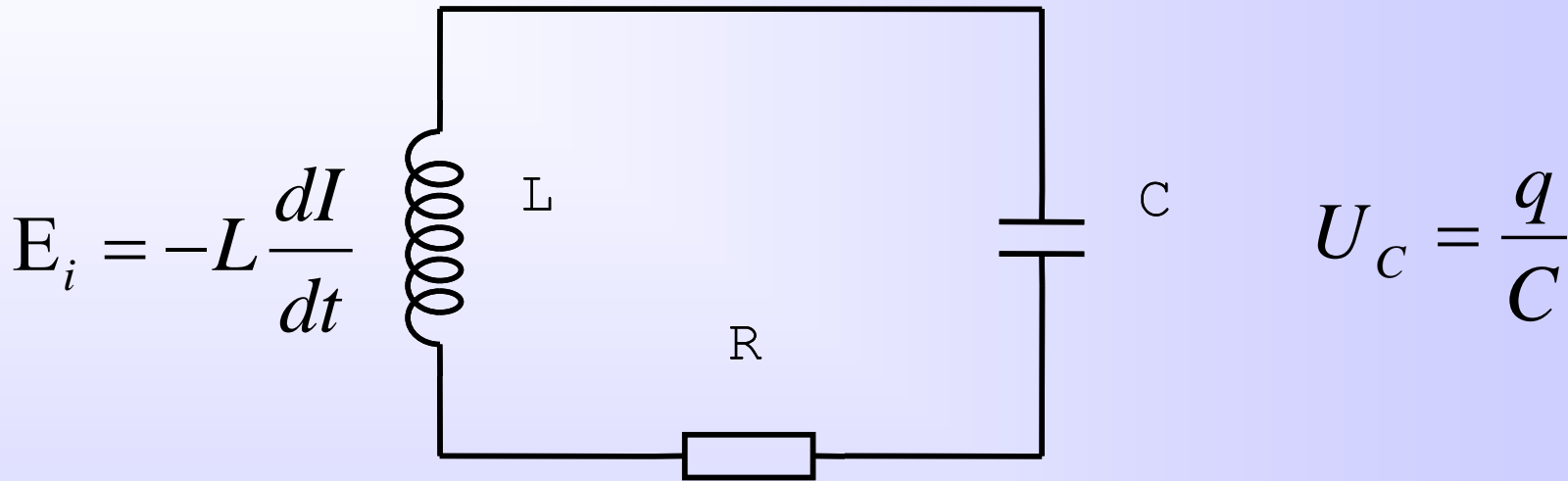
Vaatame pinget muutumist kondensaatoril.

$$U_C = \frac{q}{C} = \frac{q_m}{C} \cos(\omega_0 t + \varphi)$$

Vool jõuab pingest ette 90 kraadi.

Kuna soojuskadusid pole, siis kestavad võnkumised lõpmata kaua. Sumbumatud omavõnkumised.

## 51. Sumbuvad elektromagnetilised võnkumised võnkeringis.



$$U_R = I \cdot R$$



Ohm'i seadus kogu vooluringi kohta.

$$\frac{q}{C} + I \cdot R = -L \frac{dI}{dt} \quad \left| \cdot \frac{1}{L} \right.$$

$$\frac{q}{LC} + I \cdot \frac{R}{L} + \frac{dI}{dt} = 0$$

$$I = \frac{dq}{dt} = \dot{q}$$

$$\frac{dI}{dt} = \frac{d^2 q}{dt^2} = \ddot{q}$$

$$\ddot{q} + \frac{R}{L} \dot{q} + \frac{1}{LC} q = 0$$

Kasutame jälle dimensioonide analüüsi kordajate füüsikalise mõtte selgitamiseks.

$$\beta = \frac{R}{2L}$$

Nii tähistasime ka mehaanikas.

$$\omega_0^2 = \frac{1}{LC}$$

B on sumbuvistegur

$$\ddot{q} + 2\beta \cdot \dot{q} + \omega_0^2 \cdot q = 0$$

Lahend on standardne.

$$q = q_m e^{-\beta \cdot t} \cos(\omega t + \varphi)$$

Ilma tõestuseta:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$$

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Hüvetegur. On võnkeringis oleva energia suhe ühes perioodis kaotatud energiasse.

Ise tõestada.