ӘЛ-ФАРАБИ АТЫНДАҒЫ ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ
Физика-техникалық факультеті

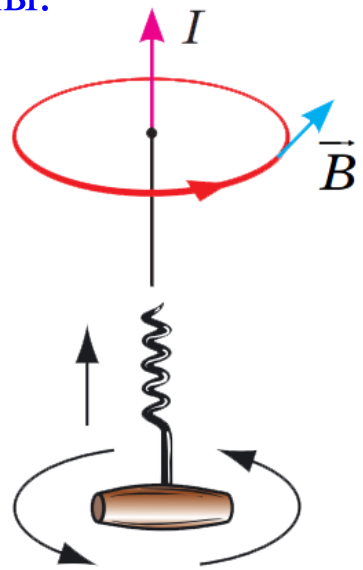
ЭЛЕКТР ЖӘНЕ МАГНЕТИЗМ

Профессор Досболаев М.Қ.
merlan@physics.kz

Магнит өрісі векторының ағыны және құйындылығы туралы. Магнит өрісінің графикалық түрде кескінделуі



1 сурет. Түзу токтың магнит өрісі күш сызықтарын темір үгінділері көмегімен кескіндеу



2 сурет



Томас Иоганн Зеебек (1770-1831)



Доминик Франсуа Жан Араго́ (1786 - 1853)

Бармасов А.В.

Дөңгелек токтың магнит өрісі



Michael Melloch

Соленоидтың магнит өрісі



http://physics.unm.edu/

$\vec{B}$ векторының ағыны туралы Гаусс теоремасы



3 сурет. Магнит өрісінің күш сызықтарын сипаттау

Кез-келген S тұйық бет арқылы өтетін $\vec{B}$ векторының ағыны нөлге тең:

$$\oint \vec{B} \mathrm{d}\vec{S} = 0 \ (1)$$

$\vec{B}$ векторының дивергенциясы:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \ (2)$$

$\vec{B}$ векторы күш сызықтарының басыда, соңыда жоқ. Осы себепті S бетпен тұйықталған кез-келген көлемге кірген $\vec{B}$ векторының сызықтары шыққандарға тең болады және осы беттің формасынан тәуелсіз. *Табиғатта магнит өрісінің көзі болатын магниттік зарядтар болмайды.*

$\vec{B}$ векторының циркуляциясы туралы теорема

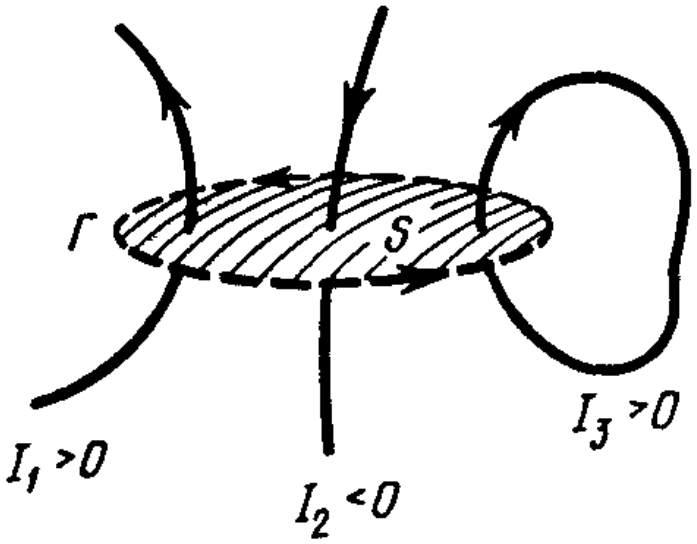
Вакуумдағы Γ контуры бойымен $\vec{B}$ векторының циркуляциясы осы контур қамтитын токтардың алгебралық суммасын магнит тұрақтысына (μ_0) көбейткенге тең:

$$\oint \vec{B}\mathrm{d}\vec{l} = \mu_0 \sum I_k \quad (3)$$

$\vec{B}$ векторының роторы:

$$\mathrm{rot}\vec{B} = \mu_0 \vec{j} \quad (4)$$

Магнит өрісі құйынды, соленоидты



4 сурет. Магнит өрісінің циркуляциясы тек Г контуры қамтитын токтар арқылы анықталады. Жалпы магнит өрісін барлық токтар тудырады

Ток көлем бойынша таралса:

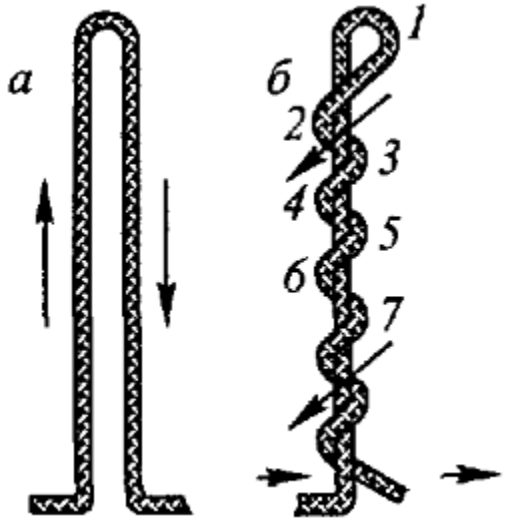
$$I = \int \vec{j} d\vec{S} \quad (5)$$

Интегралдық формадағы толық ток заңы:

$$\oint \vec{B}\mathrm{d}\vec{l} = \mu_0 \int \vec{j} d\vec{S} = \mu_0 \int j_n dS \quad (6)$$

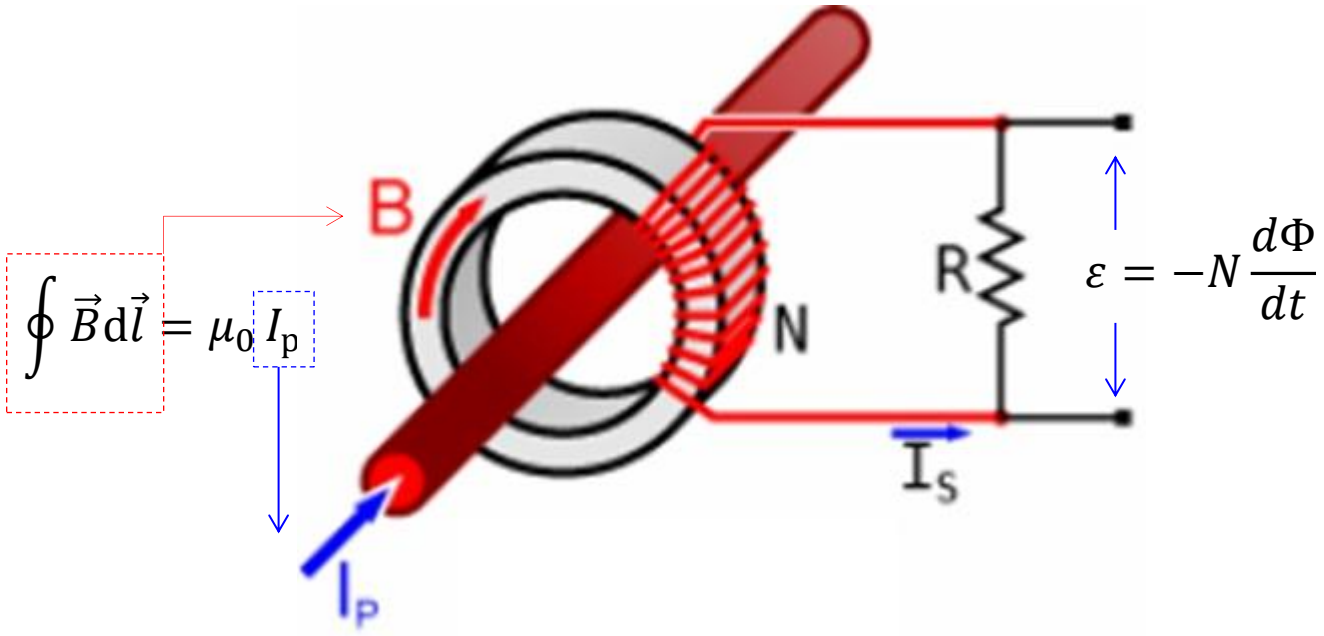
μ_0 – магнит тұрақтысы

Магнит өрісінің құйындылығы туралы теоремаға сай суретте көрсетілгендей формадағы тогы бар өткізгіштер маңайына магниттік әсер бермейді



5 сурет

Роговский белдігі (ток трансформаторы)





Вальтер Роговский
(1881-1947)

$$I_p = N \cdot I_s \ (7)$$

$$I_p = N \cdot U/R \ [\mathrm{A}] \ (8)$$

I_p – өткізгіш тогы; I_s – өткізгішке орала орналасқан катушкада индукцияланған ток күші



6 сурет. Ток трансформаторы



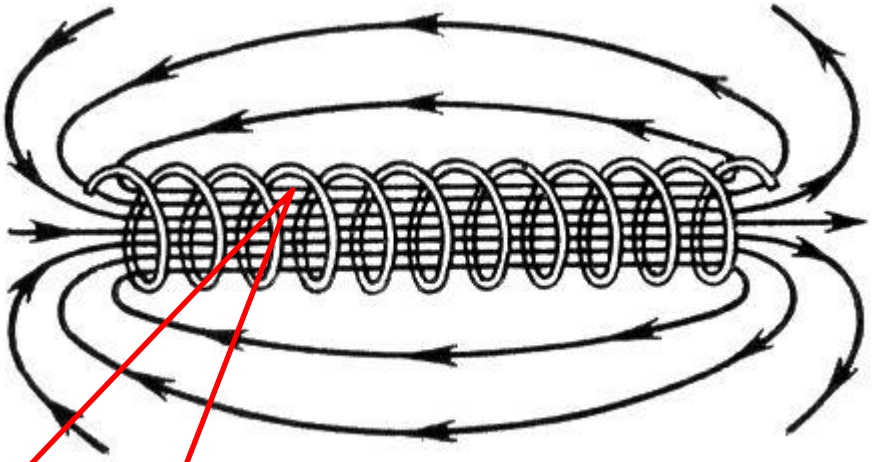
7 сурет. Роговский белдігі



8 сурет. Сымсыз амперметр

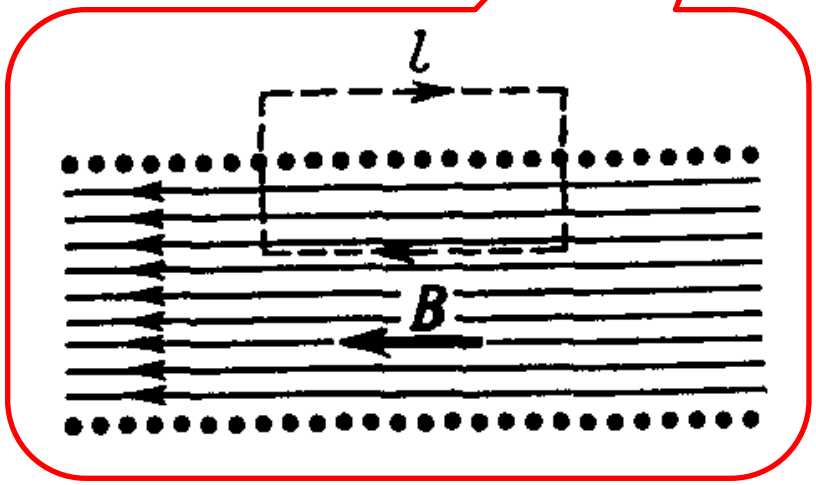
Ұзын ($L \gg d$) соленоидтың магнит өрісі

$$\oint \vec{B} \mathrm{d}\vec{l} = \mu_0 I \ (3)$$



$$B_{\text{іш}} = const$$

9 сурет



$$Bl = \mu_0 NI$$

$$B = \mu_0 \frac{N}{l} I \ (*)$$

$$B = \mu_0 nI \ (9)$$

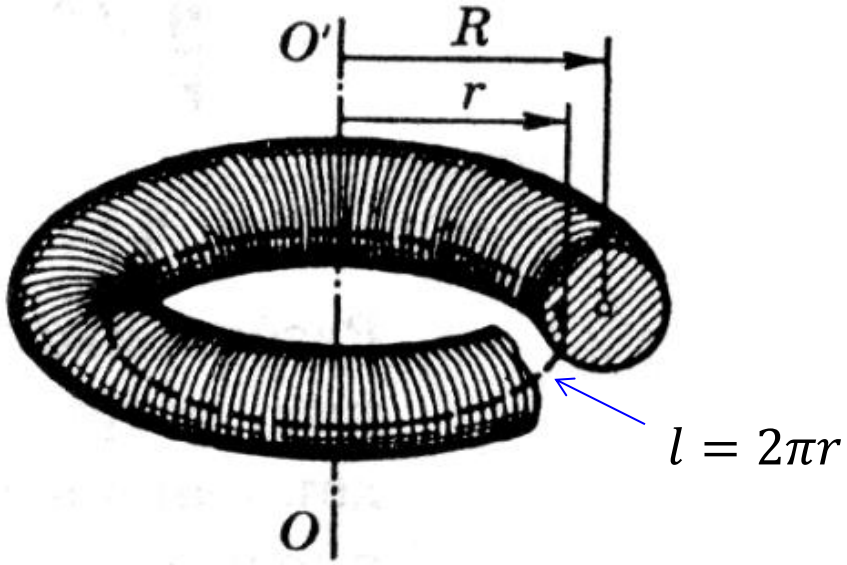
$n = \frac{N}{l}$ – бірлік ұзындыққа келетін орам саны; nI – амперорам саны

Тороидты катушка

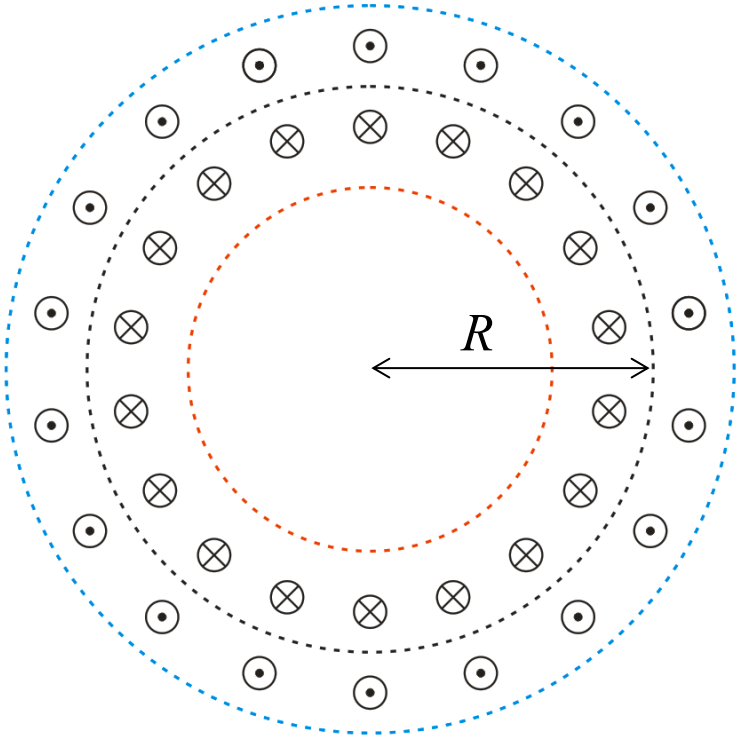


Тогы бар тороидты катушканың магнит өрісі

$$\oint \vec{B}\mathrm{d}\vec{l} = \mu_0 I \ (3)$$



10а сурет



10ә сурет

Ішінде:

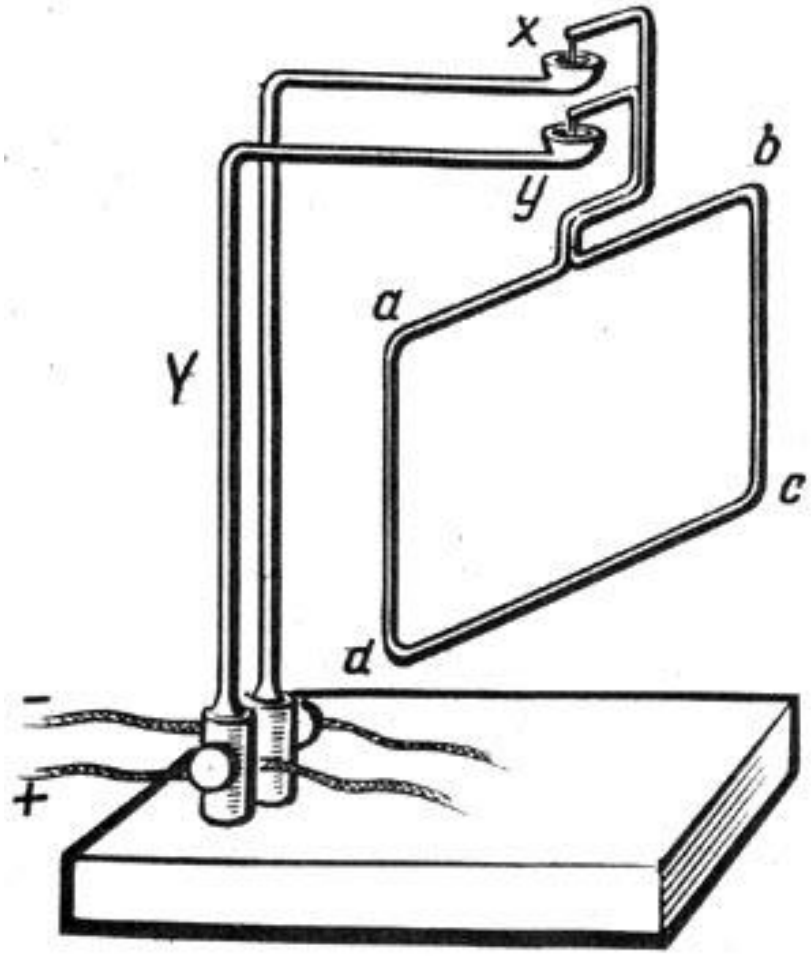
$$B \cdot 2\pi r = \mu_0 NI \ (10) \Rightarrow B = \left(\frac{\mu_0}{2\pi}\right)\frac{NI}{r} \ (11)$$

Сыртында:

$$B \cdot 2\pi r = 0$$

Тогы бар өткізгішке магнит өрісі әсер етеді.
Ампер тәжірибесі. 25 қыркүйек 1820 жыл.

«Тек эксперименттік жолмен анықталған электрдинамикалық құбылыстардың теориясы»



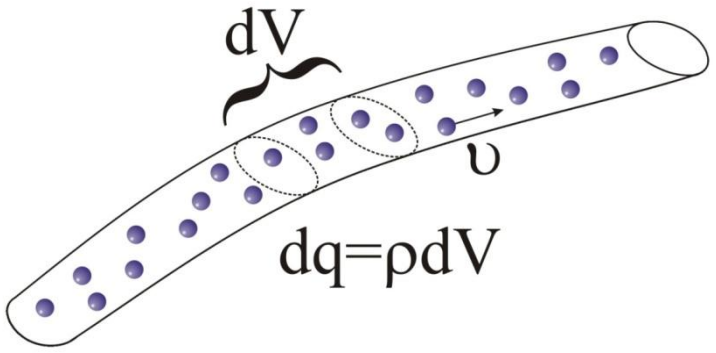
11 сурет. Ампер «станогы»



Андре́-Мари́ Ампе́р
(1775-1836)

Бармасов А.В.

Ампер күші, магнит өрісі тарапынан токқа, сәйкесінше осы ток өтіп жатқан өткізгішке әсер ететін күш



12 сурет. Тогы бар өткізгіштің кіші көлемі

$$\vec{F}_{\text{M}} = q\left[\vec{v}\times\vec{B}\right] \quad (1)$$

$$dq = \rho dV$$

$$\mathrm{d}\vec{F} = \rho\left[\vec{v}\times\vec{B}\right]dV \quad (12)$$

$$\vec{j} = \rho\vec{v}$$

$$\mathrm{d}\vec{F} = \left[\vec{j}\times\vec{B}\right]dV \quad (13)$$

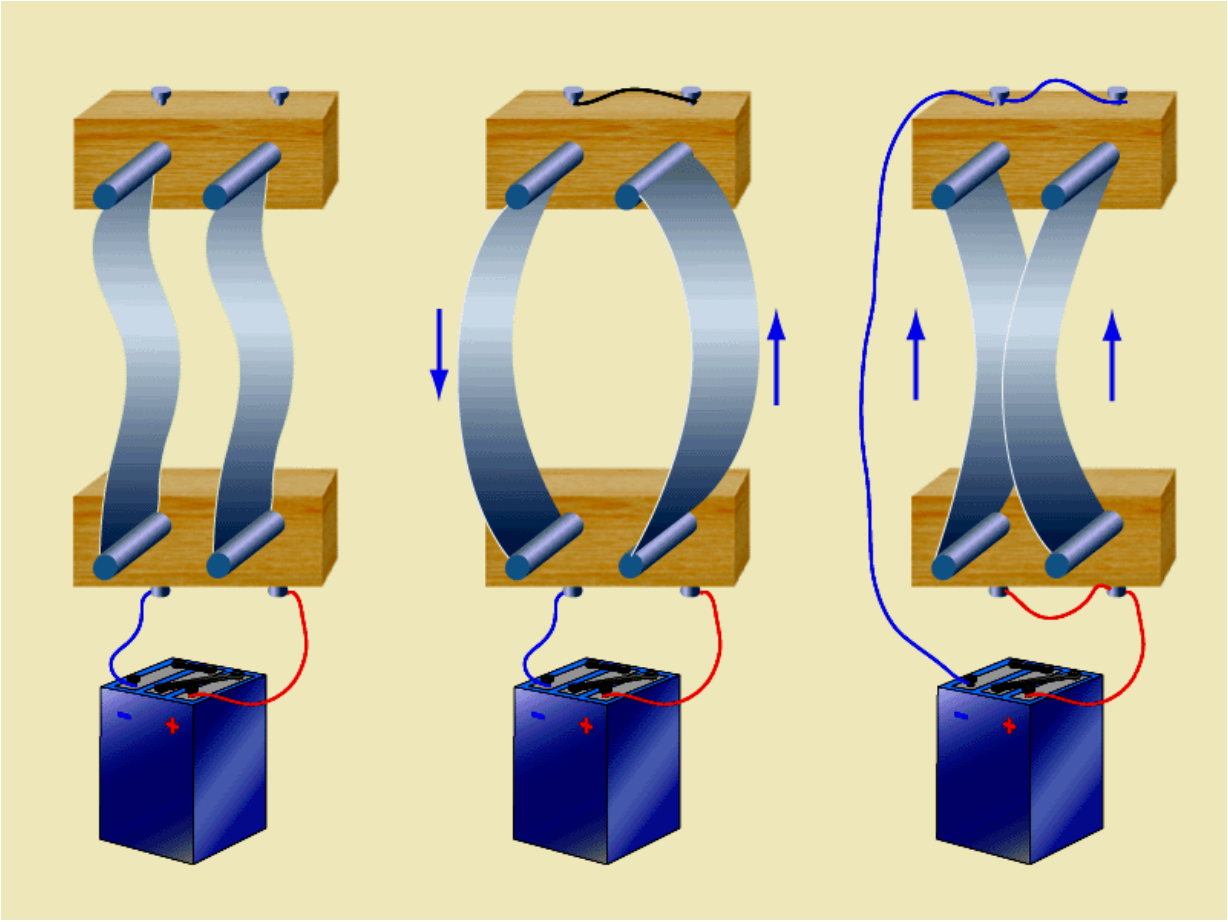
Ток жіңішке өткізгішпен ақсын $-\ \vec{j}dV = Id\vec{l}$

$$\mathrm{d}\vec{F} = I\left[d\vec{l}\times\vec{B}\right] \quad (14)$$

$\vec{v}$ – зарядтардың реттелген қозғалысының жылдамдығы

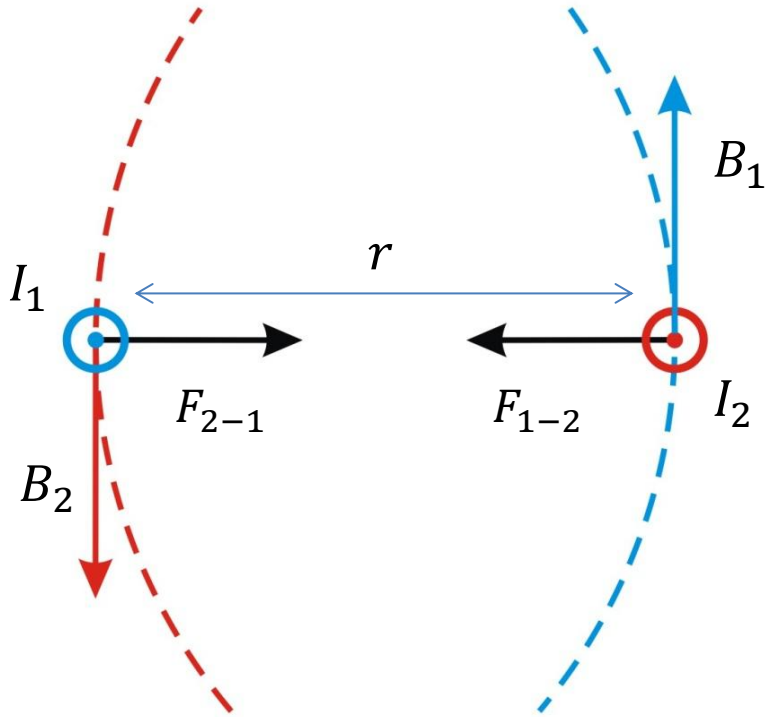
Қорытқы Ампер күші,
вакуумдағы тогы бар параллель өткізгіштердің әсерлесуі

$$\vec{F}_A = I\vec{l}\times\vec{B} \ (15) \qquad F_A = IlBsin\alpha \ (16)$$



$\alpha - B$ және l векторлары арасындағы бұрыш

Қорытқы Ампер күші,
вакуумдағы тогы бар параллель өткізгіштердің әсерлесуі



13 сурет. Параллель токтардың көлденең қимасы

Түзу токтың магнит индукциясы:

$$B_1(r) = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{2I_1}{r} \quad (17)$$

$$d\vec{F}_{1-2} = I_2 d\vec{l} \times \vec{B}_1(r) \quad (18)$$

(17) → (18)

$$dF_{1-2} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{2I_1 I_2}{r} dl \quad (19)$$

$$F_{1-2} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{2I_1 I_2}{r} L \quad (20)$$

L – бірлік ұзындық; r – екі өткізгіштің ара-қашықтығы

Магнит өрісінің индукциясы

$$\vec{F}_A = I\vec{l}\times\vec{B} \quad (15)$$

$$F_A \sim I \cdot l$$

$$\frac{F_A}{I \cdot l} = const$$

Бұл қатынас ток күшіненде, өткізгіш ұзындығынанда тәуелсіз, және сол кеңістіктегі магнит өрісінің күштік, сонымен қатар мөлшерлік сипаттамасы болатын *магнит өрісінің индукциясы* деп аталатын векторлық шаманы береді:

$$\vec{B} \equiv \frac{\vec{F}_A}{I \cdot \vec{l}} \quad (21)$$

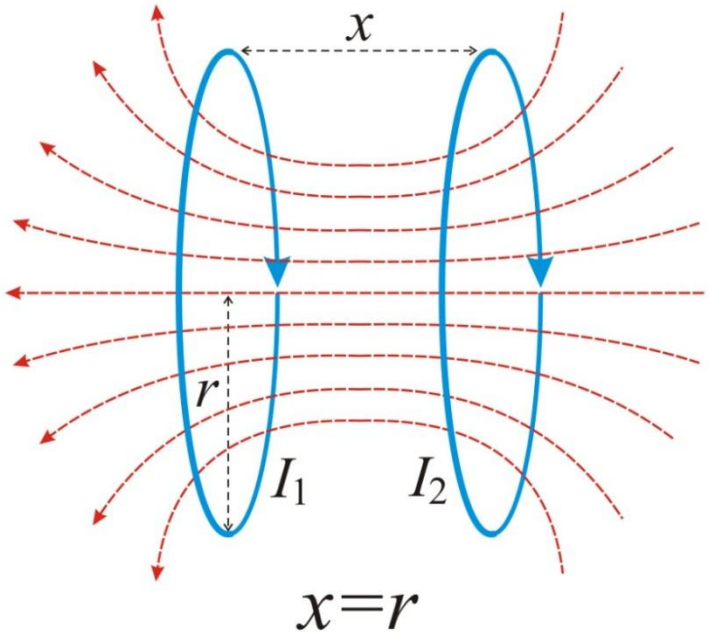
Магнит өрісіндегі тогы бар контурға әсер ететін Ампер күші

$$d\vec{F} = I[d\vec{l}\times\vec{B}] \ (14) \quad \Rightarrow \quad \vec{F}_A = I\oint[d\vec{l}\times\vec{B}] \ (22)$$

Егер магнит өрісі біркелкі болса: $\vec{F}_A = I\vec{B}\oint d\vec{l} = 0 \ (23)$

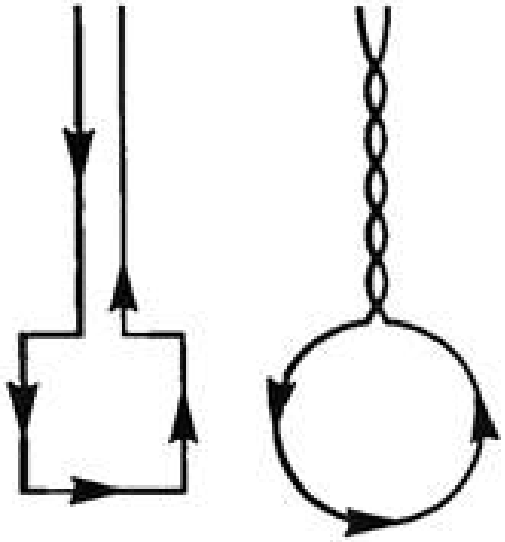


Герман фон Ге́льмго́льц
(1821-1894)



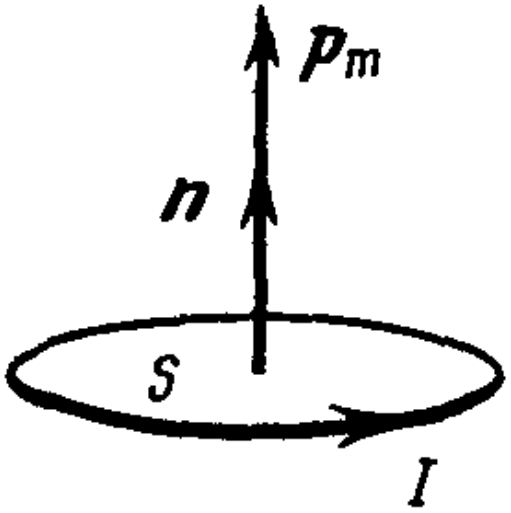
14 сурет. Гельмгольц катушкасы

Элементар контур, магниттік момент $(\vec{p}_m)$ арқылы сипатталады:



15а сурет. Өлшемі кіші, жалпақ, тогы бар контур – элементар контур

$$\vec{p}_m = IS\vec{n} \ (24)$$



15ә сурет. Нормаль бағыты оң бұранда ережесіне сәйкес анықталады

S –контур қамтып жатқан аудан; I – контур тогы

Магнит өрісіндегі тогы бар контурға әсер ететін Ампер күші

$$\vec{F}_A = I \oint [d\vec{l} \times \vec{B}] \quad (22)$$

$$\vec{F} = p_m \frac{\partial \vec{B}}{\partial n} \quad (25)$$

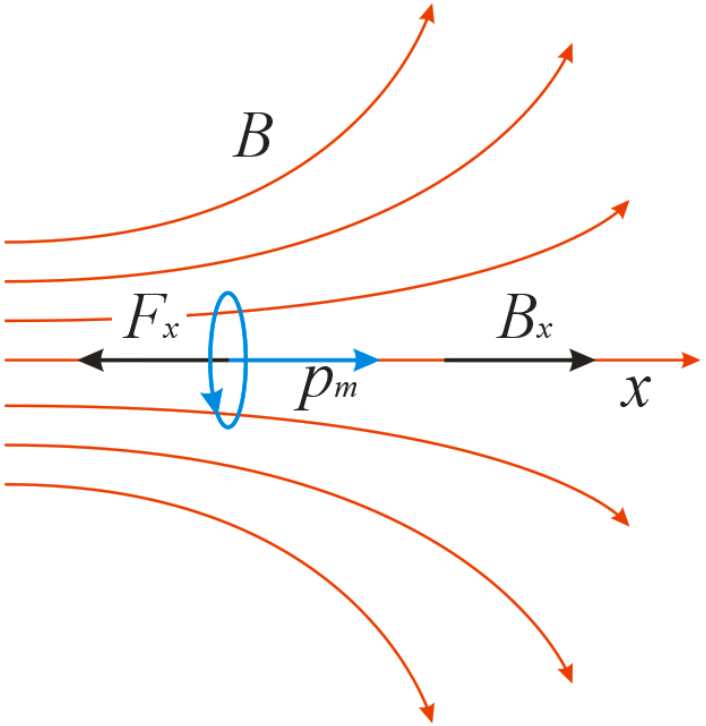
Дипольға әсер ететін күш: $\vec{F} = p \frac{\partial \vec{E}}{\partial n}$

Егер магнит өрісі біркелкі болса: $\vec{F} = p_m \frac{\partial \vec{B}}{\partial n} = 0 \ (26)$

p_m – контурдың магниттік моментінің модулі; $\frac{\partial \vec{B}}{\partial n}$ – нормаль бағыты бойынша $\vec{B}$ векторының туындысы

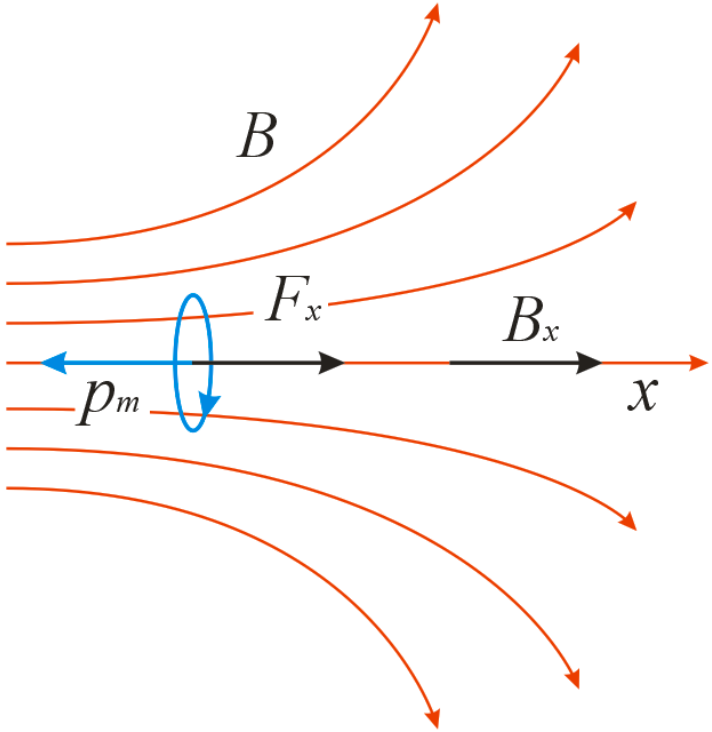
Ампер күшінің x өсіне проекциясы

$$-F_x = +p_m\left(-\frac{\partial B_x}{\partial n}\right)$$



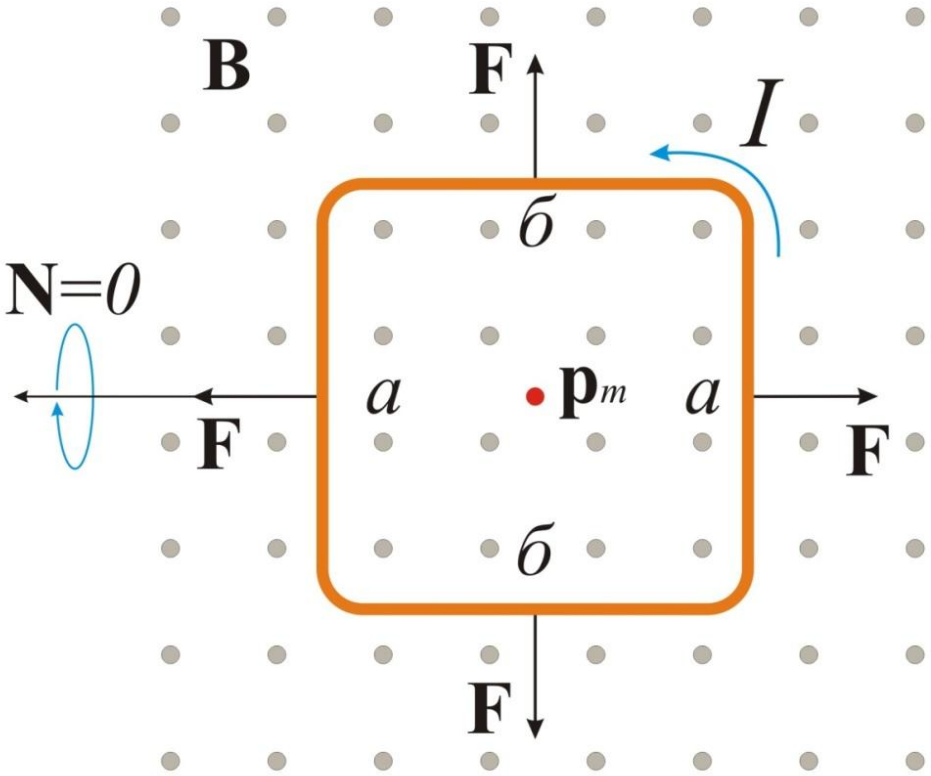
16а сурет

$$F_x = -p_m\left(-\frac{\partial B_x}{\partial n}\right)$$



16ә сурет

Тогы бар контурға әсер ететін күштер моменті



17 сурет. Егер кез-келген жүйеге әсер ететін суммалық күш нөлге тең болса, онда осы күштердің суммалық моменті, момент күші анықталатын нүкте орнынан тәуелсіз. Олай болса, әзірге тек амперлік күштердің қорытқы моменті туралы айтсақ болады.

Тогы бар контурға әсер ететін Амперлік күштің қорытқы моменті

Күш моменті

$$\vec{N} = [\vec{r} \times \vec{F}]$$

$$d\vec{F} = I[d\vec{l} \times \vec{B}] \quad (14)$$

$$\vec{N} = \oint [\vec{r} \times d\vec{F}] \quad (27)$$

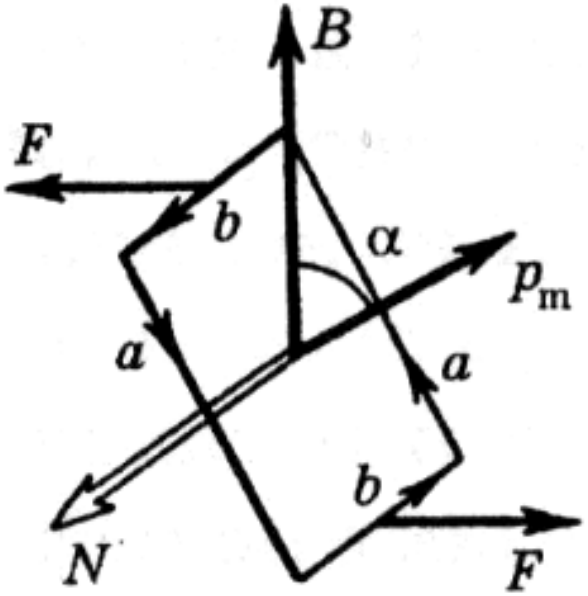
$$\vec{N} = [\vec{p}_m \times \vec{B}] \quad (28) \qquad \vec{N} \perp \vec{p}_m, \vec{B}$$

$$N = p_m B \sin\alpha \quad (29)$$

$\alpha - p_m$ және B векторлары араларындағы бұрыш. Егер $p_m \uparrow\uparrow B$ болса онда $N = 0$, бұл контурдың орнықты күйі. $p_m \uparrow\downarrow B$ болсада $N = 0$, бұл контурдың орнықсыз күйі, одан кішкене бұрышқа ауытқыса күш моменті пайда болып контурды $p_m \uparrow\uparrow B$ күйіне апарады.

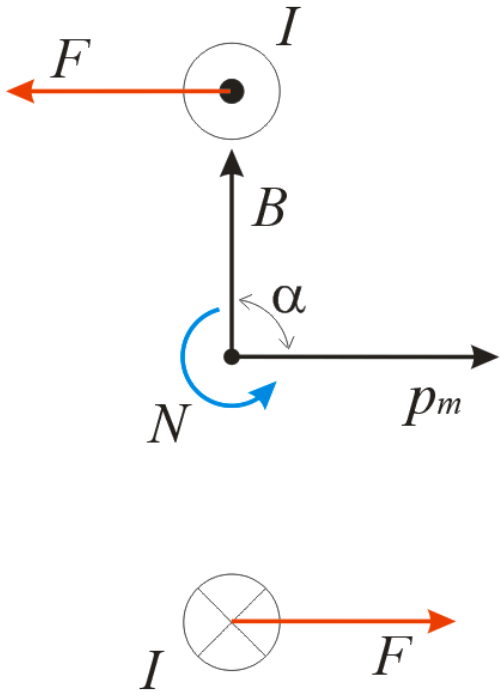
$r -$ иінтірек ұзындығы

Тогы бар контурға әсер ететін Амперлік күштің қорытқы моменті



18а сурет

$$F = IbB$$

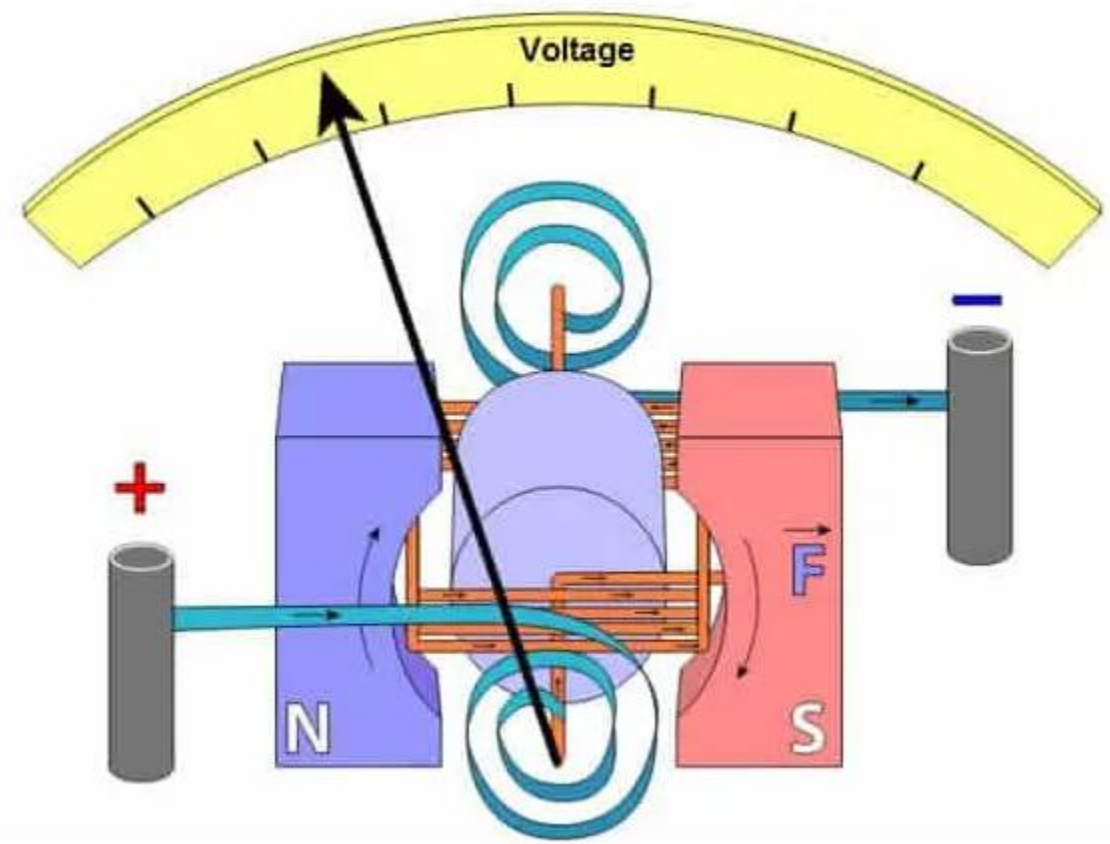


18ә сурет

$$N = IbB \cdot a \cdot sin\alpha = p_m B sin\alpha \quad (29)$$

$Iba = p_m$ – контурдың магниттік моменті

Стрелкалы аспаптың жұмыс істеу принципі



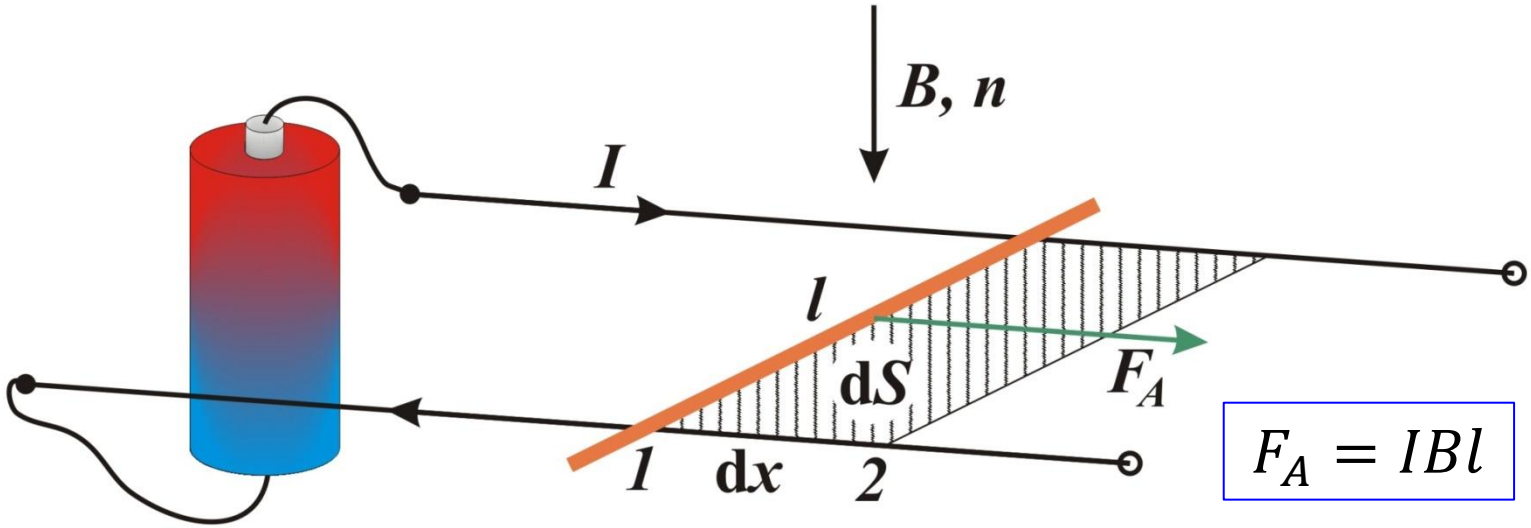
$$N_{\text{А}} = ISNB \ (30)$$

$$N_{\text{серп.}} = k\alpha \ (31)$$

$$N_{\text{А}} = N_{\text{серп.}} \ (32) \quad ISNB = k\alpha (33) \quad \alpha = \frac{ISNB}{k} \ (34)$$

S – контурдың ауданы; N – орам саны; k – қатаңдық коэфф.; α – контурдың (стрелканың) ауытқу бұрышы

Магнит өрісінде орналасқан тогы бар контур бөлігін жылжыту кезіндегі Ампер күшінің жұмысы



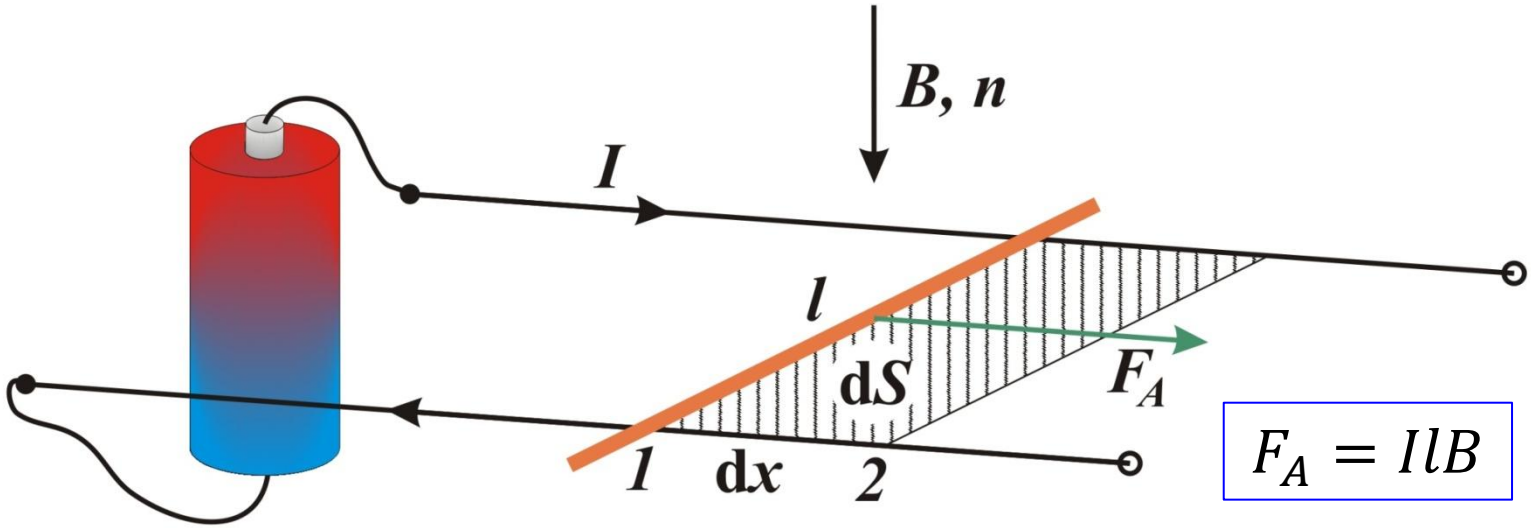
19 сурет

Контурдың l бөлігіне $F_A = IBl$ ампер күші әсер еіп, ол оң жаққа қарай dx-ке жылжығанда ампер күші оң жұмыс істейді. Осы кездегі элементар жұмыс:

$$\delta A = F_A dx = IBldx = IBdS = Id\Phi. \quad (35)$$

$d\Phi = BdS$ – магнит ағыны

Магнит өрісінде орналасқан тогы бар контур бөлігін жылжыту кезіндегі Ампер күшінің жұмысы



19 сурет

Ампер күшінің толық жұмысы:

$$A = \int_1^2 Id\Phi \quad (36)$$

Ток күші тұрақты болған кезде:

$$A = I(\Phi_2 - \Phi_1) \quad (37)$$

Φ_1 және Φ_2 – контур бөлігінің алғашқы және жылжып келген орындарындағы осы контур арқылы өтетін магнит ағындары