Ток на отместване. Електромагнитно поле – уравнения на Максуел

Ток на отместване. Електромагнитно поле

Установихме, че променливото магнитно поле поражда електрично поле. Максуел предполага, че променливото електрично поле също така може да породи магнитно поле. Тъй като магнитното поле се създава от токове, променливото електрично поле трябва да е свързано с промяна на зарядите в някаква област от пространството, а тази промяна на заряда е еквивалентна на протичане на някакъв ток. Този ток, породен от промяната на електричното поле, Максуел нарича ток на отместване $\boldsymbol{I_d}$, за разлика от тока на проводимост $\boldsymbol{I_c}$, който разглеждахме досега. Ток на отместване се създава винаги, когато имаме промяна на електричния заряд в дадена област – например при зареждане на кондензатор. Зарядът върху плочите му се изменя непрекъснато при зареждането, което е еквивалентно на протичане на ток:

$$I_d = \frac{dq}{dt}.$$

Във всички случаи, когато в дадена област се променя електричния заряд, това е свързано с промяна на интензитета $\vec{E}$ на електричното поле, а оттам и с потока на интензитета $\boldsymbol{\Phi_E}$ през дадена повърхност, през която протича тока. На базата на такива разсъждения можем да получим по обща формула за тока на отместване, която не е свързана с конкретен случай:

$$(1)\quad I_d = \varepsilon_0 \frac{\partial \Phi_E}{\partial t}$$

и има подобен вид на закона на Фарадей за електромагнитната индукция, т.е. промяната на потока на интензитета на електричното поле поражда ток на отместване, който създава магнитно поле (също както промяната на потока на магнитната индукция поражда индуцирано ЕДН, което създава електрично поле). Ток на отместване $\boldsymbol{I_d}$ (1) се поражда винаги, когато има промяна на електричното поле, но той е много по-малък от тока на проводимост $\boldsymbol{I_c}$ (породен от насоченото движение на електрични заряди), затова неговото действие може да се прояви там където отсъства ток на проводимост (напр. между плочите на кондензатор).

Въвеждането на тока на отместване от една страна възстановява симетрията между електричното и магнитното поле (електрично поле може да се породи от заряди или от промяна на магнитното поле, а магнитно – от токове или промяна на електричното поле), а от друга – дава възможност да се дефинира един нов обект – електромагнитно поле, който показва неразривната връзка между електричното и магнитното поле. Променливото магнитно поле поражда променливо електрично поле, то, от своя страна, поражда променливо магнитно поле и т.н. – следователно в пространството се поражда електромагнитно поле, което се характеризира с интензитета $\vec{E}$ на електричното поле и индукцията $\vec{B}$ (или интензитета $\vec{H}$) на магнитното поле, които, са взаимно перпендикулярни. При този процес се извършва напрекъснато преобразуване на енергията не електричното поле в енергия на магнитното поле и обратно. Електромагнитното поле може да се опише с четири основни уравнения, наречени уравнения на Максуел, които по същество представляват обобщение на теоремите за циркулацията на електричното и магнитното поле и законите на Гаус за електричното и магнитното поле.

Уравнения на Максуел

Ще получим уравненията на Максуел в интегрална форма за вакуум. Показахме, че циркулацията на вихровото електрично поле по затворен контур $\boldsymbol{L}$ е:

$$\oint_L \vec{E_i}.\vec{dl} = \mathcal{E}_i = -\frac{\partial \Phi_B}{\partial t}$$

(взели сме частна производна по времето, защото потокът $\boldsymbol{\Phi_B}$ в общия случай може да зависи и от координатите), а знаем, че циркулацията на електростатичното поле по затворен контур е **0**:

$$\oint_L \vec{E_s}.\vec{dl} = 0$$

(означили сме интензитета на електростатичното поле с $\vec{E_s}$). Ако в дадена област от пространството имаме и постоянни електрични полета ($\vec{E_s}$) и променливи ($\vec{E_i}$), резултантното поле ще се характеризира с интензитет $\vec{E}$, който съгласно принципа на суперпозицията ще бъде $\vec{E} = \vec{E_s} + \vec{E_i}$, а циркулацията му по произволен затворен контур:

$$\oint_L \vec{E}.\vec{dl} = \oint_L \left(\vec{E_s} + \vec{E_i}\right).\vec{dl} = \oint_L \vec{E_s}.\vec{dl} + \oint_L \vec{E_i}.\vec{dl} = 0 - \frac{\partial \Phi_B}{\partial t}$$

(2) $\oint_L \vec{E}.\vec{dl} = -\frac{\partial \Phi_B}{\partial t}$.

Полученото уравнение (2) е първото уравнение на Максуел.

Като използваме (1) можем да обобщим теоремата на Ампер за циркулацията на магнитното поле, която дефинирахме за тока на проводимост $\boldsymbol{I_c}$:

$$\oint_L \vec{B}.\vec{dl} = \mu_0 \sum_{j=1}^{n} I_j = \mu_0 I_c .$$

В общия случай трябва да отчетем и тока на отместване $\boldsymbol{I_d}$ (1) и тогава пълният ток през дадения затворен контур ще бъде $\boldsymbol{I_t = I_c + I_d}$, а теоремата на Ампер ще придобие вида:

$$\oint_L \vec{B}.\vec{dl} = \mu_0 I_t = \mu_0 I_c + \mu_0 I_d$$

(3) $\oint_L \vec{B}.\vec{dl} = \mu_0 I_c + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\partial \Phi_E}{\partial t}$.

Обобщената теорема за циркулацията на магнитното поле (3) е второто уравнение на Максуел.

Третото и четвъртото уравнение на Максуел са законите на Гаус за потока на интензитета на електричното поле и потока на магнитната индукция през затворена повърхност $\boldsymbol{S}$, които и за нестационарния случай (когато имаме променливи електрични и магнитни полета) имат същия вид:

(4) $\oint_S \vec{E}.\vec{dS} = \frac{q}{\varepsilon_0}$

(5) $\oint_S \vec{B}.\vec{dS} = 0$.

Четирите основни уравнения на Максуел (2), (3), (4) и (5), заедно с някои помощни уравнения (напр. законът на Ом $\vec{j} = \sigma \vec{E}$) са напълно достатъчни за описание на електромагнитното поле и имат същото значение в електродинамиката, каквото имат трите принципа на Нютон в механиката.