

Тема 2.4 Рівняння Максвелла

План

1. Вихрове електричне поле
2. Струм зсуву
3. Рівняння Максвелла

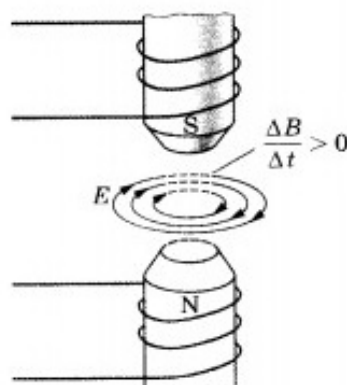
1. Вихрове електричне поле

Пояснюючи виникнення ЕРС індукції в нерухомих провідниках, Максвелл (Джеймс Клерк Максвелл (англ. James Clerk Maxwell; 1831-1879) - британський фізик, математик і механік, мал. 1) висловив гіпотезу, що всяке змінне магнітне поле збуджує в навколишньому просторі електричне поле, яке і є причиною виникнення індукційного струму в контурі.



Рис. 2.1. Джеймс Максвелл

Згідно з Максвеллом магнітне поле, що змінюється в часі, породжує електричне поле \vec{E}_B . Електричне поле \vec{E}_B , збуджуване магнітним полем, як і саме магнітне поле, є вихровим (силові лінії вихрового поля не мають початку і кінця, вони завжди замкнуті).



Мал. 2.2. Вихрове електричне поле

Робота сил вихрового електричного поля з переміщення електричних зарядів (на відміну від роботи сил електростатичного поля) вздовж замкненої траєкторії не дорівнює нулю.

Вихрове електричне поле існує доти, поки змінюється магнітне поле.

2. Струм зсуву

Далі Максвелл, враховуючи глибокий взаємний зв'язок між електричними та магнітними явищами, припустив, що через симетрію в природі будь-яке змінне в часі електричне поле породжує у вакуумі чи в діелектрику вихрове магнітне поле. Згідно з Максвеллом, якщо всяке змінне магнітне поле збуджує в навколишньому просторі вихрове електричне поле, те повинне існувати й зворотне явище: усяка зміна електричного поля повинна викликати появу в навколишньому просторі вихрового магнітного поля. Наприклад, мінливе в часі електричне поле між обкладинками конденсатора (мал. 2.3) створює магнітне поле.

Якщо магнітне поле збуджується електричним струмом, то будь-яка поява магнітного поля – наслідок існування якогось струму.

Для встановлення кількісних зв'язків між мінливим електричним полем і породжуваним ним магнітним полем Максвелл, на додачу до звичайного електричного струму в провідниках («струму провідності») увів поняття струму в діелектриках – «струму зсуву». Насправді так званий «струм зсуву» - мінливе в часі електричне поле.

Максвел по-новому підійшов до замкненості кіл змінного струму (наприклад, коливального контуру): змінний струм провідності в котушці і з'єднувальних проводах «замикається» між обкладинками конденсатора «струмом зсуву».

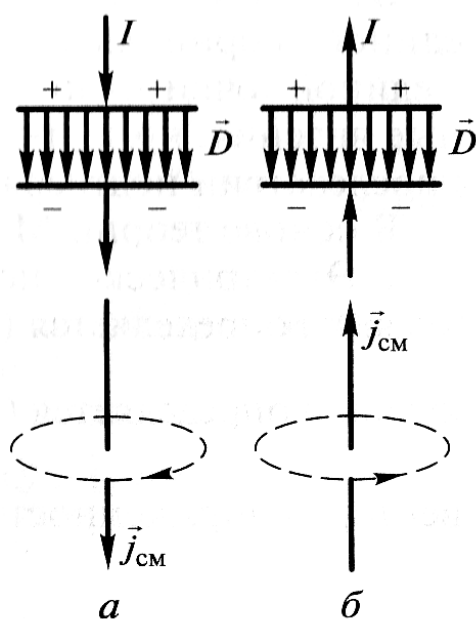


Рис. 2.3.

Вектор електричного зсуву \vec{D} вводять для характеристики електростатичного поля в діелектриках, звертаючи увагу на стрибок вектору напруженості \vec{E} на межі діелектрика. Для ізотропного середовища

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}. \quad (2.1)$$

Із усіх фізичних властивостей, властивих струму провідності, Максвелл приписав току зсуву лише одне – здатність створювати в навколишньому просторі магнітне поле. Таким чином, струм зсуву (у вакуумі або речовині) створює в навколишньому просторі магнітне поле (лінії індукції магнітних полів струмів зсуву при розрядці й зарядці конденсатора показані на мал. 2.3 штриховими лініями).

Максвелл увів поняття повного струму, рівного сумі струмів провідності і «струмів зсуву». Щільність (по перетину) повного струму

$$\vec{j}_{\text{полн}} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}. \quad (2.2)$$

Увівши поняття струму зсуву й повного струму, Максвелл по-новому підійшов до розгляду замкнутості ланцюгів змінного струму. Повний струм у них завжди замкнутий, тобто на кінцях провідника обривається лише струм провідності, а в діелектрику (вакуумі) між кінцями провідника є струм зсуву, який замикає струм провідності.

Слід зазначити, що назва «струм зсуву» є умовною, а точніше історично створеною, тому що струм зсуву по своїй суті - це мінливе в часі електричне поле.

3. Рівняння Максвелла

Відкриття Максвеллом струму зсуву привело його до створення єдиної теорії електричних і магнітних явищ, що дозволило з єдиної точки зору не тільки пояснити електричні й магнітні явища, але й передбачити нові, існування яких було згодом підтверджене.

В основі теорії Максвелла лежать чотири рівняння.

1. Електричне поле може бути як потенційним (його циркуляція дорівнює нулю: $\oint_L \vec{E} d\vec{l} = \oint_L E_t dl = 0$), так і вихровим (його циркуляція дорівнює $-\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}$).

Тому циркуляція вектору напруженості сумарного електричного поля

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S} \quad (2.3)$$

Це рівняння Максвелла показує, що джерелами електричного поля можуть бути не тільки електричні заряди, але й мінливі в часі магнітні поля.

2. Увівши поняття струму зсуву, Максвелл узагальнив теорему про циркуляцію вектору \vec{H} , додавши в праву частину рівняння струм зсуву крізь поверхню S , натягнуту на замкнений контур L :

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}. \quad (2.4)$$

Вираз (2.4) - узагальнена теорема про циркуляцію вектору \vec{H} : циркуляція вектору напруженості \vec{H} магнітного поля по довільному нерухомому замкненому контуру дорівнює алгебраїчній сумі струмів провідності й струму зсуву, охоплених цим контуром. Рівняння (2.4) - одне з рівнянь Максвелла - показує, що магнітні поля можуть збуджуватися або зарядами, що рухаються (електричними струмами), або змінними електричними полями.

3. Теорема Гауса для поля \vec{D} , яка, як припустив Максвелл, слухна для будь-якого електричного поля, як стаціонарного, так і змінного,

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = Q, \quad (2.5)$$

де Q - алгебраїчна сума розташованих усередині поверхні вільних електричних зарядів.

Якщо заряд розподілений усередині замкненої поверхні безупинно з об'ємною щільністю ρ , то формула (2.5) запишеться у вигляді

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = \int_V \rho dV. \quad (2.6)$$

4. Теорема Гауса для поля \vec{B} :

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0. \quad (2.7)$$

Рівняння (2.3) - (2.7) являють собою повну систему рівнянь Максвелла в інтегральній формі:

$$\begin{aligned} \oint_L \vec{E} d\vec{l} &= - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S} & \oint_S \vec{D} d\vec{S} &= \int_V \rho dV \\ \oint_L \vec{H} d\vec{l} &= \int_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S} & \oint_S \vec{B} d\vec{S} &= 0 \end{aligned} \quad (2.8)$$

Повна система рівнянь Максвелла доповнюється матеріальними рівняннями, що зв'язують вектори \vec{E} , \vec{D} , \vec{H} і \vec{B} з величинами, що описують електричні й магнітні властивості середовища:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}, \vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}, \vec{j} = \gamma \vec{E},$$

де ε_0 й μ_0 - відповідно електрична й магнітна постійні; ε і μ - відповідно діелектрична й магнітна проникності; γ - питома провідність речовини.

З рівнянь Максвелла випливає, що джерелами електричного поля можуть бути або електричні заряди, або мінливі в часі магнітні поля, а магнітні поля можуть збуджуватися або електричними зарядами, що рухаються (електричними струмами), або змінними електричними полями. Рівняння Максвелла не симетричні щодо електричного й магнітного полів. Це пов'язане з тим, що в природі існують електричні заряди, але відсутні магнітні.

Для стаціонарних полів ($\vec{E} = \text{const}$ і $\vec{B} = \text{const}$) рівняння Максвелла приймуть вид

$$\begin{aligned} \oint_L \vec{E} d\vec{l} &= 0 & \oint_S \vec{D} d\vec{S} &= Q \\ \oint_L \vec{H} d\vec{l} &= I & \oint_S \vec{B} d\vec{S} &= 0 \end{aligned} \quad (2.9)$$

т. ч. джерелами електричного поля в цьому випадку є тільки електричні заряди, а джерелами магнітного - тільки струми провідності. У цьому випадку електричні й магнітні поля незалежні друг від друга, що й дозволяє вивчати окремо постійні електричне й магнітне поля.

Рівняння Максвелла - найбільш загальні рівняння для електричних і магнітних полів. Вони відіграють у вченні про електромагнетизм таку ж роль, як закони Ньютона в механіці.

З рівнянь Максвелла випливає, що змінне магнітне поле завжди пов'язане з породжуваним ним електричним полем, а змінне електричне поле завжди пов'язане з породжуваним їм магнітним, тобто електричне й магнітне поля нерозривно зв'язані одне з одним - вони утворюють єдине електромагнітне поле.

Одним з основних наслідків теорії Максвелла був висновок про існування електромагнітних хвиль - змінного електромагнітного поля, що поширюється в просторі з кінцевою швидкістю.

Надалі було доведено, що швидкість поширення вільного електромагнітного поля (не пов'язаного із зарядами й струмами) у вакуумі дорівнює швидкості світла $c = 3 \cdot 10^8$ м/с. Цей висновок і теоретичне дослідження властивостей електромагнітних хвиль привели Максвелла до створення електромагнітної теорії світла, згідно з якою світло являє собою також електромагнітні хвилі.

Питання для самоконтролю

1. Що є причиною виникнення вихрового електричного поля? Чим воно відрізняється від електростатичного поля?
2. Для чого Дж. Максвелл увів поняття «струму зсуву»? Що він насправді означає?
3. Запишіть повну систему рівнянь Максвелла в інтегральній формі та поясніть їх фізичний зміст.
4. Чому постійні електричні і магнітні поля можна розглядати окремо одне від одного? Запишіть для них рівняння Максвелла.
5. Які основні висновки можна зробити на основі теорії Максвелла?

Список літератури

1. Трофимова Т.И. Физика: учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / Т.И.Трофимова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2013. – 352 с. (§§ 102-104)
2. Фирсов А.В. Физика для профессий и специальностей технического и естественно-научного профилей: учебник для образоват. учреждений нач. и сред. проф. образования / А.В.Фирсов; под ред. Т.И.Трофимовой. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2013. – 352 с. (§§ 145, 150)
3. Трофимова Т.И. Курс физики. Учеб. пособие для вузов / Т.И.Трофимова. – Изд. 9-е, перераб. и доп. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 560 с. (§§ 137-139)