Část II.

Elektřina a magnetismus

Sekce 1.

Základní poznatky

A.D. Pajdarová (ZČU)
KFY/FYSV (12/13)

Matematický aparát

Skalární a vektorové pole

- Ve fyzice se často setkáváme s veličinami, které závisejí na poloze bodu v prostoru (navíc mohou a často bývají závislé i na čase). Polohu bodu v prostoru udává polohový vektor $\boldsymbol{r} = x\boldsymbol{i} + y\boldsymbol{j} + z\boldsymbol{k}$.
- Je-li tato fyzikální veličina skalár, říkáme, že jde o ***skalární funkci bodu*** (např. potenciál gravitačního pole $\varphi(\boldsymbol{r}, t)$, hustota tělesa $\rho(\boldsymbol{r}, t)$ atd.). Je-li tato veličina vektor, hovoříme o ***vektorové funkci bodu*** (např. intenzita gravitačního pole $\boldsymbol{K}(\boldsymbol{r}, t)$, tíhové pole $\boldsymbol{g}(\boldsymbol{r}, t)$ atd.). Říkáme též, že v uvažované části prostoru je dáno ***skalární pole***, resp. ***vektorové pole***.
- U vektorové funkce bodu $\boldsymbol{A}(\boldsymbol{r}, t)$ budeme předpokládat, že ji lze zapsat jako součet složek vektoru $\boldsymbol{A}$ (tj. skalárních funkcí bodu) v podobě

$$\boldsymbol{A}(\boldsymbol{r}, t) = A_x(\boldsymbol{r}, t)\,\boldsymbol{i} + A_y(\boldsymbol{r}, t)\,\boldsymbol{j} + A_z(\boldsymbol{r}, t)\,\boldsymbol{k}.$$

Matematický aparát

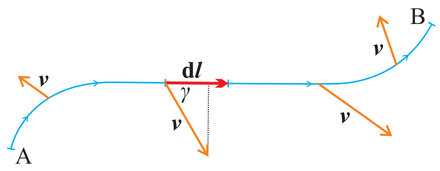
Dráhový účinek vektoru

~ udává, zda vektorové pole $\boldsymbol{v}(\boldsymbol{r})$ 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

$$\boxed{\mathrm{d}\Gamma = \boldsymbol{v} \cdot \mathbf{d}\boldsymbol{l} = v\,\mathrm{d}l\,\cos\gamma,} \tag{II.1.1}$$

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



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

Matematický aparát

Dráhový účinek vektoru

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

$$\boxed{\Gamma = \int_c \mathrm{d}\Gamma = \int_c \boldsymbol{v} \cdot \mathbf{d}\boldsymbol{l}, \qquad [\Gamma] = [v]\,\mathrm{m}.} \tag{II.1.2}$$

• Je-li $\Gamma > 0$, působí vekt. pole $\boldsymbol{v}(\boldsymbol{r})$ spíše ve směru křivky c. Je-li $\Gamma < 0$, působí vekt. pole $\boldsymbol{v}(\boldsymbol{r})$ spíše proti směru křivky c.

• Křivka může být uzavřená (obklopuje pak jistou plochu S) a Γ se pak nazývá ***cirkulace vektoru***. Značí se

$$\boxed{\Gamma = \oint_{c(S)} \boldsymbol{v} \cdot \mathbf{d}\boldsymbol{l}.} \tag{II.1.3}$$

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

Matematický aparát

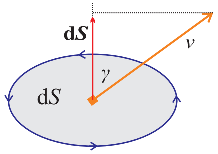
Tok vektoru plochou

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

• Tok vekt. pole $\boldsymbol{v}(\boldsymbol{r})$ plochou bude tím větší, čím větší bude velikost vektoru $\boldsymbol{v}$ 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

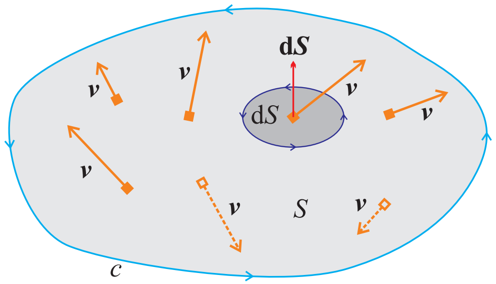
$$\boxed{\mathrm{d}\Phi = \boldsymbol{v}\cdot\mathbf{d}\boldsymbol{S} = v\,\mathrm{d}S\cos\gamma,} \tag{II.1.4}$$

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



Obr. II.1.2: Směr vektoru elementu plochy $\mathbf{d}\boldsymbol{S}$ 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



Obr. II.1.3: Ilustrace k toku vektoru plochou. Plocha S je ohraničena orientovanou křivkou c, značíme $c(S)$. Směr i velikost vektorů vekt. pole $\boldsymbol{v}(\boldsymbol{r})$ 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 $\mathrm{d}S$, na nichž lze pokládat $\boldsymbol{v}(\boldsymbol{r})$ za konstantní. Křivka, která obklopuje element $\mathrm{d}S$, **musí** mít stejnou orientaci jako c (viz stejný směr šipek na křivkách). Celkový tok vekt. pole $\boldsymbol{v}(\boldsymbol{r})$ plochou S pak dostaneme, sečteme-li všechny příspěvky k toku od všech elementů $\mathrm{d}S$ dělících S, tj. „vyintegrujeme“ příspěvky $\mathrm{d}\Phi = \boldsymbol{v}\cdot\mathbf{d}\boldsymbol{S}$ po celé ploše S.

Matematický aparát

Tok vektoru plochou

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

$$\boxed{\Phi = \int_S \mathrm{d}\Phi = \int_S \boldsymbol{v} \cdot \mathbf{d}\boldsymbol{S}, \quad [\Phi] = [v]\,\mathrm{m}^2.} \tag{II.1.5}$$

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

$$\boxed{\Phi = \oint_{S(V)} \boldsymbol{v} \cdot \mathbf{d}\boldsymbol{S}.} \tag{II.1.6}$$

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

Elektrický náboj

Elektrický náboj Q

~ vlastnost základních látkových částic, která je podstatou elektrického a magnetického chování látkových objektů. Jednotka: $[Q] = \mathrm{C}(\mathrm{coulomb}) = \mathrm{A\,s}$, 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 $N \in \mathcal{Z}$. Velikost elem. el. náboje je rovna velikosti el. náboje protonu a elektronu a jeho hodnota je

$$\boxed{e_0 \doteq 1{,}60217653.10^{-19}\,\mathrm{C}.} \tag{II.1.7}$$

Elektrický náboj

Zákon zachování el. náboje

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

$$\boxed{\sum Q_i = \text{konst.}} \tag{II.1.8}$$

Objemová hustota el. náboje ρ

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

$$\boxed{\rho = \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}V}, \quad [\rho] = \mathrm{C\,m^{-3}},} \tag{II.1.9}$$

kde $\mathrm{d}Q$ je el. náboj, který se nachází v elementu prostoru $\mathrm{d}V$ okolo $\boldsymbol{r}$.

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

$$\boxed{I = \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t}, \quad [I] = \mathrm{A}(\text{ampér}),} \tag{II.1.10}$$

kde $\mathrm{d}Q$ je kladný el. náboj, který projde danou plochou za čas $\mathrm{d}t$.

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

Elektrický náboj

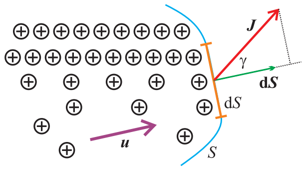
Plošná hustota el. proudu $\boldsymbol{J}$

• Z mikroskopického hlediska se el. proud popisuje ***plošnou hustotou el. proudu*** $\boldsymbol{J}$ definovanou relací

$$\boxed{\mathrm{d}I = \boldsymbol{J}\cdot\mathbf{d}\boldsymbol{S} = J\,\mathrm{d}S\cos\gamma, \quad [J] = \mathrm{A\,m^{-2}}.} \tag{II.1.11}$$

• Pomocí plošné hustoty el. proudu je možné chápat el. proud jako tok vektoru $\boldsymbol{J}$ plochou S, tj.

$$I = \int_S \boldsymbol{J}\cdot\mathbf{d}\boldsymbol{S}. \tag{II.1.12}$$



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

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

$$\boxed{\Psi = Q_\mathrm{c} = \int_V \rho\,\mathrm{d}V, \quad [\Psi] = \mathrm{C},} \tag{II.1.13}$$

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 $\boldsymbol{D}$

- K lokálnímu popisu el. pole slouží veličina ***indukce el. pole*** (také el. indukce) $\boldsymbol{D}$, zavedená vztahem:

$$\boxed{\mathrm{d}\Psi = \boldsymbol{D}\cdot\mathbf{d}\boldsymbol{S} = D\,\mathrm{d}S\cos\gamma, \quad [D] = \mathrm{C\,m^{-2}}.} \tag{II.1.14}$$

- ***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

$$\boxed{\Psi = \oint_{S(V)} \boldsymbol{D}\cdot\mathbf{d}\boldsymbol{S}.} \tag{II.1.15}$$

- Pro el. indukci platí princip superpozice, tj. $\boldsymbol{D} = \boldsymbol{D}_1 + \boldsymbol{D}_2$.

Elektrické pole

Gaussova věta elektrostatiky

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

$$\boxed{\oint_{S(V)} \boldsymbol{D}\cdot\mathbf{d}\boldsymbol{S} = \int_V \rho\,\mathrm{d}V.} \tag{II.1.16}$$

- 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 $\boldsymbol{E}$

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

$$\boxed{\boldsymbol{F}_\mathrm{e} = \boldsymbol{E}\,Q.} \qquad \text{(II.1.17)}$$

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

$$\boxed{\boldsymbol{E} = \frac{\boldsymbol{F}_\mathrm{e}}{Q}, \quad [E] = \mathrm{V\,m^{-1}} = \mathrm{m\,kg\,A^{-1}\,s^{-3}},} \qquad \text{(II.1.18)}$$

kde V je volt.

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

Elektrické pole

Intenzita elektrického pole $\boldsymbol{E}$

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

Vztah mezi $\boldsymbol{D}$ a $\boldsymbol{E}$

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

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

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

$$\boxed{\varepsilon = \varepsilon_0\,\varepsilon_\mathrm{r},} \qquad \text{(II.1.20)}$$

kde $\varepsilon_0 = 8{,}854.10^{-12}\,\mathrm{F\,m^{-1}}$ je ***permitivita vakua*** a ε_r je ***relativní permitivita prostředí*** ($[\varepsilon_\mathrm{r}] = 1$).

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

$$\boxed{\boldsymbol{J} = \gamma \boldsymbol{E}, \quad [\gamma] = \mathrm{S\,m^{-1}},} \tag{II.1.21}$$

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

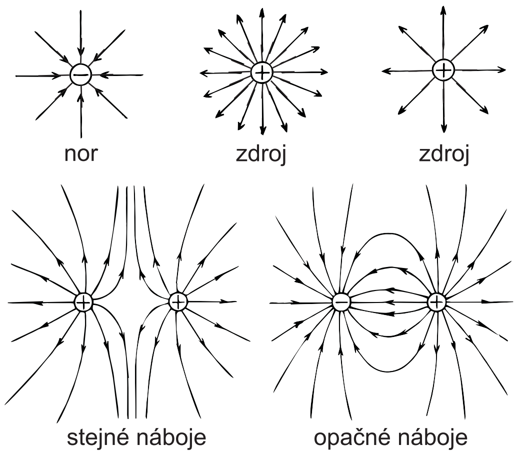
- Dle hodnoty γ rozdělujeme látky na:
  1. ***vodiče*** – γ velké; mají velký počet volných nosičů náboje
  2. ***nevodiče*** – γ malé; mají malý počet volných nosičů náboje; nazývají se též izolanty či dielektrika
  3. ***polovodiče*** – γ střední; mají vlastnosti mezi nevodiči a vodiči
- ***D.Cv.***: Nastudovat mechanismus vedení el. proudu v kovech, plynech, kapalinách a polovodičích.

Elektrické pole

Grafické znázornění el. pole

- ***Bodový náboj (BN)*** – el. nabité 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 $\boldsymbol{D}$
  2. ***El. siločáry*** – myšlené orientované křivky v prostoru, jejichž směr je v každém bodě určen směrem vektoru el. intenzity $\boldsymbol{E}$
- Hustota těchto čar jdoucích jednotkovou plochou se obvykle volí tak, aby byla úměrná velikosti příslušného vektoru ($\boldsymbol{D}$ či $\boldsymbol{E}$).
- V anizotropním prostředí je $\boldsymbol{D} \nparallel \boldsymbol{E}$, a tak se obecně mohou indukční čáry lišit od siločár.

Elektrické pole



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

Elektrické pole

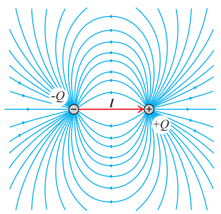
Elektrický dipól

~ soustava kladného a záporného BN o stejných velikostech nábojů

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

$$\boxed{\boldsymbol{p} = Q\boldsymbol{l}, \quad [p] = \mathrm{C\,m},} \tag{II.1.22}$$

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



Obr. II.1.6: Vyobrazení el. dipólu s el. indukčními čárami a vzájemným polohovým vektorem $\boldsymbol{l}$ 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 $\Psi = Q_\mathrm{m}$, kde Q_m je magnetický náboj. Podobně pak zavedeme mag. indukci relací $\mathrm{d}\Psi = \boldsymbol{B} \cdot \mathbf{d}\boldsymbol{S}$ a budeme požadovat, aby platilo

$$\oint_{S(V)} \boldsymbol{B} \cdot \mathbf{d}\boldsymbol{S} = Q_\mathrm{m}.$$

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

$$\boxed{\oint_{S(V)} \boldsymbol{B} \cdot \mathbf{d}\boldsymbol{S} = 0.} \tag{II.1.23}$$

- Slovy: ***Mag. indukční tok uzavřenou plochou je vždy nulový.*** Význam: ***Mag. náboje neexistují.*** Tudíž ***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:

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

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.
- Tudíž: ***Příčinou vzniku magnetického pole jsou elektrické proudy.***

Magnetické pole

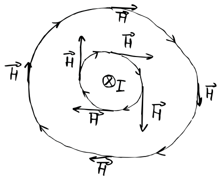
Intenzita magnetického pole $\boldsymbol{H}$

- K charakterizaci příčiny vzniku mag. pole zavádíme vektor ***intenzita magnetického pole*** $\boldsymbol{H}$ (též mag. intenzita) vztahem

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

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

- Pro vektor $\boldsymbol{H}$ platí princip superpozice, tj. $\boldsymbol{H} = \boldsymbol{H}_1 + \boldsymbol{H}_2$.



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

$$\boxed{\boldsymbol{F}_{\mathrm{m}} = Q\,\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}, \quad [B] = \mathrm{T(tesla)} = \mathrm{kg\,s^{-2}\,A^{-1}},} \tag{II.1.26}$$

kde $\boldsymbol{B}$ 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 $\boldsymbol{B}$ platí též princip superpozice, tj. $\boldsymbol{B} = \boldsymbol{B}_1 + \boldsymbol{B}_2$.

Magnetické pole

Vztah mezi $\boldsymbol{B}$ a $\boldsymbol{H}$

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

$$\boxed{\boldsymbol{B} = \mu\,\boldsymbol{H}, \quad [\mu] = \mathrm{H\,m^{-1}},} \tag{II.1.27}$$

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

$$\boxed{\mu = \mu_0\,\mu_{\mathrm{r}},} \tag{II.1.28}$$

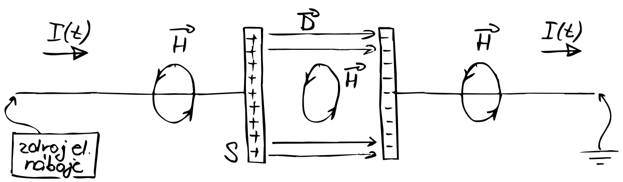
kde $\mu_0 = 4\pi.10^{-7}\,\mathrm{H\,m^{-1}}$ je ***permeabilita vakua*** a μ_{r} je ***relativní permeabilita prostředí*** ($[\mu_{\mathrm{r}}] = 1$).

Magnetické pole

Grafické znázornění magnetického pole

- K znázornění mag. pole využíváme také systému dvou typů křivek:
  1. ***Mag. siločáry*** – myšlené orientované křivky v prostoru, jejichž směr je v každém bodě určen směrem vektoru mag. intenzity $\boldsymbol{H}$
  2. ***Mag. indukční čáry*** – myšlené orientované křivky v prostoru, jejichž směr je v každém bodě určen směrem vektoru mag. indukce $\boldsymbol{B}$
- Hustota těchto čar jdoucích jednotkovou plochou se opět volí tak, aby byla úměrná velikosti příslušného vektoru ($\boldsymbol{H}$ či $\boldsymbol{B}$).
- V anizotropním prostředí je $\boldsymbol{H} \not\upuparrows \boldsymbol{B}$, 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



Obr. II.1.8: Připojíme-li zdroj kladného el. náboje na levou část obvodu a zem 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 $\mathrm{d}\Psi/\mathrm{d}t$ 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

$$\boxed{I_\mathrm{M} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_S \boldsymbol{D}\cdot\mathbf{d}\boldsymbol{S}.} \qquad \text{(II.1.29)}$$

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

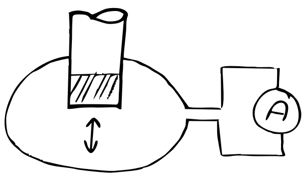
$$\boxed{\oint_{c(S)} \boldsymbol{H}\cdot\mathbf{d}\boldsymbol{l} = \int_S \boldsymbol{J}\cdot\mathbf{d}\boldsymbol{S} + \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_S \boldsymbol{D}\cdot\mathbf{d}\boldsymbol{S}.} \qquad \text{(II.1.30)}$$

- 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. $\Phi = \int_S \boldsymbol{B}\cdot\mathbf{d}\boldsymbol{S}$.
- Aby smyčkou tekl el. proud, musí v ní vzniknou el. pole, viz $\boldsymbol{J} = \gamma\boldsymbol{E}$. Směr $\boldsymbol{E}$ je podél smyčky stejný, tudíž cirkulace $\boldsymbol{E}$ bude nenulová, tj. $\oint_{c(S)} \boldsymbol{E}\cdot\mathbf{d}\boldsymbol{l} \neq 0$.



Obr. 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

$$\boxed{\oint_{c(S)} \boldsymbol{E} \cdot \mathbf{d}\boldsymbol{l} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \int_S \boldsymbol{B} \cdot \mathbf{d}\boldsymbol{S}.} \qquad \text{(II.1.31)}$$

- 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

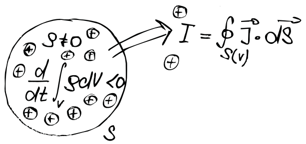
Rovnice kontinuity elektrického proudu

~ matematické vyjádření zákona zachování elektrického náboje.

- Pro objem V uzavřený plochou S rovnice zní

$$\boxed{\oint_{S(V)} \boldsymbol{J} \cdot \mathbf{d}\boldsymbol{S} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \int_V \rho \, \mathrm{d}V.} \qquad \text{(II.1.32)}$$

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



Obr. 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.