

Část II.

ELEKTŘINA A MAGNETISMUS

Sekce 1.

Základní poznatky

A.D. Pajdarová (ZČU)
KFY/FYSV (19/20)

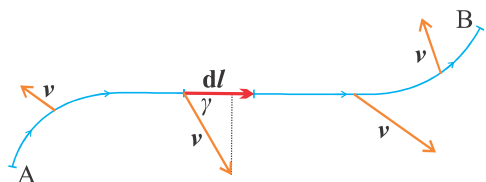
Matematický aparát II**Dráhový účinek vektoru**

~ udává, zda vektorové pole $\mathbf{v}(\mathbf{r})$ působí ve směru zvolené křivky

- Účinek vektoru bude tím větší, čím větší bude jeho průmět do křivky a čím větší bude úsek křivky, na kterém vektor působí. Tuto vlastnost má skalární součin, proto diferenciál dráhového účinku zavedeme výrazem

$$d\Gamma = \mathbf{v} \cdot d\mathbf{l} = v dl \cos \gamma, \quad (\text{II.1.1})$$

kde $d\mathbf{l} = \boldsymbol{\tau}^\circ dl$ je **orientovaný element křivky**, přičemž $\boldsymbol{\tau}^\circ$ je jednotkový vektor udávající směr křivky v daném místě a dl je délka elementu křivky.



Obrázek II.1.1: Ilustrace dráhového účinku vektoru. Křivka je orientována od bodu A k bodu B. Vek. pole $\mathbf{v}(\mathbf{r})$ se podél křivky mění, ale na velmi malém úseku $d\mathbf{l}$ lze $\mathbf{v}(\mathbf{r})$ považovat za konstantní.

Matematický aparát

Dráhový účinek vektoru

- Integrací podél celé křivky obdržíme celkový dráhový účinek vektoru, tj.

$$\Gamma = \int_c d\Gamma = \int_c \mathbf{v} \cdot d\mathbf{l}, \quad [\Gamma] = [v] \text{ m.} \quad (\text{II.1.2})$$

- Je-li $\Gamma > 0$, působí vekt. pole $\mathbf{v}(\mathbf{r})$ spíše ve směru křivky c . Je-li $\Gamma < 0$, působí vekt. pole $\mathbf{v}(\mathbf{r})$ spíše proti směru křivky c .
- Křivka může být uzavřená (obklopuje pak jistou plochu S) a Γ se pak nazývá **irkulace vektoru**. Značí se

$$\Gamma = \oint_{c(S)} \mathbf{v} \cdot d\mathbf{l}. \quad (\text{II.1.3})$$

- Je-li $\Gamma \neq 0$ pro nějakou uzavřenou křivku c , říkáme, že vekt. pole $\mathbf{v}(\mathbf{r})$ má na křivce c **ír** (vekt. pole $\mathbf{v}(\mathbf{r})$ je **pole vírové**). Opakem je **pole nevírové**.

Matematický aparát

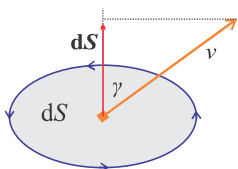
Tok vektoru plochou

~ udává, zda vektorové pole $\mathbf{v}(\mathbf{r})$ protéká zvolenou plochou v daném směru

- Tok vekt. pole $\mathbf{v}(\mathbf{r})$ plochou bude tím větší, čím větší bude velikost vektoru \mathbf{v} na ploše a čím kolmější bude tento vektor k ploše (bude mít větší kolmý průmět). Opět tudíž zavedeme diferenciál toku vektoru plochou pomocí skalárního součinu

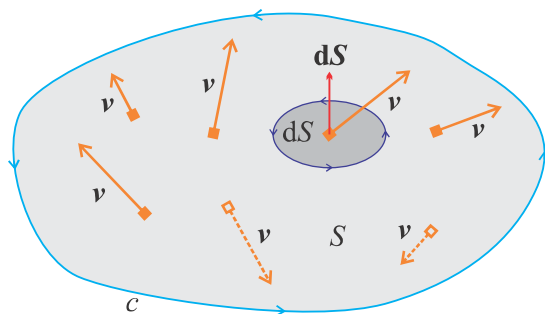
$$d\Phi = \mathbf{v} \cdot d\mathbf{S} = v dS \cos \gamma, \quad (\text{II.1.4})$$

kde $d\mathbf{S} = \boldsymbol{\nu}^\circ dS$ je **orientovaný element plochy**, přičemž $\boldsymbol{\nu}^\circ$ je jednotkový normálový vektor plochy (udává kladný směr toku) a dS je velikost elementu plochy.



Obrázek II.1.2: Směr vektoru elementu plochy $d\mathbf{S}$ je určen pravidlem pravé ruky, tj. **ukazují-li prsty pravé ruky směr obíhání křivky obklopující element, pak vztyčený palec udává směr vektoru elementu plochy**.

Matematický aparát



Obrázek II.1.3: Ilustrace k toku vektoru plochou. Plocha S je ohraničena orientovanou křivkou c , značíme $c(S)$. Směr i velikost vektorů vekt. pole $\mathbf{v}(\mathbf{r})$ se na ploše mění, viz plné šipky popisující vektory směřující „nad“ plochu a čárkované šipky směřující „pod“ plochu. Plochu S rozdělíme na malé elementy plochy dS , na nichž lze pokládat $\mathbf{v}(\mathbf{r})$ za konstantní. Křivka, která obklopuje element dS , **musí** mít stejnou orientaci jako c (viz stejný směr šipek na křivkách). Celkový tok vekt. pole $\mathbf{v}(\mathbf{r})$ plochou S pak dostaneme, sečteme-li všechny příspěvky k toku od všech elementů dS dělících S , tj. „vyintegrujeme“ příspěvky $d\Phi = \mathbf{v} \cdot d\mathbf{S}$ po celé ploše S .

Matematický aparát

Tok vektoru plochou

- Celkový tok vektorového pole $\mathbf{v}(\mathbf{r})$ plochou S získáme integrací, tj.

$$\Phi = \int_S d\Phi = \int_S \mathbf{v} \cdot d\mathbf{S}, \quad [\Phi] = [v] \text{ m}^2. \quad (\text{II.1.5})$$

- Je-li $\Phi > 0$, protéká vekt. pole $\mathbf{v}(\mathbf{r})$ spíše ve směru normály plochy S . Je-li $\Phi < 0$, protéká pole $\mathbf{v}(\mathbf{r})$ spíše proti směru normály plochy S .
- Plocha může být uzavřená (obklopuje pak jistý objem V a \mathbf{v}° vždy směřuje ven z V) a Φ se pak nazývá **tok vektoru uzavřené plochou**. Značí se

$$\Phi = \oint_{S(V)} \mathbf{v} \cdot d\mathbf{S}. \quad (\text{II.1.6})$$

- Je-li pak $\Phi > 0$, má vekt. pole $\mathbf{v}(\mathbf{r})$ v objemu V **zřídlo** (zdroj). Je-li $\Phi < 0$, má $\mathbf{v}(\mathbf{r})$ ve V **nor**. Je-li $\Phi = 0$ pro všechna S , je pole $\mathbf{v}(\mathbf{r})$ **nezřídlové**.

Elektrický náboj

Elektrický náboj Q

~ vlastnost základních látkových částic, která je podstatou elektrického a magnetického chování látkových objektů. Jednotka: $[Q] = \text{C(coulomb)} = \text{A s}$, kde A je ampér (viz dále).

- Atomy (v základním stavu) jsou elektricky neutrální, protože mají stejný počet el. nábojů kladných jako záporných. Kladný el. náboj nesou protony v atomovém jádře a záporný el. náboj mají elektrony v atomovém obalu.
- El. náboj je kvantován, tj. existuje nejmenší možné množství el. náboje, tzv. **elementární elektrický náboj** e_0 , a ostatní náboje jsou jeho celočíselným násobkem, tj. $Q = Ne_0$, kde $N \in \mathbb{Z}$. Velikost elem. el. náboje je rovna velikosti el. náboje protonu a elektronu a jeho hodnota je

$$e_0 \doteq 1,60217653 \cdot 10^{-19} \text{ C.} \quad (\text{II.1.7})$$

Elektrický náboj

Zákon zachování el. náboje

- **Celkový elektrický náboj izolované soustavy je neměnný.** Matematicky:

$$\sum Q_i = \text{konst.} \quad (\text{II.1.8})$$

Objemová hustota el. náboje ρ

- Pro makroskopická tělesa lze abstrahovat od kvantování el. náboje a popisovat spojitě jeho rozložení pomocí objemové hustoty dané vztahem

$$\rho = \frac{dQ}{dV}, \quad [\rho] = \text{C m}^{-3}, \quad (\text{II.1.9})$$

kde dQ je el. náboj, který se nachází v elementu prostoru dV okolo r .

Elektrický náboj

Volné a vázané náboje

- **Volný el. náboj** se může přemisťovat na makroskopické vzdálenosti, např. elektrony v kovech či ionty v plynu.
- **Vázaný el. náboj** se nemůže přemisťovat na makroskopické vzdálenosti.

Elektrický proud I

~ vzniká usměrněným pohybem látkových objektů nesoucích el. náboj

- Základní vztah definující el. proud

$$I = \frac{dQ}{dt}, \quad [I] = \text{A(ampr)}, \quad (\text{II.1.10})$$

kde dQ je kladný el. náboj, který projde danou plochou za čas dt .

- **El. proud je roven velikosti kladného el. náboje prošlého danou plochou za jednotku času.**

Elektrický náboj

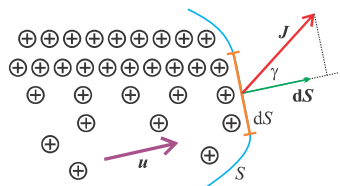
Plošná hustota el. proudu J

- Z mikroskopického hlediska se el. proud popisuje **plošnou hustotou el. proudu J** definovanou relací

$$dI = \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = J dS \cos \gamma, \quad [J] = \text{A m}^{-2}. \quad (\text{II.1.11})$$

- Pomocí plošné hustoty el. proudu je možné chápat el. proud jako tok vektoru J plochou S , tj.

$$I = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S}. \quad (\text{II.1.12})$$



Obrázek II.1.4: Ilustrace k plošné hustotě el. proudu. El. náboje se pohybují střední rychlostí u a procházejí plochou S , tím i elementem plochy dS . Pro velikost hustoty el. proudu J pak platí: $J = dI/(dS \cos \gamma)$.

Elektrické pole

Elektrický indukční tok Ψ

- **Elektrický náboj je zdrojem (zřídlem) elektrického pole**, tj. každý el. náboj vytváří ve svém okolí el. pole projevující se silovými účinky na jiné el. náboje.
- Schopnost náboje vytvářet el. pole kvantifikuje veličina **el. indukční tok** Ψ definovaná vztahem

$$\Psi = Q_c = \int_V \rho \, dV, \quad [\Psi] = C, \quad (\text{II.1.13})$$

kde Q_c je celkový el. náboj v uvažovaném prostoru o objemu V a ρ je objemová hustota el. náboje v tomto objemu.

- Rozložení el. nábojů nemusí být homogenní, tj. je nutné zavést veličinu charakterizující el. pole lokálně.

Elektrické pole

Indukce elektrického pole D

- K lokálnímu popisu el. pole slouží veličina **indukce el. pole** (také el. indukce) D , zavedená vztahem:

$$d\Psi = D \cdot dS = D \, dS \cos \gamma, \quad [D] = C \, m^{-2}. \quad (\text{II.1.14})$$

- **El. indukce udává plošnou hustotu el. indukčního toku a charakterizuje el. pole z hlediska jeho zdrojů (nábojů).**
- Ze znalosti el. indukce můžeme určit el. indukční tok z objemu V uzavřeného plochou S jako

$$\Psi = \oint_{S(V)} D \cdot dS. \quad (\text{II.1.15})$$

- Pro el. indukci platí princip superpozice, tj. $D = D_1 + D_2$.

Elektrické pole

Gaussova věta elektrostatiky

- Spojením (II.1.13) a (II.1.15) dostaneme **Gaussovu větu elektrostatiky**

$$\oint_{S(V)} \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \int_V \rho dV. \quad (\text{II.1.16})$$

- Slovy: **El. indukční tok uzavřenou plochou je roven celkovému el. náboji rozloženému v objemu touto plochou ohraničeném.** Význam: **Zdrojem el. pole jsou el. náboje.**
- Tj. el. pole je pole zřídlové, přičemž zřídly (popř. nory) jsou el. náboje.
- Gaussova věta elektrostatiky se stala jednou z Maxwellových rovnic, které jsou základními rovnicemi elektromagnetismu.

Elektrické pole

Intenzita elektrického pole \mathbf{E}

- Základní účinky el. pole jsou silové účinky mezi jednotlivými el. náboji.
- Bylo zjištěno, že v daném místě působí na el. náboj síla \mathbf{F}_e , která je úměrná velikosti tohoto náboje Q , tj.

$$\mathbf{F}_e = E Q. \quad (\text{II.1.17})$$

- Konstanta úměrnosti E je **intenzita el. pole** (též el. intenzita). Pomocí testovacího náboje Q , můžeme v prostoru rekonstruovat pole vektoru \mathbf{E} dle vztahu

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{F}_e}{Q}, \quad [E] = \text{V m}^{-1} = \text{m kg A}^{-1} \text{s}^{-3}, \quad (\text{II.1.18})$$

kde V je volt.

- Pro el. intenzitu platí též princip superpozice, tj. $\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2$.

Elektrické pole

Intenzita elektrického pole E

- Dle II. NPZ uděluje el. pole E nosiči el. náboje Q , který má hmotnost m , zrychlení $a = QE/m$.

Vztah mezi D a E

- Silové účinky daného el. pole závisejí na prostředí, v němž se el. pole rozkládá, proto pokládáme

$$D = \varepsilon E, \quad [\varepsilon] = \text{F m}^{-1}, \quad (\text{II.1.19})$$

kde ε je tzv. **permitivita prostředí** a $\text{F} = \text{m}^{-2} \text{kg}^{-1} \text{s}^4$ je farad, přičemž

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r, \quad (\text{II.1.20})$$

kde $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{F m}^{-1}$ je **permitivita vakua** a ε_r je **relativní permitivita prostředí** ($[\varepsilon_r] = 1$).

Elektrické pole

Vodiče, izolanty a polovodiče

- V látkovém prostředí el. náboje narážejí na atomy látky, což vede ke vzniku jejich střední unášivé rychlosti, a tím i k el. proudu o plošné hustotě

$$J = \gamma E, \quad [\gamma] = \text{S m}^{-1}, \quad (\text{II.1.21})$$

kde γ je **měrná el. vodivost** a $\text{S} = \text{m}^{-2} \text{kg}^{-1} \text{s}^3 \text{A}^2$ je siemens.

- Dle hodnoty γ rozdělujeme látky na:

- vodiče** – γ velké; mají velký počet volných nosičů náboje
- nevodiče** – γ malé; mají malý počet volných nosičů náboje; nazývají se též izolanty či dielektrika
- polovodiče** – γ střední; mají vlastnosti mezi nevodiči a vodiči

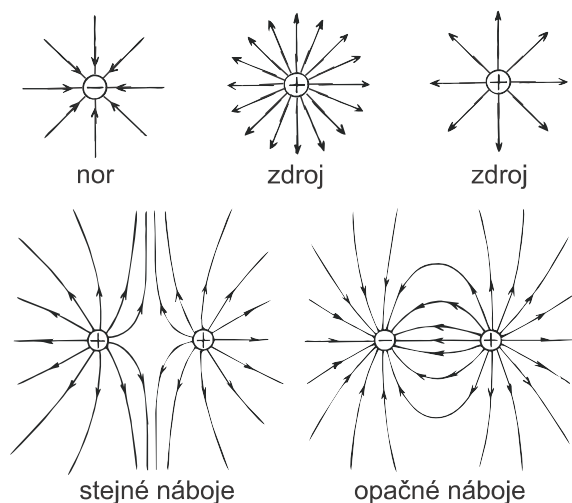
- D.Cv.:** Nastudovat mechanismus vedení el. proudu v kovech, plynech, kapalinách a polovodičích.

Elektrické pole

Grafické znázornění el. pole

- **Bodový náboj (BN)** – el. nabitě těleso o rozměrech zanedbatelných vůči rozměrům popisované oblasti prostoru
- K znázornění el. pole využíváme systému dvou typů křivek:
 - 1 **EL. indukční čáry** – myšlené orientované křivky v prostoru, jejichž směr je v každém bodě určen směrem vektoru el. indukce \mathbf{D}
 - 2 **EL. siločáry** – myšlené orientované křivky v prostoru, jejichž směr je v každém bodě určen směrem vektoru el. intenzity \mathbf{E}
- Hustota těchto čar jdoucích jednotkovou plochou se obvykle volí tak, aby byla úměrná velikosti příslušného vektoru (\mathbf{D} či \mathbf{E}).
- V anizotropním prostředí je $\mathbf{D} \nparallel \mathbf{E}$, a tak se obecně mohou indukční čáry lišit od siločár.

Elektrické pole



Obrázek II.1.5: Znázornění el. indukčních čar či siločár pro samostatné el. náboje a soustavy dvou nábojů se stejnými velikostmi.

Elektrické pole

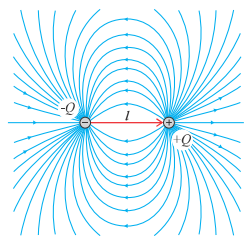
Elektrický dipól

~ soustava kladného a záporného BN o stejných velikostech nábojů

- Pro popis el. dipólu zavádíme **dipólový moment** \mathbf{p} rovnicí

$$\mathbf{p} = Q\mathbf{l}, \quad [\mathbf{p}] = \text{C m}, \quad (\text{II.1.22})$$

kde Q je velikost BN a \mathbf{l} je vzájemný polohový vektor od záporného náboje k náboji kladnému.



Obrázek II.1.6: Vyobrazení el. dipólu s el. indukčními čárami a vzájemným polohovým vektorem \mathbf{l} mezi záporným a kladným BN. Adaptováno z Wikipedie.

Magnetické pole

Magnetické pole

- Bylo objeveno, že existuje další pole (rozkládající se okolo určitých těles – permanentních magnetů), **pole magnetické**, které působí silou na **pohybující se el. náboje**, což nebylo možné vysvětlit v rámci pole elektrického.

Magnetický náboj

- Budeme chtít postupovat stejně jako v případě pole elektrického.
- Zavedeme proto mag. indukční tok rovnicí $\Psi = Q_m$, kde Q_m je magnetický náboj. Podobně pak zavedeme mag. indukci relací $d\Psi = \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$ a budeme požadovat, aby platilo

$$\oint_{S(V)} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = Q_m.$$

Magnetické pole

Neexistence magnetických nábojů

- **Problém!** Přes veškerou snahu se nám zatím nepodařilo experimentálně prokázat, že by se v přírodě magnetické náboje (magnetické monopóly) vůbec vyskytovaly!
- Tento poznatek zahrneme do teorie rovnicí

$$\oint_{S(V)} \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0. \quad (\text{II.1.23})$$

- Slovy: **Mag. indukční tok uzavřenou plochou je vždy nulový.** Význam: **Mag. náboje neexistují.** Tudiž **mag. pole je pole nezřídlové.**
- Tato rovnice je jednou z Maxwellových rovnic.

Magnetické pole

Magnetický indukční tok Φ

- Mag. indukční tok Φ **neuzavřenou** plochou S však může být nenulový, a tak je jeho definice důležitá:

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}, \quad [\Phi] = \text{Wb (weber)} = \text{m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ A}^{-1}. \quad (\text{II.1.24})$$

Vznik magnetického pole

- Bylo zjištěno, že v okolí vodičů, jimiž protéká el. proud, se rozkládá fyzikální pole, které též působí silově na el. náboje. I toto pole působí pouze na el. náboje v pohybu. Jedná se proto o pole magnetické.
- Tudiž: **Příčinou vzniku magnetického pole jsou elektrické proudy.**

Magnetické pole

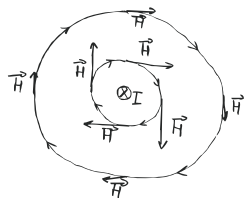
Intenzita magnetického pole H

- K charakterizaci příčiny vzniku mag. pole zavádíme vektor **intenzita magnetického pole** H (též mag. intenzita) vztahem

$$\oint_{c(S)} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_S = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S}, \quad [H] = \text{A m}^{-1}, \quad (\text{II.1.25})$$

kde I_S je el. proud procházející vodičem, který protíná plochu S (viz obrázek).

- Pro vektor H platí princip superpozice, tj. $H = H_1 + H_2$.



Obrázek II.1.7: Magnetické pole vzniklé okolo proudovodiče, kterým prochází el. proud I směrem do nákresny (označeno šípovým pravidlem, tj. symbolem \otimes). Zobrazeny jsou dvě křivky a směry cirkulace vektoru H na nich.

Magnetické pole

Silové účinky magnetického pole

- Experimentálně bylo zjištěno, že síla působící na el. náboj je úměrná velikosti tohoto náboje Q a velikosti jeho rychlosti v , přičemž její směr je dán vektorovou relací

$$\mathbf{F}_m = Q \mathbf{v} \times \mathbf{B}, \quad [B] = \text{T (tesla)} = \text{kg s}^{-2} \text{A}^{-1}, \quad (\text{II.1.26})$$

kde B je mag. indukce.

- Mag. síla má vždy směr kolmý ke směru pohybu el. náboje, tj. má směr normály k jeho dráze, a tak může měnit pouze směr jeho pohybu (nemůže el. náboj urychlovat ani zpomalovat).
- Tudíž: **Magnetické pole nekoná na elektrickém náboji práci.** (Nemění jeho kinetickou energii.)
- Pro vektor B platí též princip superpozice, tj. $B = B_1 + B_2$.

Magnetické pole

Vztah mezi \mathbf{B} a \mathbf{H}

- Jako v případě el. pole i silové účinky pole magnetického závisejí na prostředí. Pokládáme proto

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad [\mu] = \text{H m}^{-1}, \quad (\text{II.1.27})$$

kde μ je tzv. **permeabilita prostředí** a $\text{H} = \text{m}^2 \text{kg C}^{-2}$ je henry, přičemž

$$\mu = \mu_0 \mu_r, \quad (\text{II.1.28})$$

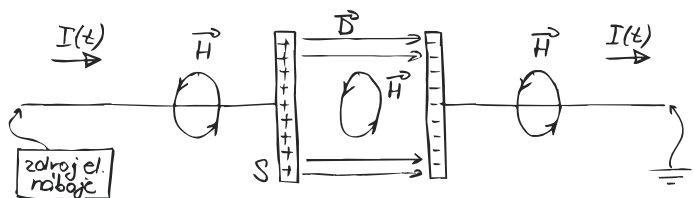
kde $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{H m}^{-1}$ je **permeabilita vakua** a μ_r je **relativní permeabilita prostředí** ($[\mu_r] = 1$).

Magnetické pole

Grafické znázornění magnetického pole

- K znázornění mag. pole využíváme také systému dvou typů křivek:
 - Mag. siločáry** – myšlené orientované křivky v prostoru, jejichž směr je v každém bodě určen směrem vektoru mag. intenzity \mathbf{H}
 - Mag. indukční čáry** – myšlené orientované křivky v prostoru, jejichž směr je v každém bodě určen směrem vektoru mag. indukce \mathbf{B}
- Hustota těchto čar jdoucích jednotkovou plochou se opět volí tak, aby byla úměrná velikosti příslušného vektoru (\mathbf{H} či \mathbf{B}).
- V anizotropním prostředí je $\mathbf{H} \nparallel \mathbf{B}$, a tak se obecně mohou indukční čáry lišit od siločár.
- Orientaci mag. siločáry (mag. indukční čáry) určíme pravidlem pravé ruky: **Uchopíme-li proudovodič do pravé ruky tak, aby palec ukazoval směr el. proudu vodičem procházejícího, pak zbylé prsty ukazují směr mag. siločár (mag. indukčních čar).** (viz obr. II.1.7)

Magnetické pole



Obrázek II.1.8: Připojíme-li zdroj kladného el. náboje na levou část obvodu a zemi na jeho pravou část, projde obvodem (i přes přerušení mezi deskami, kde je vakuum) časově proměnný el. proud $I(t)$. Tento proud vybudí mag. pole jak okolo vodičů, tak i mezi deskami. Musí tak existovat mechanismus, který je schopen „vést el. proud“ i ve vakuu. El. proud $I(t)$ nabíjí levou desku kladným nábojem, který vzápětí způsobí na pravé desce indukci záporného náboje o stejné velikosti. Velikost náboje na deskách je též časově závislá, tj. $Q = Q(t)$. S nábojem na desce je však spojen časově proměnný el. indukční tok $\Psi(t)$. Právě časová změna el. indukčního toku mezi deskami vede ke vzniku mag. pole ve vakuu.

Magnetické pole

Maxwellův proud

- Experimentálně bylo zjištěno, že časová změna el. indukčního toku $d\Psi/dt$ má ve vakuu stejné magnetické účinky jako el. proud v proudovodiči, což je třeba doplnit do rovnice pro vznik mag. pole.
- Použijeme-li (II.1.13), můžeme zavést **Maxwellův proud** vztahem

$$I_M = \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S}. \quad (\text{II.1.29})$$

- Rovnici pro vznik mag. pole (II.1.25) proto rozšíříme o tento člen na tvar

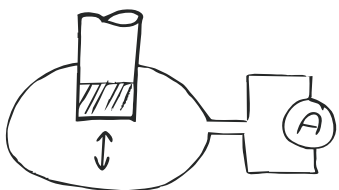
$$\oint_{c(S)} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} + \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S}. \quad (\text{II.1.30})$$

- Tato rovnice je jednou z Maxwellových rovnic.

Magnetické pole

Elektromagnetická indukce

- Experimenty ukázaly, že proměnné mag. pole vytváří v uzavřené vodivé smyčce el. proud. Tento jev byl nazván **elektromagnetická indukce**.
- Proměnné mag. pole způsobuje časovou změnu mag. indukčního toku plochou smyčky, tj. $\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$.
- Aby smyčkou tekla el. proud, musí v ní vzniknout el. pole, viz $\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E}$. Směr \mathbf{E} je podél smyčky stejný, tudíž cirkulace \mathbf{E} bude nenulová, tj. $\oint_{c(S)} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} \neq 0$.



Obrázek II.1.9: Pohyb permanentního magnetu skrz vodivou smyčku způsobuje časovou změnu mag. indukčního toku $\Phi(t)$ plochou smyčky, což vede k indukci el. proudu $I(t)$ tekoucího smyčkou.

Magnetické pole

Elektromagnetická indukce

- Směr el. proudu ve smyčce popisuje Lenzovo pravidlo: **El. proud indukovaný ve smyčce má takový smysl, že tímto proudem buzené mag. pole brání změně mag. indukčního toku, který je příčinou indukovaného proudu.**
- Spojením předchozích poznatků získáme matematické vyjádření elektromagnetické indukce ve tvaru

$$\oint_{c(S)} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}. \quad (\text{II.1.31})$$

- Tato rovnice je jednou z Maxwellových rovnic.
- Rovnice platí i v případě, že mag. pole je neměnné a mění se pouze plocha smyčky S .

Maxwellovy rovnice

Maxwellovy rovnice

- Sem patří rovnice na papíru.

Maxwellovy rovnice

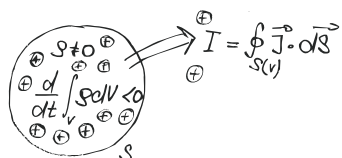
Rovnice kontinuity elektrického proudu

~ matematické vyjádření zákona zachování elektrického náboje.

- Pro objem V uzavřený plochou S rovnice zní

$$\oint_{S(V)} \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = -\frac{d}{dt} \int_V \rho dV. \quad (\text{II.1.32})$$

- Slovy: **El. proud vytékající uzavřenou plochou je roven časovému úbytku el. náboje v objemu uzavřeném touto plochou.**



Obrázek II.1.10: Jelikož platí zákon zachování el. náboje, musí el. proud tekoucí z uzavřeného objemu nutně znamenat časový úbytek hustoty el. náboje v tomto objemu.