

Acta Universitatis Palackianae Olomucensis. Facultas Rerum  
Naturalium. Mathematica-Physica-Chemica

---

Oldřich Lepil

Teorie elektromagnetického pole v učivu fyziky střední školy

*Acta Universitatis Palackianae Olomucensis. Facultas Rerum Naturalium. Mathematica-Physica-Chemica*, Vol.  
12 (1972), No. 1, 261--272

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/119986>

**Terms of use:**

© Palacký University Olomouc, Faculty of Science, 1972

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>

*Katedra experimentální fyziky a metodiky fyziky přírodovědecké fakulty University Palackého  
v Olomouci*  
Vedoucí katedry: Prof. Paed. Dr. Josef Fuka

## TEORIE ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE V UČIVU FYZIKY STŘEDNÍ ŠKOLY

OLDŘICH LEPIL

(Došlo dne 30. června 1971)

Věnováno prof. dr. Josefu Fukovi k 65. narozeninám.

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 elektrického pole v prostředí bez elektrických nábojů. V tomto příspěvku si všimneme některých problémů vybudování Maxwellovy teorie elektromagnetického pole ve tvaru dostupném žákům střední školy, s cílem dovršit soustavu učiva elektřiny zobecněným pohledem na speciální případy elektromagnetického pole, jež jsou obsahem vyučování jednotlivými tématy učiva elektřiny.

### 1. Teorie elektromagnetického pole ve středoškolských učebnicích fyziky

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

Ve většině středoškolských učebnic se však tento problém uspokojivě neřeší, nebo 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 je výklad ve většině středoškolských učebnic fyziky řešen jen na kvalitativním základě a pokusy o kvantitativní zvládnutí Maxwellovy teorie na střední škole jsou z metodického hlediska málo uspokojivé.

Společným nedostatkem všech pokusů o metodické zpracování teorie elektromagnetického pole ve středoškolských učebnicích je malá propracovanost experimentální stránky výkladu. To má za následek, že většina postupů má ráz teoretických dedukcí, pro něž žák nemá dostatek názorných představ, nebo jsou základní teoretické poznatky jen sdělovány 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 názorných úvodních experimentů. Současně je třeba zachovat v metodice výkladu teoretické úvahy a „myšlenkové pokusy“, které dávají cenné možnosti pro rozvíjení fyzikálního myšlení žáků a na nichž je založen výklad v některých moderně zpracovaných učebnicích zahraničních (např. [2], [3]).

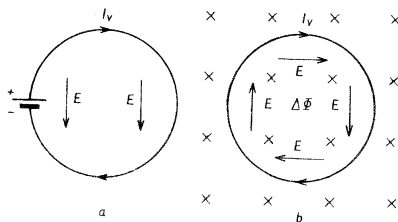
## 2. Děje v elektromagnetickém poli

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 Prokofjev [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, resp. 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 lze vytvořit v kroužku proud, můžeme shrnout základní poznatky o zřídlovém a vírovém elektrickém poli.

Jestliže do obvodu zařadíme zdroj napětí (obr. 1 a), 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 práce koná a uvnitř zdroje se spotřebovuje, takže celková práce po uzavřené dráze v elektrickém poli tvořeném náboji (zdrojem EMN) je nulová. Tímto způsobem vytváříme představu pole zřídlového, které charakterizujeme siločarami vycházejícími z náboje kladného a směřujícími k náboji zápornému.

Zatím co vlastnostem zřídlového pole je v učivu elektřiny věnována větší



Obr. 1: Elektrické pole ve vodivém kroužku: a) zřídlové; b) vírové

pozornost, jsou poznatky o poli vírovém pro žáky vesměs zcela nové. Proto je třeba konkretizovat představy o vírovém elektrickém 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 metodicky se ho ve vyučování nepoužívá.

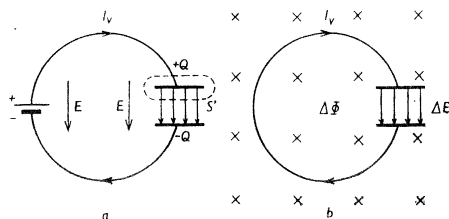
Absorpční kroužek je v podstatě uzavřený kruhový vodič o poloměru  $r$ , který při demonstraci vkládáme do magnetického pole smyčkového zářiče s rychle se měnící magnetickou indukcí (obr. 1 b), takže se v kroužku indukují napětí

$$U = - \frac{\Delta\phi}{\Delta t}$$

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

$$E = \frac{U}{l} = \frac{U}{2\pi r} = - \frac{1}{2\pi r} \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \quad (1)$$

Intenzita elektrického pole má ve všech částech kroužku stejnou velikost a orientaci, takže projde-li jednotkový elektrický náboj podél celého obvodu, získá energii  $2\pi rE$ , která vlastně odpovídá indukovanému napětí. Je také zřejmé, že siločáry indukovaného elektrického pole jsou uzavřené křivky a ze vztahu (1) vyplývá, že v kroužku většího poloměru je intenzita elektrického pole menší. 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.



Obr. 2: Elektrické pole v kroužku s kondenzátorem: a) zřídlové; b) vírové

Dalším problémem výkladu je aplikace představy o indukovaném vírovém poli ve vodiči s volnými nosiči náboje na prostředí bez volných nosičů náboje. Opět 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. 2 a) se kondenzátor nabije nábojem  $Q$  a nastane ustálený stav, kdy vodivý proud  $I_v = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$  v obvodu je nulový a mezi deskami

kondenzátoru je elektrické pole konstantní intenzity

$$E = \frac{U}{d} = \frac{Q}{Cd} = \frac{Q}{\varepsilon S}.$$

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

$$N = ES = \frac{Q}{\varepsilon}, \quad (2)$$

což je vlastně elementární vyjádření *Gaussovy věty*.

Uvažujme dále, že je kroužek s kondenzátorem v proměnném magnetickém poli smyčkového zářiče (obr. 2 b). 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  $I$ . 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

$$I_p = S \frac{\delta D}{\delta t}$$

( $S$  je plocha a  $D$  je velikost vektoru elektrické indukce), vychází z představy posunutí vázaných nábojů v dielektriku ve směru vektoru elektrické indukce. To je však pro střední školu nevhodné, poněvadž všechny úvahy se prakticky omezují na vakuum nebo se jev posunutí vázaných nábojů neuvažuje.

Sachmajev [6] také namítá, že již samotné slovo proud, užitě k označení změn elektrického pole, vede u žáků k nesprávným představám, ke ztotožnění posuvného proudu s mnohem obvyklejším proudem vodivým. Proto navrhuje místo termínu posuvný proud těžkopádnější, ale výstižnější výraz „*změna elektrického pole*“.

Námítka Sachmajevova se však nezdá být dosti závažná, poněvadž právě naopak je třeba zvolit takový termín, který by napomáhal předstávě, že vodivý proud v části obvodu s volnými nosiči náboje může v prostoru bez těchto nosičů pokračovat, ovšem jako proud odlišných fyzikálních vlastností. Rovněž navrhovaný termín „*změna elektrického pole*“ není příliš přesný, poněvadž dostatečně nevystihuje skutečnost, že jde o časovou změnu intenzity elektrického pole (elektrické indukce), resp. elektrického intenzitního toku.

Proto se nám jeví jako vhodnější i pro střední školu termín Maxwellův proud, používaný např. v učebnici [7] i v jiných publikacích. Tento termín je pravděpodobně výhodnější než termín *ekvivalentní proud* (equivalent current) v učebnici [2]. Dále budeme užívat jen termínu Maxwellův proud.

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 definujeme vztahem

$$A = \frac{AQ}{At'}$$

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

$$\frac{e2}{At} = \frac{AN}{At'} + m$$

Při výkladu tohoto nového 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 rozбором případů statického, stacionárního 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  $I_4 \neq 0$ . Tedy nejen v případě statického elektrického pole (kdy je mezi deskami kondenzátoru 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.

Jestliže budeme kondenzátor nabíjet, pak ke kladné desce proud přitéká a ze záporné odtéká a pokračováním tohoto proudu mezi deskami kondenzátoru je proud Maxwellův. Význam této úvahy spočívá v tom, že uvažovaný případ můžeme interpretovat jako uzavřený obvod, jehož jednu část tvoří vodič (s volnými nosiči náboje) a druhou dielektrikum (bez volných nosičů náboje). Pro každou část obvodu je pak charakteristický jiný druh proudu: pro první proud vodivý a pro druhou proud Maxwellův.

Pro další úvahy má také význam určení směru Maxwellova proudu, přičemž využijeme jednoduchého grafického znázornění změn intenzity elektrického pole podle obr. 3. Poněvadž je tok intenzity elektrického pole skalár, je směr Maxwellova proudu<sup>1)</sup> určen vektorem změny intenzity elektrického pole  $AE$ . Jestliže má nabíjecí proud směr šipek, intenzita elektrického pole mezi deskami se zvětšuje a vektor změny intenzity elektrického pole má souhlasnou orientaci s nabíjecím proudem. Maxwellův proud má pak stejný směr jako proud vodivý. Chápeme-li tento děj tak, že k desce kondenzátoru přitéká proud vodivý a z ní odtéká proud Maxwellův, jsou vytvářeny obr. 3: Změna intenzity elektrického pole

i-4 T H t

$\sqrt{AE}$  E-i

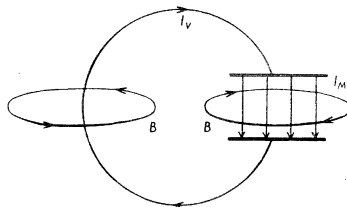
<sup>1)</sup> Maxwellův proud  $J_M$  je veličina skalární. Pokud se uvažuje směr proudu  $J_M$ , rozumí se v tom smyslu slova, v jakém se užívá u proudu vodivého.

#### 4. Vztah mezi elektrickým a magnetickým polem

Jádrum 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 *Maxwellův proud budí magnetické pole stejně jako proud vodivý*. I když nemůžeme podat přímé experimentální potvrzení tohoto překladu, lze metodicky využít analýzy pokusů s vodivým kroužkem přerušeným deskovým kondenzátorem ve vysokofrekvenčním poli.



Obr. 4: Magnetické pole vodivého a Maxwellova proudu

Proud  $I_v$  ve vodivé části kroužku (obr. 4) vytváří magnetické pole, jehož magnetická indukce ve vzdálenosti  $r$  od vodiče je určena vztahem

$$B = \frac{\mu}{2\pi r} I_v. \quad (4)$$

Jestliže Maxwellovu proud  $I_M$  přisoudíme obdobné indukční účinky, bude magnetická indukce vzbuzeného magnetického pole

$$B = \frac{\mu}{2\pi r} I_M = \frac{\epsilon\mu}{2\pi r} \frac{\Delta N}{\Delta t}. \quad (5)$$

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

$$B = \frac{\mu}{2\pi r} (I_v + I_M) = \frac{\mu}{2\pi r} \left( I_v + \frac{\Delta N}{\Delta t} \right). \quad (6)$$

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 řešení možností elementárního vyjádření Maxwellových rovnic bude jejich integrální tvar

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

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

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

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

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.

Zjednodušení matematická spočívají v tom, že v rovnicích (7) a (8) nahradíme integrál vektoru  $\mathbf{H}$ , resp.  $\mathbf{E}$  po libovolné uzavřené dráze  $C$  integrálem 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 nahradíme plošný integrál po uzavřené ploše  $S$  v rovnicích (9) a (10) plochou koule o poloměru  $r$  a vektory  $\mathbf{D}$  a  $\mathbf{B}$  jejich normálovými složkami  $D$  a  $B$

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

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

Dalším matematickým zjednodušením je nahrazení parciálních derivací vektorů  $\mathbf{D}$  a  $\mathbf{B}$  v rovnicích (7) a (8) podílem změn těchto veličin a času. Poněvadž v konečné formulaci těchto rovnic nahradíme ještě plošné integrály tokem vektorů  $\mathbf{j}$ ,  $\mathbf{D}$  a  $\mathbf{B}$  plochou  $\mathbf{S}$  ve směru normály, můžeme psát časové změny vektorů  $\mathbf{D}$  a  $\mathbf{B}$



jako časové změny toků  $\Psi$  a  $\Phi$ , což jsou ovšem veličiny skalární. Součin  $j \cdot S$  je vodivý proud  $I_v$  a Maxwellovy rovnice nabudou tvaru

$$H 2\pi r = I_v + \frac{\Delta\Psi}{\Delta t};$$

$$E 2\pi r = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t};$$

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

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

Podstatně náročnější než úprava matematická je fyzikální interpretace rovnic. Z hlediska fyzikálního je třeba provést nejprve 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 tvaru elementárního vyjádření Maxwellových rovnic:

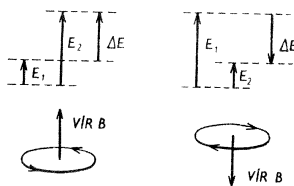
$$B \frac{2\pi r}{\mu} = I_v + \epsilon \frac{\Delta N}{\Delta t} \quad (11)$$

$$E 2\pi r = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (12)$$

$$E 4\pi r^2 = \frac{Q}{\epsilon} \quad (13)$$

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

Náročná na metodiku výkladu je fyzikální interpretace rovnice (11), jejíž levá strana má fyzikální význam magnetomotorického napětí. Nedomníváme se však, že by bylo vhodné zavést tento pojem i na střední škole. Z vorýkin [5] zavádí pro tuto veličinu označení „víř (cirkulaci) intenzity magnetického pole proudů podél uzavřeného obvodu  $B \cdot L$  ( $L$  je délka obvodu), nezavádí však ani označení, ani termín naznačující vířový ráz této veličiny. Naopak v učebnici [2] není tato veličina nijak kvantitativně formulována, je však užíváno označení (víř  $B$ ), resp. (víř  $E$ ) při interpretaci vztahu (12). Ze všech postupů interpretace vířového rázu indukovaného magnetického pole je však patrný didaktický význam grafického znázornění vířového pole kruhovými indukčními čarami.



Obr. 5: K výkladu orientace vířů magnetické indukce

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 změny intenzitního toku, což je veličina skalární (v učebnici [2] je však v této souvislosti označována jako vektor), najdeme orientaci víru indukovaného magnetického pole způsobem patrným z obr. 5.

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 měnicího se elektrického pole.

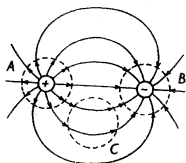
Naopak pro interpretaci druhé Maxwellovy rovnice lépe vyhovuje tvar rovnice (12), který srovnáme s žákům známým vztahem vyjadřujícím zákon elektromagnetické indukce. To umožňuje také objasnit význam součinu  $E \cdot 2\pi r$  jako elektromotorického napětí.

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

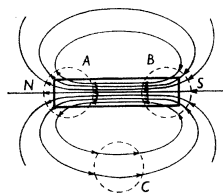
Rovnice (12) platí pro případ, že existuje jen pole vírové. V obvodu však může současně existovat pole vírové i pole zřídlové. V tomto případě je třeba přičíst na pravé straně rovnice (12) napětí  $\mathcal{E}$ , vytvářející toto pole. Analogicky k rovnici (6) pak dostáváme rovnici

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

Již z rovnice (12) a ještě lépe z rovnice (15) vyplývají některé závěry, které využijeme při 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. 6. Případy A a B jsou žákům známy z elektrostatiky, kde se úvahou o náboji  $Q$  obklopeném kulovou plochou o poloměru  $r$  odvozuje Gaussova věta. Jestliže myšlenou kouli umístíme v části pole bez nábojů (případ C), je počet siločar, které do plochy vstupují, roven počtu siločar, jež z ní vystupují a celkový intenzitní tok uzavřenou plochou je nulový.



Obr. 6: K výkladu Gaussovy věty



Obr. 7: K výkladu věty o magnetickém indukčním toku

Obdobnou úvahou pro magnetické pole tyčového magnetu nebo solenoidu (obr. 7) 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 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 magnetickém poli. Při každé změně elektrického pole vzniká pole magnetické, jehož vektor magnetické indukce  $B$  je kolmý na směr vektoru intenzity  $E$  měnícího se elektrického pole.

2. *Zákon celkového napětí (zákon Faradayův)*

Celkové napětí podél uzavřené křivky je rovno součtu indukovaného EMN a EMN zdroje; indukované napětí vzniká jen v proměnném magnetickém poli. Při každé změně magnetického pole vzniká pole elektrické, jehož vektor intenzity  $E$  je kolmý na směr vektoru magnetické indukce  $B$  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 uzavřené 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 jsou vždy křivky uzavřené.

Tyto základní poznatky Maxwellovy teorie elektromagnetického pole umožňují, aby bylo provedeno jejich zobecnění na celou elektřinu. Všechny případy dosud probíraných polí (statické, stacionární, kvazistacionární, nestacionární) lze postavit na společný základ a 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 jak pole elektrické, tak pole magnetické a tyto změny se navzájem podmiňují. 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 jen obtížně. To je dáno tím, že Maxwellův proud dosahuje dostatečných hodnot teprve při velmi rychlých změnách, tzn. při vysokém kmitočtu proudu v elektrickém obvodu. 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 význam pro celkovou výstavbu učiva a cílevědomou přípravou žáků v ostatních částech učiva elektřiny lze dosáhnout správného a hlubokého pochopení této teorie.

#### LITERATURA

- [1] *Vasek L.*: Příspěvek k hodnocení vývoje učebních osnov fyziky na našich středních školách, Gottwaldov 1964; 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] *Ozear J.*: *Fundamental Physics*, J. Wiley New York 1961; ruský překlad Mir Moskva 1964.
- [4] *Prokofjev S. N.*: *Izvěstija APN RSFSR*, vyp. 141, 1965, s. 111.
- [5] Metodika předpovídání fyziky v střední škole, tom III., (*Reznikov I. I.* . . .), Izd. APN RSFSR Moskva 1961.
- [6] *Sachmajev N. M.*: *Izvěstija APN RSFSR*, vyp. 106, 1959, s. 99.
- [7] *Havelka B.*: *Teorie elektromagnetického pole*, SPN Praha 1965.
- [8] *Fyzika pro III. ročník střední všeobecné vzdělávací školy*, (*Piuka J.* . . .), 1. vydání, SPN Praha 1965.

#### SHRnutí

### TEORIE ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE V UČIVU FYZIKY STŘEDNÍ ŠKOLY

OLDŘICH LEPIL

V práci se řeší problémy vybudování Maxwellovy teorie elektromagnetického pole ve tvaru dostupném žákům střední školy. Rozbor osnov a učebnic ukazuje neuspokojivé řešení těchto problémů zejména z hlediska experimentální stránky výkladu. Proto se navrhuje metodika výkladu založená na experimentech s vysokofrekvenčním elektromagnetickým polem.

Analýzou těchto demonstrací se dospívá k rozlišení pole zřídlového a vírového, které je základem pro výklad dějů v elektromagnetickém poli. Nejzávažnějším problémem je vytvoření pojmu Maxwellův proud, pro který je nalezen kvantitativní vztah (3). Přitom se metodicky využívá rozboru dějů v obvodu s kondenzátorem, který je vložen do vysokofrekvenčního magnetického pole.

Jádrem výkladu teorie elektromagnetického pole na střední škole je formulace Maxwellových rovnic v elementárním tvaru — rovnice (11) (12) (13) (14), výklad jejich fyzikálního obsahu a slovní formulace rovnic. I když teorie elektromagnetického pole představuje i v elementárním tvaru obtížné učivo, je nesporný její význam pro celkovou výstavbu učiva elektřiny a jeho správné pochopení.

#### РЕЗЮМЕ

### ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В КУРСЕ ФИЗИКИ СРЕДНЕЙ ШКОЛЫ

ОЛДРИХ ЛЕПИЛ

В статье решаются проблемы создания теории электромагнитного поля Максвелла в такой форме, которая доступна ученикам средней школы. Анализ учебной программы и учебников показывает неудовле-

творительное решение этих проблем, именно с точки зрения экспериментальной части изложения. Поэтому предлагается методика изложения, основанная на экспериментах с высокочастотным электромагнитным полем.

При помощи анализа этих демонстраций доходит до различения полей потенциального и вихревого, которые являются основой изложения явлений в электромагнитном поле. Самой важной проблемой является создание понятия ток Максвелла, для которого найдено квантитативное отношение (3). При этом методически используется анализ явлений в контуре с емкостью, вложенном в высокочастотное электромагнитное поле.

Основой изложения теории электромагнитного поля в средней школе является формулировка уравнений Максвелла в элементарной форме — уравнения (11), (12), (13), (14), изложение их физического содержания и словесная формулировка уравнений. Хотя теория электромагнитного поля представляет собой также в элементарной форме трудный учебный материал, бесспорным остается ее значение для общей системы учебного материала темы Электричество и для лучшего понятия ее.

#### ZUSAMMENFASSUNG

### **THEORIE DES ELEKTROMAGNETISCHEN FELDES IM PHYSIKUNTERRICHT AN DER OBERSCHULE**

OLDŘICH LEPIL

In der vorliegenden Arbeit werden die Probleme des Aufbaues der Maxwell-Theorie des elektromagnetischen Feldes in einer für die Oberschüler begreiflichen Form gelöst. Die Analyse der gegenwärtigen Lehrpläne und -bücher weist eine nicht genügende Lösung dieser Probleme auf, besonders was die experimentelle Komponente der Darlegung des Lehrstoffs betrifft. Deshalb wird eine neue Methodik der Erörterung dieses Lehrstoffs empfohlen, die auf die Experimenten mit dem hochfrequenzelektromagnetischen Feld beruht.

Durch die Analyse dieser Experimente gelangt man zur Auseinanderhaltung des Quellen- und des Wirbelfeldes, die die Grundlage für die Darlegung der Vorgänge im elektromagnetischen Feld bildet. Das schwerwiegendste Problem ist die Formulierung des Begriffs „Maxwellstrom“, für den eine quantitative Relation (3) gefunden ist. Methodisch werden dabei Vorgänge in einem im hochfrequenzelektromagnetischen Feld liegenden Stromkreis mit einem Kondensator ausgenützt.

Die Leitlinie der Darlegung der Theorie des elektromagnetischen Feldes an der Oberschule ist die Formulierung der Maxwellgleichungen in der elementaren Form — die Gleichungen (11) (12) (13) (14), die Erörterung ihres physikalischen Inhalts und die Wortformulation der Gleichungen. Obwohl die Theorie des elektromagnetischen Feldes auch in der elementaren Form einen schwierigen Lehrstoff darstellt, ist ihre Bedeutung für den gesamten Aufbau der Elektrizitätslehre an der Oberschule unbestreitbar.