

Лекция 5. Электромагнетизм заңдары. Максвелл теңдеулері. Электростатика

1. Электромагнетизмнің бірінші заңы электр өрісінің ағынын былай анықтайды:

$$\left[\begin{array}{l} \text{электр өрісінің } \vec{E} \text{ кернеулігінің} \\ \text{кез-келген тұйық бет арқылы} \\ \text{өтетін ағыны} \end{array} \right] = \frac{\text{тұйық бет ішіндегі заряд}}{\epsilon_0} \quad (1)$$

Бұдан мынадай қорытынды жасауға болады: Егер тұйық беттің ішінде заряд жоқ болса, онда оның сыртында қанша заряд болса да, ол бет арқылы өтетін электр өрісінің ағыны нөлге тең.

2. Электромагнетизмнің екінші заңы электр өрісінің циркуляциясы мен магнит өрісі индукция векторының \vec{B} арасындағы байланысты тағайындайды.

Жалпы электромагниттік өрістегі кез-келген Γ тұйық контуры бойынша алынған электр өрісінің \vec{E} циркуляциясын есептесек, ол нөлге тең болмайды (электростатикалық өрісте ғана нөлге тең). Кез-келген тұйық Γ контур бойынша алынған \vec{E} электр өрісінің циркуляциясы электромагнетизмнің 2-заңы бойынша былай анықтайды:

$$\left[\begin{array}{l} \vec{E} \text{ векторының} \\ \Gamma \text{ контуры} \\ \text{бойынша алынған} \\ \text{циркуляциясы} \end{array} \right] = \frac{\partial}{\partial t} \left[\begin{array}{l} S \text{ тұйық беті арқылы} \\ \text{ағып өтетін} \\ \vec{B} \text{ векторының ағыны} \end{array} \right] \quad (2)$$

3. Электромагниттік өрістің заңдары толық болу үшін \vec{B} магнит индукция векторының ағыны және циркуляциясы үшін (1) және (2) сияқты заңдар жазылуы керек. Олар:

Электромагниттік өрістің заңдары толық болуы үшін B магнит индукция векторының ағыны мен циркуляциясы үшін заң

$$\left[\begin{array}{l} \text{Магнит индукция } \vec{B} \text{ векторының} \\ \text{кез-келген тұйық бет арқылы} \\ \text{өтетін ағыны} \end{array} \right] = 0 \quad (3)$$

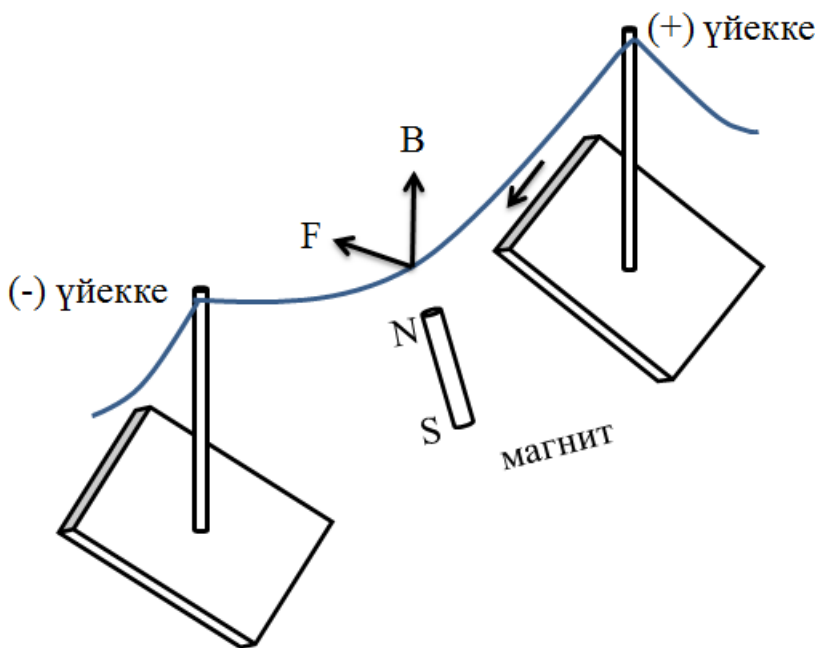
$$\left[\begin{array}{l} \text{Кез-келген } S \text{ беті тіреліп} \\ \text{тұрған тұйық } \Gamma \text{ контуры} \\ \vec{B} \text{ бойынша алынған} \\ \text{векторының} \\ \text{циркуляциясы} \end{array} \right] = \frac{\partial}{\partial t} \left[\begin{array}{l} S \text{ беті арқылы} \\ \text{өтетін} \\ \vec{E} \text{ векторының ағыны} \end{array} \right] + \frac{S \text{ беті арқылы өтетін} \\ \text{электр тогы}}{\varepsilon_0} \quad (4)$$

Осы заңдарға $\vec{F} = q\vec{E} + \frac{1}{n}[\vec{j} \cdot \vec{B}]$ теңдеуін қоссақ, электродинамиканың теңдеулер жүйесі толық алынады.

Электродинамиканың заңдарының физикалық мағыналарын қарапайым тәжірибелер арқылы талдап, түсіндіруге болады.

Екінші қосылғыштың физикалық мағынасын тұрақты магниттің маңында орналасқан сым арқылы ток өткізгінде пайда болатын физикалық құбылыстарды талдау арқылы түсінуге болады. Сым арқылы ток өте

бастасымен ол $\vec{F} = \frac{1}{n}[\vec{j} \cdot \vec{B}]$ өткенде күшінің әсерінен орнынан қозғалып бір жаққа ауытқиды.

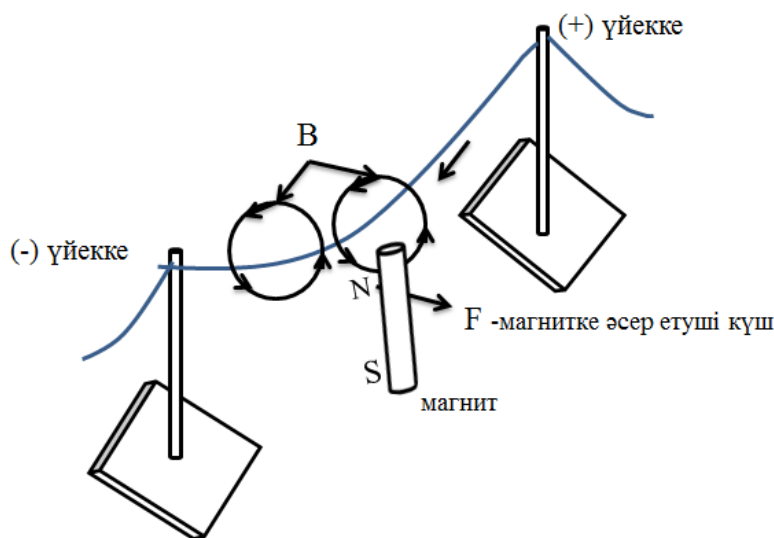


1-сурет. Тұрақты магнитпен тоғы бар сымның өзара әсерлесуі.

Электр тогы – сымның ішіндегі электрондардың жылдамдығымен бағытталған қозғалысы. Қозғалыстағы әр электронға тұрақты магниттің \vec{U}

\vec{B} магнит өрісі, шамасы $|\vec{F}| = q \left| \vec{E} + [\vec{v} \cdot \vec{B}] \right|$ теңдігімен анықталатын күшпен әсер етеді. Сондықтан, тоғы бар сым магнит өрісінде 1- суретте көрсетілген жаққа қарай ауытқиды. Әрине, тоғы бар өткізгіш сым солға қарай жылжығанда магнит оңға қарай ығысу керек. Алайда, сымның массасымен салыстырғанда магниттің массасы өте үлкен болғандықтан, оның қозғалысы сезілмейді.

Ал тоғы бар өткізгіш сымның тұрақты магнитті итере алатындығын былай түсіндіре болады. Өткізгіш сым арқылы өтетін тоқ өз айналасындағы кеңістікте тұрақты магнитке әсер ететін магнит өрісін тудырады. (4) теңдеуінің оң жағындағы соңғы қосылғыш электр тогының \vec{B} векторының циркуляциясын туғызатындығын көрсетеді.

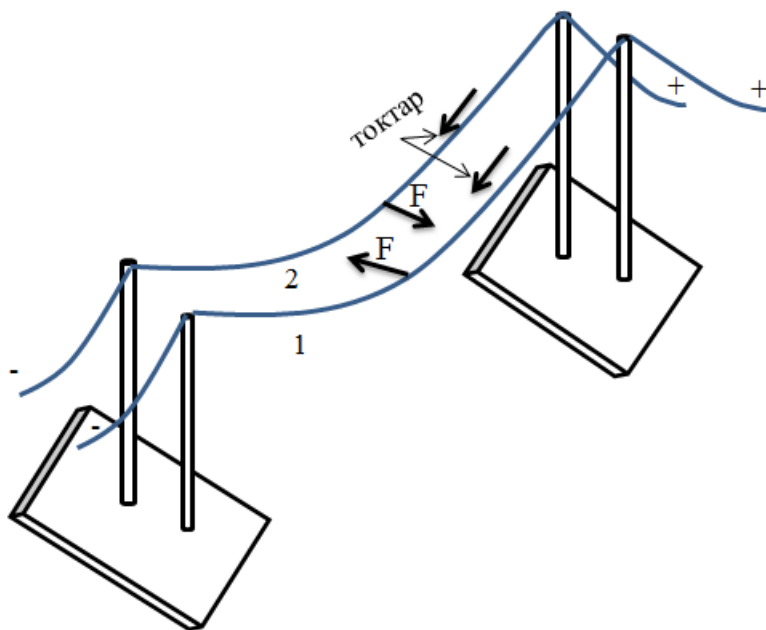


2-сурет. Өткізгіш сым арқылы өтетін тоқтың магнит өрісінің тұрақты магнитке әсері.

2- суретте \vec{B} өрісінің сызықтары тоқ өтетін сымның айналасында тұйық контур (тұзақ) құрайтындығы көрсетілген. Осы \vec{B} өрісі тұрақты магнитке әсер етеді.

Сонымен, *өткізгіш бойымен өтетін электр тогы магнит өрісін тудырады*. Сондықтан, оған кез келген магнит өрісі белгілі бір күшпен әсер етеді. Яғни, *тоғы бар екі өткізгіш сым бір-біріне белгілі бір күшпен әсер ету керек*. Бұл тұжырымға өзара паралель, жақын орналасқан екі өткізгіш сым арқылы көз жеткізуге болады (3-сурет).

Екі паралель, жақын орналастырылған өткізгіш сымдар арқылы өтетін тоқтар бағыттас болса, олар бірін-бірі тартатындығына, ал қарама-қарсы бағыттас болса, бірін-бірі тебетіндігіне тәжірибе жүзінде көз жеткізуге болады.



3- сурет. Паралель токтардың өзара әсері.

Қорыта айтқанда, *электр тогы тұрақты магнит сияқты магнит өрісін тудырады. Магнит өрісі зарядталған бөлшектердің қозғалысының әсерінен пайда болады.*

(3) заңынан электр зарядындай магнит заряды болмайтындығы шығады. (4) теңдеуінің оң жағындағы бірінші қосылғыш өте маңызды. Оны Максвелл теория жүзінде тағайындаған. Бұл қосылғыш *электр өрісі уақыт бойынша өзгереді болса, міндетті түрде магнит өрісі пайда болатынын* көрсетеді. Бұл қосылғыш болмаса, (4) теңдеуі мағынасын жойған болар еді. (4) теңдеуінен магнит өрісінің индукция векторының циркуляциясы, яғни магнит өрісі екі құбылыстардың: бірінші, *өткізгіш бойымен токтың өтуі*, екінші, *электр өрісі ағынының уақыт бойынша өзгерісі* әсерлерінен пайда болатындығын байқаймыз.

2. Максвелл теңдеулері. Статика

Электромагнетизмнің барлық құбылыстары және олардың ерекшеліктері Максвеллдің теңдеулері арқылы түсіндіріледі. Максвеллдің теңдеулері мыналар:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}, \quad (5)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (6)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \left(\varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{j} \right) \mu_0, \quad (7)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = 0. \quad (8)$$

Мұнда $\mu_0 = 1/(\varepsilon_0 c^2)$ - магниттік тұрақты.

(5) - (8) теңдеулерінің физикалық мағыналары келесі:

- (1) – теңдеуі бойынша *электр өрісінің көзі – заряд.*
- (2) – теңдеуі *электр өрісінің құйыны айнымалы магнит өрісі* екендігін тағайындайды.
- (3) – теңдеуі *магнит өрісінің құйыны айнымалы электр өрісі және өткізгіш арқылы өтетін тоқ болатындығын көрсетеді.*
- (3) – теңдеуі *магнит өрісінің көзі болмайтындығын, яғни магнит өрісінің сызықтары тұйықталған болатындығын дәлелдейді.*

Бұл теңдеулер көмегімен электромагнетизмнің өте күрделі құбылыстарын талдауға болады. Электромагнетизмнің ең қарапайым бөлімі – статика. Статикада өріс көзі болып табылатын зарядтар жүйесі қозғалмайды, тыныштықта болады. Ал егер қозғалыста болса, оларды туғызатын тоғының шамасы тұрақты, яғни ρ және \vec{j} шамалары уақытқа тәуелді болмайды. Сонда (5) – (8) теңдеулеріндегі уақыт бойынша алынған туындылары нөлге айналып, Максвелл теңдеулері мынадай түрлерге келеді:

Электростатика

Магнитостатика

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}, \quad (9)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{j}, \quad (10)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (11)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = 0. \quad (12)$$

(9)-(12) теңдеулерінің мына ерекшеліктеріне көңіл аударайық. Максвеллдің (5)-(8) теңдеулері статикада екі қос теңдеулер жүйелеріне: (9)-(10) және (11)-(12) теңдеулеріне ыдырады. (9)-(10) теңдеулері тек электростатиканың, ал (11)-(12) теңдеулері магнитостатиканың заңдарын анықтайды. Бұл *теңдеулер жүйелері бір-бірінен тәуелсіз*. Яғни мынадай қорытындыға келуге болады:

Егер зарядтар қозғалыссыз не ток тұрақты болса, электр құбылысы мен магнит құбылысы бір-біріне тәуелсіз өмір сүреді, бір-біріне әсер етпейді. Олардың өзара байланысы зарядтар мен токтың шамалары уақыт бойынша өзгере бастасымен пайда болады.

Қорытынды:

- Электростатикалық өрістің көзі – тыныштықтағы заряд;
- Электростатикалық өріс – құйынсыз өріс;
- Магнитостатикалық өрістің құйыны – өткізгіш арқылы өтетін ток;
- Магнит өрісі – құйынды өріс.