

Лекция №9. Электромагниттік индукция.

9.1 Электромагниттік индукция құбылысы. Электромагниттік индукция заңы.

9.2 Құйынды токтар. Скин-эффект.

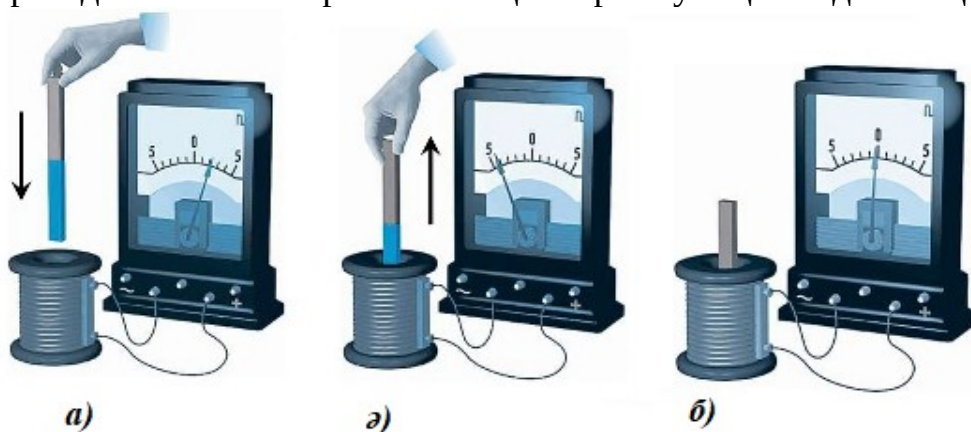
9.3 Өздік индукция. Индуктивтілік. Өзара индукция.

9.4 Магнит өрісінің энергиясы. Магнит өрісі энергиясының тығыздығы.

9.1 Электромагниттік индукция құбылысы. Электромагниттік индукция заңы. 1831 жылы М.Фарадей тәжірибелер көмегімен электрлік және магниттік құбылыстардың өзара байланысын дәлелдейтін құбылыс – электромагниттік индукция құбылысын ашты.

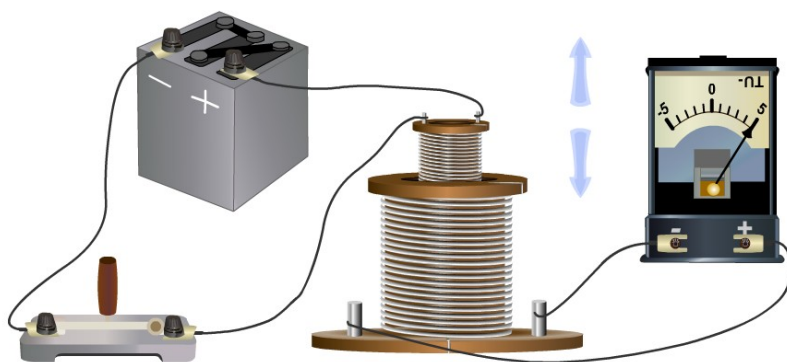
Электромагниттік индукция құбылысы деп тұйық контурды уақыт бойынша өзгертін магнит ағыны қиып өткенде контурда электр тогының пайда болу құбылысын айтады. Пайда болған ток индукциялық ток деп аталады.

Фарадейдің 1-тәжірибесі. Сезгіш гальванометрге жалғанған шарғыға (катушкаға) тұрақты магнитті енгізгенде гальванометрдің тілшесі бір жаққа (суретте оңға) қарай ауытқыса (9.1.а-сурет), тұрақты магнитті шарғыдан (катушкадан) шығарғанда оның тілшесі екінші жаққа (суретте солға) қарай ауытқиды (9.1.ә-сурет), яғни гальванометр тізбекте индукциялық токтың пайда болғандығын, егер тұрақты магнитті шарғыға (катушкаға) қатысты қозғалтпай ұстап тұрса, гальванометр тілшесі нөлді көрсетеді (9.1.б-сурет). Сонымен қатар, тұрақты магнитті шарғыға (катушкаға) енгізіп-шығару жылдамдығын арттырғанда гальванометр тілшесінің көбірек ауытқитынды анықталды.



9.1-сурет

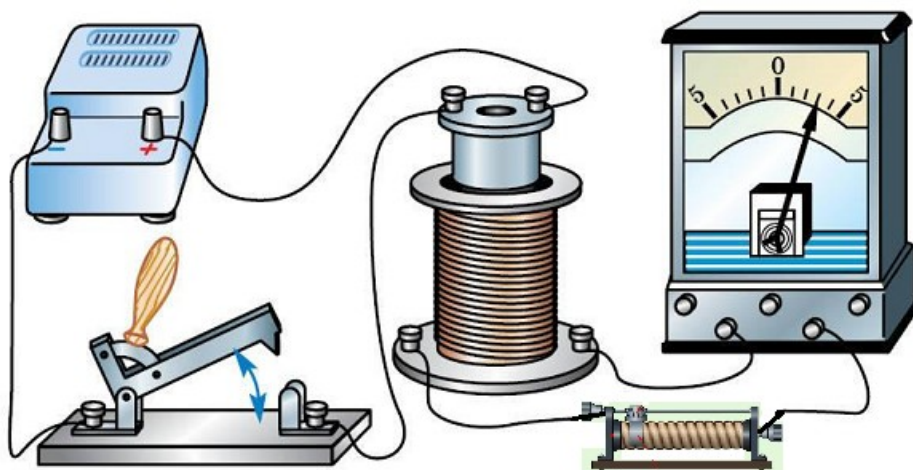
Дәл осы тәжірибені тұрақты магнит орнына тұрақты ток көзіне жалғанған шарғы (катушка) көмегімен де жасауға болады (9.2-сурет).



9.2-сурет

Фарадейдің 1-тәжірибесінен келесідей қорытынды жасалады: *тұйық контурды уақыт бойынша өзгертін магнит ағыны қиып өткенде ғана контурда индукциялық ток пайда болады.*

Фарадейдің 2-тәжірибесі. Біріншісі гальванометрге, ал екіншісі реостат арқылы ток көзіне жалғанған екі шарғыны (катушканы) бір-бірінің ішіне кигізіп қояды. Тізбекті кілт арқылы тұйықтаған сәтте гальванометр тілшесі бір жаққа қарай ауытқыса, кілтті ажыратқан сәтте гальванометр тілшесі кері бағытта ауытқитындығы, сол сияқты реостаттың тиегін жылжытқан сәттерде гальванометр тілшесінің ауытқитындығы байқалады (9.2-сурет).



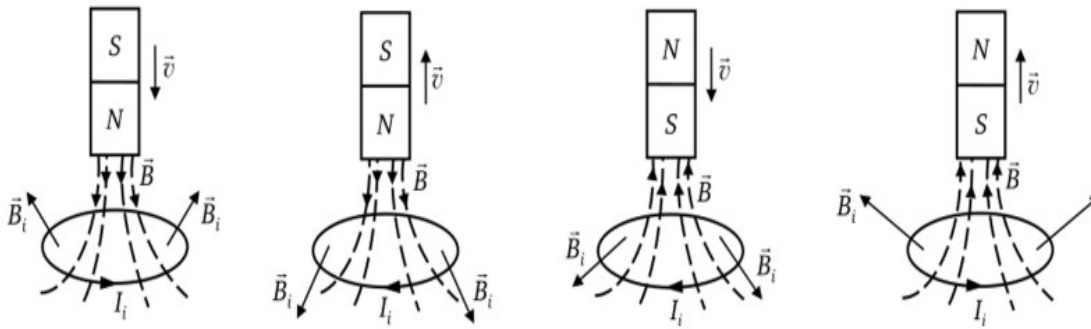
9.2-сурет

Контурды өзгеріп отыратын магнит ағыны қиып өткенде ток пайда болуы контурда зарядталған бөлшектерді (электрондарды) реттелген қозғалысқа келтіретін ЭҚК пайда болатындығын дәлелдейді. Тәжірибелер көрсеткендей индукцияның ЭҚК-і магнит ағынының өзгеру жылдамдығына ғана тәуелді болады: $E_i = \frac{d\Phi}{dt}$

Нормальдің оң бағытын таңдап алып, магнит ағынының таңбасын, токты бағытын, соған қатысты ЭҚК-тің бағыты анықталады. Қорытындылай келе электромагниттік индукция заңының өрнегін былайша жазады:

$$E_i = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (9.1)$$

(9.1)-өрнек Фарадейдің электромагниттік индукция заңы деп аталады. Индукциялық токтың бағыты Ленц ережесімен анықталады (9.3-сурет).



9.3-сурет

Ленц ережесі: *индукциялық ток өзінің магнит өрісімен өзін тудырушы магнит ағынының өзгерісіне қарсы әсер етеді.*

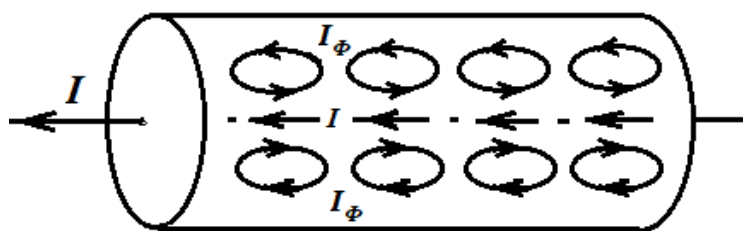
2-тәжірибедегі қозғалмайтын шарғыда (катушкада) индукциялық токтың пайда болу табиғатын түсіндіру үшін Фарадей келесідей болжам жасады: *магнит өрісінің өзгерісі құйынды электр өрісін тудырады. Құйынды электр өрісі кернеулігінің циркуляциясы (\vec{E}_B) индукцияның ЭҚК-іне тең болады:*

$$E_i = \oint \vec{E}_B \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (9.2)$$

9.2 Құйынды токтар. Скин-эффeкт. Тұтас массивті өткізгішті айнымалы магнит өрісіне орналастырғанда өткізгіште индукциялық ток пайда болады. бұл индукциялық ток тұйықталған болады, сондықтан оны құйынды ток немесе Фуко тогы деп атайды. Массивті өткізгіштің кедергісі аз болатындығы белгілі, олай болса Фуко тогының шамасы өте үлкен болады. Фуко тогының бағыты Ленц ережесімен анықталады: *Фуко тогының магнит өрісі оны тудырушы (индукциялаушы) айнымалы магнит өрісі ағынының өзгерісіне қарсы ісер ететіндей бағытпен бағытталады.* Осы себепті күшті магнит өрісінде қозғалатын өткізгіштерге Фуко токтары мен оны индукциялаушы магнит өрісінің өзара әсерлесуі салдарынан туындайтын үлкен кедергі күші әсер етеді де, оны тоқтатады. Фуко тогының осы қасиеті гальванометр, сейсмограф т.б. құралдардың қозғалмалы бөліктерін тыныштандыру (демпфирлеу) мақсатында қолданылады. Сонымен қатар Фуко тогының жылулық әсері үлкен болатындықтан оны индукциялық пештерде қыздырғыш элементі ретінде қолданады.

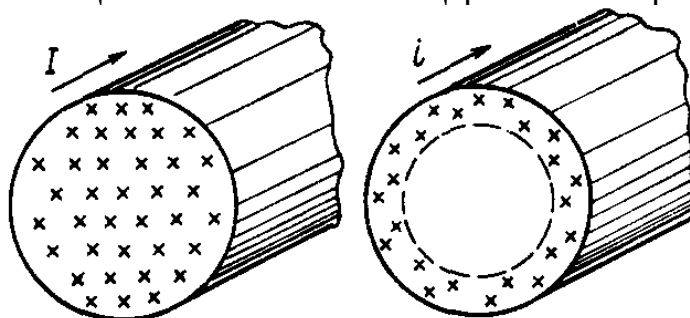
Кейбір жағдайларда Фуко тогын болдырмау үшін арнайы шаралар жасалады. Мысалы, трансформатордың өзекшелерінде Фуко тогы пайда болып, электр энергиясы жылуға айналуы салдарынан болатын шығынды болдырмау мақсатында оның өзекшесін бір-бірімен изоляцияланған қабаттармен бөлінген жұқа пластиналар жиынтығынан жасайды.

Егер массивті өткізгіш бойымен айнымалы ток жүргенде оның бойында өткізгіштің ішкі бөліктерінде бағыты негізгі ток бағытына қарсы (оны әлсірететіндей), ал өткізгіштің беткі бөліктерінде негізгі ток бағытына бағыттас (оны күшейтетіндей) құйынды токтар пайда болады (9.4-сурет).



9.4-сурет

Нәтижесінде өткізгіштің көлденең қимасы бойынша ток біркелкі таралмай, ток оның беткі беткі бөлігіне қарай ығыстырылады (9.5-сурет).



9.5-сурет

Айнымалы ток тек массивті өткізгіштің беткі қабатымен ғана жүреді. Бұл құбылыс скин-эффект (беткі эффект) деп аталады. 9.5-суретте салыстыру үшін массивті өткізгіш бойымен тұрақты ток және айнымалы ток жүргенде ондағы токтың өткізгіштің көлденең қимасы арқылы таралуы бейнеленген.

Массивті өткізгіш бойымен жоғары жиілікті айнымалы ток жүргенде скин-эффект құбылысының салдарынан өткізгіштің ішкі бөліктері пайдасыз болып қалады (іс жүзінде өткізгіштің ішкі бөлігімен ток жүрмейді деуге келеді), сондықтан орынсыз шығынды болдырмау мақсатында жоғары жиілікті тізбектерде іші қуыс түтікше тәрізді өткізгіш сымдар қолданылады.

9.3 Өздік индукция. Индуктивтілік. Өзара индукция. Тұйық контур арқылы I электр тогы жүргенде магнит өрісін тудырады, яғни сол тұйық контурды Φ магнит ағыны қиып өтеді. Бұл магнит ағыны ток тудыратын магнит өрісі индукциясының шамасына тәуелді, олай болса Φ магнит ағыны контур арқылы өтетін I ток күшіне тура пропорционал болады:

$$\Phi = L \cdot I \quad (9.3)$$

мұндағы: L - индуктивтілік деп аталатын пропорционалдық коэффициент.

Интуктивтілік деп тогы бар өткізгіштің магнит өрісін тудыру қабілетін сипаттайтын, сан мәні магнит ағынының сол магнит өрісін тудыратын ток күшіне қатынасымен анықталатын физикалық скаляр шаманы айтады.

$$L = \frac{\Phi}{I} \quad (9.4)$$

Индуктивтіліктің өлшем бірлігі: $[L] = 1 \frac{Вб}{А} = Гн$ (Генри).

Тогы бар контурдың индуктивтілігінің шамасы контурдың геометриялық өлшемдеріне (контурдың ұзындығы мен көлденең қимасының ауданына) және ортаның магниттік қасиетіне тәуелді болады. Шексіз ұзын соленоидтың индуктивтілігінің өрнегі:

$$L = \mu \cdot \mu_0 \cdot \frac{N^2}{l} \cdot S \quad (9.5)$$

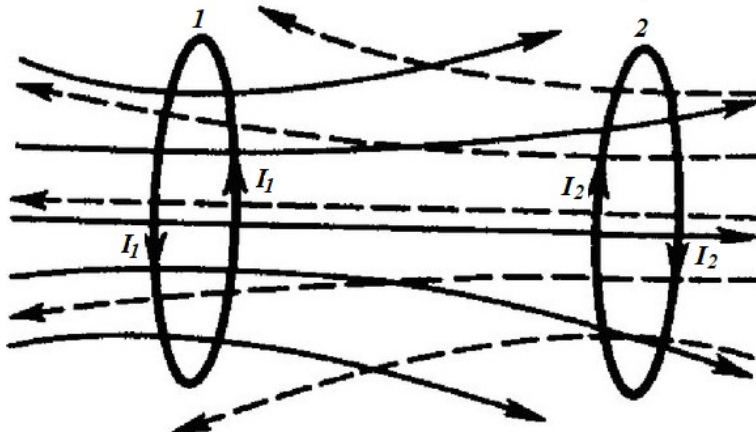
Егер контурдағы ток күшінің шамасы өзгерсе, оны қиып өтетін магнит ағыны да уақытқа тәуелді өзгереді, олай болса контурда индукцияның ЭҚК-і пайда болады. Осы құбылыс, яғни *контурдағы ток өзгергенде контурда индукцияның ЭҚК-інің пайда болуы өздік индукция құбылысы деп аталады.*

$L = \text{const}$ екендігін ескерсек, өздік индукцияның ЭҚК-інің өрнегін электромагниттік индукция заңының өрнегінен қорытып алуға болады:

$$E_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(L \cdot I)}{dt} = -L \frac{dI}{dt} \quad (9.6)$$

(9.6)-өрнектен келесідей қорытынды жасауға болады: *өздік индукцияның ЭҚК-і контурдағы ток күшінің өзгеру жылдамдығына тура пропорционал болады.*

Тоғы бар контурдағы ток күшінің шамасы өзгергенде пайда болатын магнит өрісінің ағыны оған жақын орналасқан екінші контурды қиып өтеді де, екінші контурда айнымалы электр тогының пайда болады. Оның магнит өрісінің ағыны өз кезегінде бірінші контурды қиып өтеді (9.6-сурет). Осы құбылыс, яғни *тоғы бар контурдағы ток күшінің шамасы өзгергенде оған жақын орналасқан екінші контурда айнымалы электр тогының пайда болуы өзара индукция құбылысы деп аталады.*



9.6-сурет

9.6-суреттен көрініп тұрғандай бірінші контурдағы ток күші өзгергенде пайда болатын магнит өрісінің екінші контурды қиып өтетін магнит ағыны:

$$\Phi_{21} = L_{21} \cdot I_1 \quad (9.7)$$

Осының салдарынан екінші контурда пайда болатын индукцияның ЭҚК-і:

$$E_{i2} = L_{21} \frac{dI_1}{dt} \quad (9.8)$$

Дәл осы сияқты екінші контурда пайда болған айнымалы электр тогының магнит өрісінің бірінші контурды қиып өтетін магнит ағыны:

$$\Phi_{12} = L_{12} \cdot I_2 \quad (9.9)$$

Осының салдарынан бірінші контурда пайда болатын индукцияның ЭҚК-і:

$$E_{i1} = L_{12} \frac{dI_2}{dt} \quad (9.10)$$

Мұндағы: L_{12} және L_{21} бір-біріне тең болатын, өзара индуктивтілік деп аталады. Өзара индуктивтілік деп аталатын пропорционалдық коэффициент шамасы контурлардың пішініне, олардың геометриялық өлшемдеріне және ортаның магниттік қасиетіне тәуелді болады.

Өзара индукция құбылысы трансформатордың көмегімен кернеуді жоғарылату мен төмендетуде, бір электр тізбегінен екінші электр тізбегіне энергия тасымалдауда, металды индукциялық қыздыруда т.б. қолданылады.

9.4 Магнит өрісінің энергиясы. Магнит өрісі энергиясының тығыздығы. Токтың айналасында магнит өрісі пайда болады, яғни ток магнит өрісін тудыру үшін қандай да бір жұмыс жасауы тиіс. Токтың осы жұмысы шама жағынан магнит өрісінің энергиясына тең болады.

Индуктивтілігі L контур арқылы шамасы I болатын электр тогы жүрсін. Осы токтың магнит өрісінің контурды қиып өтетін магнит ағыны $\Phi = L \cdot I$ болсын. Контурдағы ток күші dI шамаға өзгергенде магнит ағынының өзгерісі $d\Phi = L \cdot dI$ болсын. Сонда магнит ағынын $d\Phi$ шамаға өзгерту үшін токтың атқаратын элементар жұмысы: $\delta A = I \cdot d\Phi = I \cdot L \cdot dI$ (9.11)

Олай болса, контурдағы токтың Φ магнит ағынын тудыру үшін атқаратын жұмысын табу үшін (9.11)-өрнекті 0-ден I аралығында интегралдау қажет:

$$A = \int_0^I I \cdot L \cdot dI = \frac{L \cdot I^2}{2}$$

Токтың атқарған жұмысы шама жағынан магнит өрісінің энергиясына тең болатындығын ескерсек: $W_m = \frac{L \cdot I^2}{2}$ (9.12)

(9.12)-өрнек магнит өрісінің энергиясының өрнегі.

Магнит өрісінің энергиясының өрнегін өріс сипаттамалары болып табылатын магнит өрісінің кернеулігі мен индукциясы арқылы да өрнектеуге болады.

Шексіз ұзын соленоидтың индуктивтілігі: $L = \mu \cdot \mu_0 \cdot \frac{N^2}{l} \cdot S$ екендігі белгілі.

Осы өрнекті (9.12)-өрнекке қойсақ: $W_m = \mu \cdot \mu_0 \cdot \frac{N^2}{l} \cdot S \cdot \frac{I^2}{2}$. мұндағы $B = \mu \cdot \mu_0 \cdot H$ және

$$I = \frac{B \cdot l}{\mu \cdot \mu_0 \cdot N} \text{ екендігін ескерсек: } W_m = \frac{B^2}{2 \cdot \mu \cdot \mu_0} \cdot V = \frac{B \cdot H}{2} \cdot V$$

Сонда магнит өрісінің энергиясы: $W_m = \frac{B \cdot H}{2} \cdot V$ (9.13)

Соленоидтағы магнит өрісі біртекті болатындықтан магнит өрісі энергиясының тығыздығы: $w_m = \frac{W_m}{V} = \frac{B^2}{2 \cdot \mu \cdot \mu_0} = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot H^2}{2} = \frac{B \cdot H}{2}$ (9.14)

Бақылау сұрақтары

1. Фарадей тәжірибелерінің барысын және оның нәтижелерінен шығатын қорытындыны баянда.

2. Электромагниттік индукция заңының физикалық мағынасын ашып көрсет.
3. Ленц ережесінің көмегімен индукциялық токтың бағытын анықтауға мысалдар келтір.
4. Фуко тогының пайда болу механизмін түсіндір.
5. Скин-эффект құбылысының механизмін түсіндір.
6. Өздік индукция және өзара индукция құбылыстарының ерекшеліктерін ашып көрсет.
7. Магнит өрісінің энергиясының өрнегін қорытып шығар.

Лекция № 10. Электромагниттік өріс.

10.1 Құйынды электр өрісі.

10.2 Ығысу тогы. Максвелл болжамы.

10.3 Максвелл теңдеулері және оның құндылығы.

10.1 Құйынды электр өрісі. XIX ғасырдың екінші жартысына дейін электр және магнит өрістері жөніндегі жинақталған ғылыми мәліметтер мен эксперименттердің нәтижелерін қорытындылай келе, бұл өрістер туралы Фарадей идеяларын негізге ала отырып ағылшын физигі әрі математигі Джеймс Клерк Максвелл зарядтар мен токтар жүйесі туғызатын электромагниттік өрістің бірыңғай теориясын жасады. Максвеллдің электромагниттік өріс теориясының негізін «[Максвелл теңдеулері](#)» деп аталатын төрт дифференциалдық теңдеулері құрайды.

Фарадейдің электромагниттік индукция құбылысына ғылыми талдау жасай келе Максвелл: «Магнит өрісінің кез келген өзгерісі қоршаған кеңістікте құйынды электр өрісін туғызады» деген деген болжам жасады.

Заряд тудыратын электр өрісінің кернеулік векторының циркуляциясы нөлге тең:

$$\oint_L \vec{E}_q \cdot d\vec{l} = \oint_L E_{ql} \cdot dl = 0 \quad (10.1)$$

Айнымалы магнит өрісі электр өрісін тудырады, ол өрістің кернеулік векторының циркуляциясы:

$$\oint_L \vec{E}_B \cdot d\vec{l} = \oint_L E_{Bl} \cdot dl = -\frac{\partial \Phi}{\partial t} \quad (10.2)$$

мұндағы: E_{Bl} - \vec{E}_B векторының $d\vec{l}$ бағытына проекциясы.

Егер ток жүретін контур мен магнит ағыны қиып өтетін бет қозғалмайтын болса, онда магнит ағынының өрнегін ($\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$) (10.1)-өрнекке қойғанда:

$$\oint_L \vec{E}_B \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \quad (10.3)$$

(10.3)-өрнектен көрініп тұрғандай айнымалы магнит өрісі тудыратын электр өрісі кернеулік векторының циркуляциясы нөлден өзгеше.