

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Oldřich Lepil

K výkladu teorie elektromagnetického pole na střeni škole

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 19 (1974), No. 2, 102--110

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/139232>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1974

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

prostředky maticové algebry. Ačkoli se na první pohled zdají některé pojmy i použitý aparát příliš komplikované, není tomu tak; jestliže ilustrujeme postup numerickými příklady (kódy o malém počtu slov), lze jistě principy kódování a dekódování vyložit srozumitelně na úrovni I. cyklu, principy detegování a korigování na úrovni II. cyklu.

Závěrem můžeme slíbit, že se pokusíme publikovat volné zpracování nejzávažnějších statí, o nichž jsme se zmínili v přehledu pěti sešitů Nica; domníváme se, že to budou dobré studijní materiály pro učitele i pro modernizační pokusy.

K výkladu teorie elektromagnetického pole na střední škole

Oldřich Lepil, Olomouc

Jedním ze základních vzdělávacích úkolů vyučování elektřiny na střední škole je postupné vytváření představ o elektromagnetickém poli od nejjednoduššího případu statického elektrického pole nábojů v klidu, až k obecnému případu nestacionárního elektromagnetického pole v prostředí bez elektrických nábojů. Didaktickým problémem je, jak včlenit do učiva středoškolské fyziky Maxwellovu teorii elektromagnetického pole s cílem dovršit tak soustavu poznatků z elektřiny. Úvahy obsažené v tomto článku předkládáme jako diskusní příspěvek k tomuto problému.

1. Teorie elektromagnetického pole ve středoškolských učebnicích fyziky

Rozbor osnov fyziky pro střední školu a jejich vývoje [1] ukazuje, že poznatky o elektromagnetickém poli se vesměs vytvářejí ve spojitosti s výkladem tématu *Elektromagnetické kmitání a vlnění*. Přitom se však jen málo uplatňují souvislosti s ostatními tématy učiva elektřiny, takže se pojem nestacionárního elektromagnetického pole buduje izolovaně, vcelku nezávisle na poznacích o ostatních speciálních formách elektromagnetického pole. Přitom je nesporné, že jedině uplatněním těchto souvislostí lze na střední škole dospět k tak široce založenému pojmu elektromagnetického pole, aby žák pochopil, že dříve poznané jevy ve statickém, stacionárním, popř. kvazistacionárním elektrickém nebo magnetickém poli jsou jen zvláštními případy jevů v obecném poli elektromagnetickém.

Ve většině středoškolských učebnic se však tento problém uspokojivě neřeší, popř. se ani neklade, a pojetí tématu elektromagnetické kmity a vlnění je zaměřeno převážně na výklad principů radiotechniky. Tento stav ovlivňuje také skutečnost, že výklad teorie elektromagnetického pole je náročný a nejsou k dispozici jednoduché metodické postupy výkladu. Hluboce založený výklad o elektromagnetickém poli vyžaduje užití kvantitativních, matematicky formulovaných vztahů, které nelze snadno upravit do tvaru vhodného pro žáky střední školy. Proto se ve většině středoškolských učebnic výklad řeší jen na kvalitativním základě a pokusy o kvantitativní zvládnutí Maxwellovy teorie elektromagnetického pole na střední škole jsou z hlediska metodického málo uspokojivé.

Společným nedostatkem všech pokusů o zpracování teorie elektromagnetického

pole ve středoškolských učebnicích je malá propracovanost experimentální stránky výkladu. To způsobuje, že většina postupů má ráz teoretických dedukcí, pro něž žák nemá dostatek názorných představ, nebo základní teoretické poznatky se sdělují jen ve formě pouček k zapamatování.

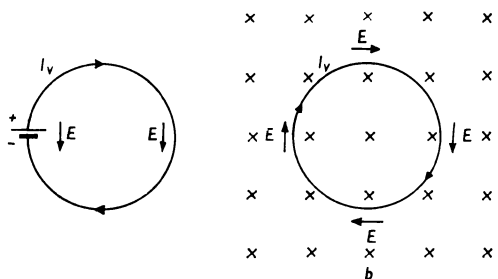
Cíle výkladu teorie elektromagnetického pole, kterým je přiměřené kvantitativní vyjádření Maxwellových rovnic a z nich plynoucí slovní formulace vzájemného vztahu mezi elektrickým a magnetickým polem, je třeba dosáhnout prostřednictvím úvodních experimentů. Současně je třeba zachovat v metodice výkladu teoretické úvahy a „myšlenkové pokusy“, které dávají cenné možnosti pro rozvíjení fyzikálního myšlení žáků. Takto je také pojat výklad v některých moderně zpracovaných učebnicích zahraničních (např. [2], [3]).

2. Děje v elektromagnetickém poli

Aby bylo možné zobecnit poznatky o dějích v elektromagnetickém poli, je především nutné vymezit rozdíly mezi elektrickým polem *zřídlovým* (potenciálovým) a *vírovým*. Tuto klasifikaci silových polí považuje PROKOFEV ([4]) za počáteční krok celého výkladu teorie elektromagnetického pole. V učebnici [2] je toto rozlišení provedeno již při výkladu elektromagnetické indukce a vyjádření vírového rázu polí buzených proměnným polem elektrickým, popř. magnetickým zpracovávají i jiní autoři (např. ZVORYKIN v [5]).

Při vytváření pojmu zřídlového a vírového pole lze vyjít ze zjednodušené, modelové představy proudu v obvodu tvořeném vodivým kroužkem a pomocí úvah o způsobech, jakými vytvoříme v kroužku proud, můžeme shrnout základní poznatky o zřídlovém a vírovém elektrickém poli.

Jestliže do obvodu zařadíme zdroj napětí (obr. 1a), je elektrické pole ve vodiči tvořeno náboji na pólech zdroje a intenzita elektrického pole v obvodu je orientována opačně než intenzita elektrického pole uvnitř zdroje napětí. Jestliže přemísťujeme jednotkový elektrický náboj podél celého obvodu, pak ve vnější části obvodu se vykoná působením sil elektrického pole práce kladná a uvnitř zdroje stejně veliká práce záporná, takže celková práce po uzavřené dráze v elektrickém poli tvořeném náboji (zdrojem EMN) je nulová. Tímto způsobem vytváříme představu pole zřídlového, které charakterizujeme siločarami, které vycházejí z náboje kladného a směřují k náboji zápornému.



Obr. 1a.

Obr. 1b.

Vlastnostem zřídlového pole se v učivu elektřiny věnuje větší pozornost než poznatkům o poli vírovém. Proto je třeba konkretizovat představy žáků o vírovém poli reálnými experimenty s vysokofrekvenčním polem např. smyčkového zářiče. Základní pomůckou při těchto pokusech je absorpční kroužek, který je sice běžnou pomůckou pro indikaci vysokofrekvenčních kmitů elektronkových oscilátorů, ale k výkladu pojmu vírové pole se nevyužívá. Experimenty jsou popsány v publikaci [6] (str. 208 ad.).

Absorpční kroužek je uzavřený kruhový vodič o poloměru r , který při demonstraci

vkládáme do magnetického pole smyčkového zářiče s rychle se měnící magnetickou indukci (obr. 1b), takže se v kroužku indukuje napětí

$$U = -\Delta\Phi/\Delta t$$

a vzniká elektrické pole, jehož intenzita E je určena podílem napětí U a délky l siločáry elektrického pole (obvod kroužku)

$$(1) \quad E = U/l = U/2\pi r = \\ = -1/2\pi r \Delta\Phi/\Delta t.$$

Intenzita elektrického pole má ve všech částech kroužku stejnou velikost a podél celého kroužku je orientována ve stejném smyslu. Projde-li tedy jednotkový elektrický náboj podél celého obvodu, získá energii $2\pi rE$, která odpovídá indukovanému napětí. Je také zřejmé, že siločáry indukovaného elektrického pole jsou uzavřené křivky. Jestliže se poloměr kroužku zvětší, vyplývá ze vztahu (1), že za stejných podmínek se intenzita indukovaného elektrického pole zmenší. To umožňuje srovnání s mechanickou analogií – vodním vírem, v němž se částice blíže středu víru pohybují větší rychlostí. Takto lze na střední škole dospět k představě vírového elektrického pole.

Dalším problémem výkladu je aplikace představy o indukovaném vírovém poli ve vodiči s volnými nosiči náboje na prostředí bez volných nosičů náboje. Vycházíme z modelové představy vodivého kroužku přerušeného kondenzátorem a hledáme odpověď na otázku, jaký proud tímto obvodem prochází, jestliže je v obvodu elektrické pole zřídlové nebo vírové.

V prvním případě (obr. 2a) se kondenzátor nabije nábojem Q a nastane ustálený stav, kdy vodivý proud $I_v = \Delta Q/\Delta t$ v obvodu je nulový, což potvrdí žárovka připojená do obvodu. Mezi deskami konden-

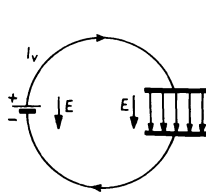
zátoru je elektrické pole konstantní intenzity

$$E = U/d = Q/Cd = Q/\epsilon S.$$

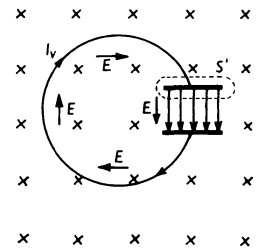
Jestliže z učiva o elektrickém poli je žákům znám pojem elektrického intenzitního toku $N = ES$, pak za předpokladu, že v kondenzátoru procházejí všechny siločáry prostorem mezi deskami o obsahu S , je celkový intenzitní tok uzavřenou plochou S' obklopující desku kondenzátoru s nábojem Q určen vztahem

$$(2) \quad N = ES = Q/\epsilon,$$

což je vlastně elementární vyjádření Gaussovy věty.



Obr. 2a.



Obr. 2b.

Uvažujme dále, že kroužek s kondenzátorem je v proměnném magnetickém poli (obr. 2b) smyčkového zářiče. Při reálné demonstraci žáci pozorují, že i v tomto případě žárovka připojená do obvodu kroužku svítí stejně jako v kroužku bez kondenzátoru. Odtud vyplývá, že obvod můžeme považovat za uzavřený; v obvodu se indukuje napětí, které vytváří ve vodivé části kroužku opět proud I_v . Současně se mění náboj desek kondenzátoru a mezi nimi vzniká proměnné elektrické pole.

Těmito zjednodušenými představami jsou vytvořeny předpoklady pro řešení nejzávažnějšího problému metodiky výkladu teorie elektromagnetického pole na střední škole – vytvoření pojmu *Maxwellův* (posuvný) *proud*.

3. Maxwellův proud

Termín posuvný proud, zvolený Maxwellem pro veličinu

$$I_p = S \partial D / \partial t$$

(S je obsah desky a D je velikost vektoru elektrické indukce), vychází z představy posunutí vázaných nábojů v dielektriku, které je souhlasně orientováno s vektorem elektrické indukce pole. To je však představa pro středoškolskou výuku nevýhodná, poněvadž všechny úvahy se prakticky omezují na vakuum, nebo se jev posunutí vázaných nábojů neuvažuje. Proto pokládáme za vhodnější termín Maxwellův proud, používaný v učebnici [7] i v jiných publikacích.

Při vyvození pojmu Maxwellův proud vycházíme z Maxwellova předpokladu, že změny elektrického intenzitního toku můžeme považovat za pokračování proudu ve vodivé části obvodu. Jestliže vodivý proud vyjádříme vztahem

$$I_v = \Delta Q / \Delta t,$$

pak jeho pokračování v části obvodu bez volných nosičů náboje je proud Maxwellův I_M , pro který platí vzhledem k rovnici (2) vztah

$$(3) \quad I_M = \Delta Q / \Delta t = \varepsilon \Delta N / \Delta t.$$

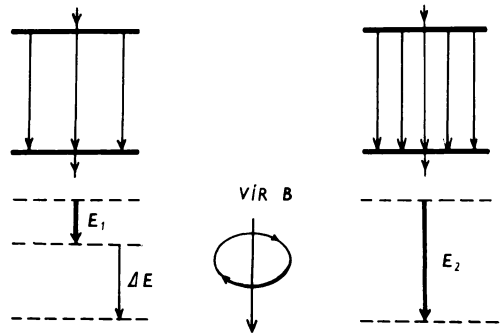
Při výkladu tohoto pojmu zdůrazníme, že Maxwellův proud je fyzikální abstrakcí, která umožňuje sjednocení pohledu na děje v elektromagnetickém poli jak v prostředí s nosiči elektrického náboje, tak v prostředí bez nábojů. Cílem výkladu je závěr, že vírové pole vytváří v libovolném prostředí uzavřené proudy: v prostředí s volnými nosiči náboje proud vodivý a v prostředí bez nábojů proud Maxwellův.

Pojem Maxwellova proudu objasňujeme rozborem případů statického, stacionár-

ního a nestacionárního elektrického pole v obvodu s kondenzátorem. Především je třeba, aby žák pochopil, že Maxwellův proud je nulový vždy, nemění-li se intenzita elektrického pole, ačkoliv současně $I_v \neq 0$. Tedy nejen v případě statického elektrického pole (kdy je mezi deskami kondenzátorů stálý rozdíl potenciálů), ale i v případě pole vytvářeného zdrojem stálého potenciálního rozdílu, např. ve vodiči. To je významné pro představy o rozdílu mezi statickým a stacionárním elektrickým polem.

Nabíjení kondenzátoru můžeme interpretovat jako děj v uzavřeném obvodu, jehož jednu část tvoří vodič (s volnými nosiči náboje) a druhou dielektrikum (bez volných nosičů náboje). Pro každou část obvodu je charakteristický jiný druh proudu: pro první proud vodivý a pro druhou proud Maxwellův.

Maxwellův proud I_M je veličina skalární. Směr proudu I_M má stejný význam jako směr vodivého proudu I_v v obvodu. Je určen orientací vektoru změny intenzity elektrického pole ΔE (obr. 3). Jestliže interpretu-



Obr. 3.

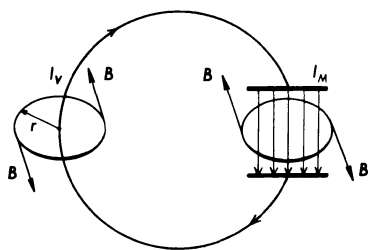
jeme nabíjení kondenzátoru jako děj v uzavřeném obvodu, má Maxwellův proud v tomto obvodu stejný směr jako proud vodivý. Tím jsou vytvořeny předpoklady pro vyslovení rovnice kontinuity.

4. Vztah mezi elektrickým a magnetickým polem

Jádrem výkladu teorie elektromagnetického pole na střední škole je formulace hlavních Maxwellových rovnic, jejich slovní vyjádření a rozbor. Většina poznatků zahrnutých v těchto rovnicích je žákům známa z ostatních témat učiva elektřiny. Proto se v tématu Elektromagnetické kmity a vlnění zaměřujeme zejména na vyvození vztahu mezi proměnným elektrickým a magnetickým polem.

Jedna stránka vztahu mezi oběma poli – *Faradayův jev indukce elektrického pole změnami pole magnetického* – je žákům známa z výkladu elektromagnetické indukce. Druhou stránku tohoto vztahu – *Maxwellův jev indukce magnetického pole změnami pole elektrického* – vyložíme v logické návaznosti na zavedený pojem Maxwellova proudu.

Stěžejním momentem výkladu je sdělení předpokladu, který učinil Maxwell, že totiž proud Maxwellův budí magnetické pole stejně jako proud vodivý. I když nemůže podat přímé experimentální potvrzení tohoto předpokladu, lze využít analýzy po-



Obr. 4.

kusů s vodivým kroužkem přerušeným deskovým kondenzátorem ve vysokofrekvenčním poli.

Proud I_v ve vodivé části kroužku (obr. 4) budí magnetické pole. Velikost magnetické

indukce ve vzdálenosti r od vodiče je

$$(4) \quad B = \mu/2\pi r \cdot I_v .$$

Jestliže Maxwellovu proud I_M přisoudíme obdobné indukční účinky, je velikost magnetické indukce jím vzbuzeného magnetického pole

$$(5) \quad B = \mu/2\pi r \cdot I_M = \epsilon\mu/2\pi r \cdot \Delta N/\Delta t .$$

Rovnice (4) platí pro případ, že magnetické pole vytváří jen vodivý proud a rovnice (5) platí opět pro případ, že magnetické pole vytváří jen proud Maxwellův. Jestliže však současně existuje i proměnné elektrické pole i vodivý proud, je velikost magnetické indukce výsledného pole

$$(6) \quad B = \mu/2\pi r \cdot (I_v + I_M) = \\ = \mu/2\pi r \cdot (I_v + \epsilon \cdot \Delta N/\Delta t) .$$

Rovnice (6), která je vlastně elementárním vyjádřením první Maxwellovy rovnice, je kvantitativním základem pro vytvoření představ o symetrii změn elektrického a magnetického pole. Jestliže na řadě příkladů magnetických polí, s nimiž se žák seznámil v předcházejícím výkladu, ukážeme, že indukční čáry magnetického pole jsou vždy křivky uzavřené, jsou připraveny všechny základní poznatky pro zobecnění teorie elektromagnetického pole a formulaci Maxwellových rovnic.

5. Maxwellovy rovnice v elementárním tvaru

Východiskem pro elementární vyjádření Maxwellových rovnic je jejich integrální tvar

$$(7) \quad \oint_c \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_s \left(\mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{S} ;$$

$$(8) \quad \oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S};$$

$$\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = B 4\pi r^2.$$

$$(9) \quad \oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \int_V \rho dV;$$

$$(10) \quad \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0.$$

Poněvadž i v elementárním tvaru je teorie elektromagnetického pole pro žáky značně náročná, je třeba formulovat Maxwellovy rovnice tak, aby jejich tvar byl co nejbližší vztahům, které žáci znají z předcházejícího učiva. Proto je nutná řada zjednodušení jednak matematických, jednak fyzikálních.

Rovnice (7) a (8) zjednodušíme, jestliže nahradíme křivkový integrál vektoru \mathbf{H} , resp. \mathbf{E} po libovolné uzavřené křivce C zvláštním případem integrálu po kružnici o poloměru r a vektory \mathbf{H} a \mathbf{E} nahradíme tečnými složkami, které označíme H a E , takže bude

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = H 2\pi r$$

a

$$\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = E 2\pi r.$$

Přitom je ovšem důležité, stejně jako u všech dalších matematických zjednodušení, abychom zdůraznili fyzikální význam každého upraveného výrazu, jak bude dále uvedeno.

Podobně zjednodušíme rovnice (9) a (10), jestliže nahradíme plošný integrál po libovolné uzavřené ploše S zvláštním případem integrálu po kulové ploše o poloměru r a vektory \mathbf{D} a \mathbf{B} nahradíme jejich normálními složkami D a H .

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = D 4\pi r^2,$$

Z toho vyplývá zjednodušení pro pravé strany rovnic (7) a (8). Parciální derivace vektorů \mathbf{D} a \mathbf{B} se nahradí podílem konečných změn těchto veličin a příslušného času. Poněvadž v konečné formulaci těchto rovnic nahradíme ještě plošné integrály tokem vektorů \mathbf{j} , \mathbf{D} , \mathbf{B} plochou S ve směru normály, můžeme psát časové změny vektorů \mathbf{D} a \mathbf{B} jako časové změny toků Ψ a Φ , což jsou ovšem veličiny skalární. Součin $\mathbf{l} \cdot \mathbf{S}$ je vodivý proud I_v . Maxwellovy rovnice ve zvláštním případě nabudou tvaru

$$H 2\pi r = I_v + \Delta\Psi/\Delta t;$$

$$E 2\pi r = -\Delta\Phi/\Delta t;$$

$$D 4\pi r^2 = Q;$$

$$B 4\pi r^2 = 0.$$

Podstatně náročnější než úprava matematická je fyzikální interpretace rovnic. Z hlediska fyzikálního je třeba nejprve provést úpravu, která se týká počtu fyzikálních veličin použitých k vyjádření Maxwellových rovnic. Poněvadž se na střední škole zavádí pro popis elektrického, resp. magnetického pole vždy jen jedna fyzikální veličina (E a B), upravíme rovnice použitím vztahů $D = \epsilon E$ a $B = \mu H$ a dospějeme ke konečnému zápisu Maxwellových rovnic v elementárním tvaru:

$$(11) \quad B 2\pi r/\mu = I_v + \epsilon \cdot \Delta N/\Delta t;$$

$$(12) \quad E 2\pi r = -\Delta\Phi/\Delta t;$$

$$(13) \quad E 4\pi r^2 = Q/\epsilon;$$

$$(14) \quad B 4\pi r^2 = 0.$$

Z hlediska metodiky výkladu je náročná fyzikální interpretace rovnice (11), jejíž levá strana má význam magnetomotorického napětí. Nedomníváme se však, že by

bylo vhodné zavést tento pojem i na střední škole. ZVORYKIN ([5]) zavádí pro tuto veličinu označení „víř (cirkuljacija) intenzity magnetického pole podél uzavřeného obvodu obepínajícího proud“. Podobnou veličinu zavádí OREAR ([3]) ve tvaru součiny $B \cdot L$ (L je délka obvodu); nezavádí však ani označení, ani termín naznačující vírový ráz této veličiny. Naopak v učebnici [2] není tato veličina nijak kvantitativně formulována, avšak je použito označení (víř B), resp. (víř E) při interpretaci vztahu (12). Ze všech postupů interpretace vírového rázu indukovaného magnetického pole je však patrný didaktický význam grafického znázornění vírového pole kruhovými indukčními čarami.

Proto při vyučování klademe důraz na vektorové vyjádření změny intenzity elektrického pole a použití Ampérova pravidla pro nalezení orientace víru indukovaného magnetického pole. Poněvadž jsme Maxwellův proud vyjádřili pomocí změn intenzitního toku, což je veličina skalární (v učebnici [2] však je v této souvislosti označována jako vektor), najdeme orientaci víru indukovaného magnetického pole pomocí pravidla pravé ruky.

Metodický postup, jímž na střední škole dospíváme k rovnici (11), je vlastně totožný s postupem při vyvození vztahu (6), z něhož dostaneme rovnici (11) jednoduchou úpravou. Je také třeba uvážit, že vztah (6) je pro objasnění obsahu první Maxwellovy rovnice vhodnější a plyne z něho slovní formulace obsahu rovnice vyjádřená v učebnici [8] větou: *Při každé změně elektrického pole vzniká pole magnetické, jehož uzavřené indukční čáry jsou kolmé na směr měnícího se elektrického pole.*

Naopak pro interpretaci druhé Maxwellovy rovnice lépe vyhovuje tvar rovnice (12), který srovnáme se vztahem vyjadřující

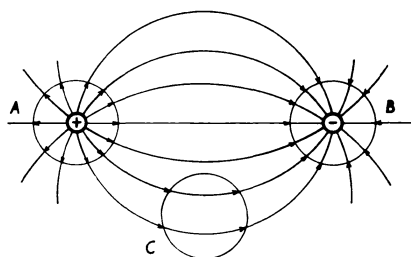
cím zákon elektromagnetické indukce. To umožňuje také objasnit význam součiny $E 2\pi r$ jako elektromotorické napětí.

Důležitým momentem výkladu rovnice (12) je vytvoření představy, že siločáry elektrického pole jsou v obecném případě uzavřené křivky, neboť v celé předcházející nauce o elektřině se žáci setkávali jen s případy elektrických polí zřídlových tvořených náboji. Jde tedy o další zobecnění úvah, jimiž byl vytvořen pojem vírového pole.

Rovnice (12) platí pro případ, že v obvodu existuje jen pole vírové. V obvodu však může současně existovat pole vírové i pole zřídlové. V tom případě je třeba přičíst na pravé straně rovnice (12) napětí \mathcal{E} vytvářející toto pole. Analogicky k rovnici (6) dostáváme pak rovnici

$$(15) \quad \mathcal{E}_0 = E 2\pi r = -\Delta\Phi/\Delta t + \mathcal{E}.$$

Již z rovnice (12) a ještě lépe z rovnice (15) vyplývají některé závěry, které využijeme pro objasnění rovnice (13), známé žákům z elektrostatiky jako Gaussova věta. Při výkladu se zaměříme na představu toku siločar uzavřenou plochou, kterou vytvoříme analýzou případů naznačených na obr. 5. Případy A a B jsou žákům známy



Obr. 5.

z elektrostatiky, kde se úvahou o náboji Q obklopeném kulovou plochou o poloměru r odvozuje Gaussova věta. Jestliže myšlenou koulí umístíme v části pole bez ná-

bojů (případ C), je počet siločar, které do plochy vstupují, roven počtu siločar, jež z ní vystupují, a celkový intenzitní tok uzavřenou plochou je nulový.

Obdobnou úvahou pro magnetické pole solenoidu (obr. 6) dospějeme k závěru, že tok indukčních čar magnetického pole uzavřenou plochou je vždy roven nule. To znamená, že neexistuje magnetické množství analogické náboji v elektrickém poli.

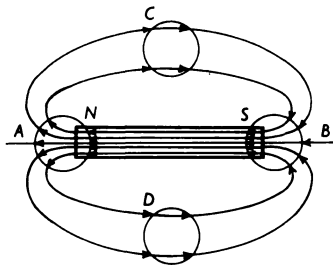
Z didaktických důvodů je pro výuku na střední škole vhodné, aby pro každou z rovnic byl nalezen název a stručná slovní formulace jejího obsahu:

1. Zákon celkového proudu (*zákon Maxwellův*)

Celkový proud ohraničený uzavřenou křivkou je roven součtu proudu vodivého a proudu Maxwellova; proud Maxwellův vzniká jen v proměnném elektrickém poli. Při každé změně elektrického pole vzniká pole magnetické, jehož vektor magnetické indukce \mathbf{B} je kolmý k vektoru intenzity \mathbf{E} měnícího se elektrického pole.

2. Zákon celkového napětí (*zákon Faradayův*)

Celkové napětí podél uzavřené křivky je rovno součtu indukovaného elektro-



Obr. 6.

motorického napětí a EMN zdroje; indukované elektromotorické napětí vzniká jen v proměnném magnetickém poli. Při každé změně magnetického pole vzniká pro-

měnné pole elektrické, jehož vektor intenzity \mathbf{E} je v každém místě kolmý k vektoru magnetické indukce \mathbf{B} měnícího se magnetického pole.

3. Věta o elektrickém intenzitním toku (*věta Gaussova*)

Elektrický intenzitní tok uzavřenou plochou je přímo úměrný náboji uzavřenému uvnitř plochy. To znamená, že siločáry elektrického pole jsou neuzavřené křivky jen v poli tvořeném náboji.

4. Věta o magnetickém indukčním toku

Magnetický indukční tok, který vystupuje z uzavřené plochy, je vždy stejně veliký jako indukční tok, který do uzavřené plochy vstupuje; celkový magnetický indukční tok uzavřenou plochou je roven nule. To znamená, že indukční čáry magnetického pole jsou vždy křivky uzavřené.

Tyto základní poznatky Maxwellovy teorie elektromagnetického pole umožňují, aby všechny případy probíraných polí (statické, stacionární, kvazistacionární, nestacionární) v učivu elektřiny byly postaveny na společný základ. Takto lze ukázat, že všechny tyto druhy polí jsou jen speciálními případy obecného pole elektromagnetického. Ukážeme, že v prostředí bez nábojů může existovat elektromagnetické pole jen tehdy, mění-li se v čase pole elektrické i pole magnetické a podmiňují-li se tyto změny navzájem. Tím se vytváří logický přechod k učivu o elektromagnetickém vlnění.

Zdůrazníme také rozdíl mezi jevem elektromagnetické indukce a jevem indukce magnetického pole změnami pole elektrického. Zatímco jev elektromagnetické indukce je snadno pozorovatelný i při pomalých změnách magnetického pole, lze pozorovat jev obrácený velmi obtížně. To je dáno tím, že Maxwellův proud dosahuje

dostatečných hodnot teprve při velmi rychlých změnách, tzn. při vysokém kmitočtu proudu v elektrických obvodech. Pro metodiku výkladu tohoto jevu to znamená, že jej můžeme demonstrovat jen pokusy s vysokofrekvenčním oscilátorem.

I když teorie elektromagnetického pole patří k obtížným částem učiva fyziky na střední škole, je třeba uvážit její dovršující význam pro celkovou výstavbu učiva elektřiny. Cílevědomou přípravou žáků v ostatních částech učiva lze dosáhnout správného a úplného pochopení této teorie.

Literatura

- [1] VAŠEK, L., *Příspěvek k hodnocení vývoje učebních osnov fyziky na našich středních školách*; habilitační spis, PVUP Olomouc 1965.
- [2] *Physics, Physical Science Study Committee*, (KILLIAN, J. R. ...), D. C. Heath and Co. Boston 1960; ruský překlad Nauka Moskva 1965.
- [3] OREAR, J., *Fundamental Physics*, J. Wiley New York 1961; ruský překlad Mir Moskva 1964.
- [4] PROKOFEV, S. N., *Izvěstija APN RSFSR*, vyp. 141, 1965, s. 111.
- [5] *Metodika předpřipravování fyziky v střední škole*, tom III., (REZNIKOV, L. I. ...), Izd. APN RSFSR Moskva 1961.
- [6] LEPIL, O., *Elektronika ve škole*, SPN Praha 1972.
- [7] HAVELKA, B., *Teorie elektromagnetického pole*, SPN Praha 1965.
- [8] *Fyzika pro III. ročník střední všeobecně vzdělávací školy*, (FUKA, J. ...), 1. vydání, SPN Praha 1965.

Matematická^{meta} olympiáda

Milí čtenáři,

druhý ročník metaolympiády „zabral“ ještě méně než první. Buď se Vám úlohy zdají příliš těžké, nebo se Vám zdají nevhodné jako podklad pro metodické zpracování. Přesto se však nevzdáváme: s vyhodnocením druhého ročníku (úloha 13 až 24) počkáme ještě, zda se nějaká řešení nesejdou dodatečně. Třetí ročník (úlohy 25 až 36) dokončíme, provedeme však ještě pokus se změnou koncepce metaolympiády. V druhé čtveřici úloh (29 až 32), jejichž texty otiskujeme v tomto čísle, jsou dvě úlohy (29 a 30) běžné olympiádní úlohy, naproti tomu úlohy 31 a 32 jsou vysloveně metodického rázu. Jsme opravdu zvědaví, jak na ně budete reagovat. Nepředstavujeme si, že nám pošlete dlouhé elaboráty; řešení úlohy 31 by mělo mít asi formu písemné přípravy na vyučovací hodinu, mělo by zachycovat zejména příklady motivační, ilustrační a analýzu ústředního pojmu. Řešení úlohy 32 by měl být přesně vypracovaný pracovní list, který by dostali žáci v hodině pro individuální nebo skupinovou práci.

Doufáme, že se nám přece jen podaří vzbudit větší zájem středoškolských profesorů o hlubší promýšlení odborně pedagogických otázek a že si zájemci přece jen najdou trochu času, aby úlohy rozřešili.

Přejeme Vám mnoho zdarů.

Úloha 29. V rovině leží jednotkový kruh K . Dokažte, že neexistuje trojice přímek této roviny, která by rozdělila kruh K v sedm nepřekrývajících se oblastí téhož obsahu $\frac{1}{7}\pi$.