



Электротехниканың теориялық негіздері I

12-дәріс

Электромагнетизм, электромагниттік индукция және магнит тізбектерінің негізгі заңдары

Оқытушы: Мамадияров Максат Муратович, PhD, қауымдастырылған профессор

«Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар» кафедрасы

m.mamadiyarov@satbayev.university

01

Магнит өрісінің негізгі шамалары

02

Толық ток заңы; тогы бар өткізгіштің магнит өрісі

03

Электромагниттік күш; электромагниттік индукция заңы

04

Өздік индукция және индуктивтілік

05

Ферромагниттік материалдар: магниттелу қисығы, гистерезис

06

Магнит тізбектері: Ом және Кирхгоф заңдары, есептеу мысалы

07

Өзекшедегі шығындар; трансформатор принципі

Дәріс соңында студент:

1

Магнит өрісінің B , H , Φ , μ шамаларын және олардың байланысын түсіндіреді

2

Толық ток заңын қарапайым конфигурацияларға қолданады

3

Электромагниттік индукция заңы мен Ленц ережесін түсіндіреді

4

Ферромагниттік материалдардың магниттелу және гистерезис қасиеттерін сипаттайды

5

Ауа саңылауы бар магнит тізбегінің МҚК-сін есептейді

6

Трансформатордың ЭҚК формуласын қолданады

$$B = \mu_a H = \mu_0 \mu_r H, \quad \Phi = BS$$

Шама	Мағынасы	Өлшем бірлігі
B	магнит индукциясы — өрістің күштік сипаттамасы	Тл (тесла)
H	магнит өрісінің кернеулігі — өрісті тудыратын токпен байланысты	А/м
Φ	магнит ағыны — S бет арқылы өтетін индукция ағыны	Вб (вебер)
μ_0	магниттік тұрақты: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$	Гн/м
μ_r	салыстырмалы магниттік өтімділік (ауа — 1, электротехникалық болат — $10^3 \dots 10^4$)	—

ФИЗИКАЛЫҚ МАҒЫНАСЫ

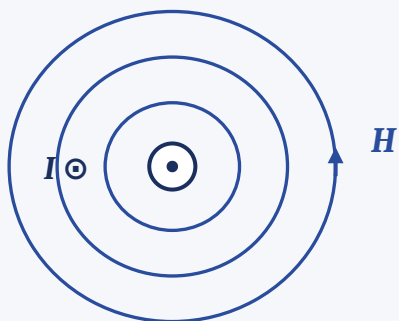
H ток арқылы анықталады (ортаға тәуелсіз), ал B ортаның қасиетін ескереді — ферромагнетикте ол мыңдаған есе күшейеді.

ҚОЛДАНЫЛУ ШАРТЫ

$\Phi = BS$ — өріс біркелкі және бетке перпендикуляр болғанда. Ағын ілінісу: $\Psi = w\Phi$.

Кез келген тұйық контур бойынша H векторының циркуляциясы осы контурмен қамтылған токтардың қосындысына тең: $\oint H dl = \Sigma I$

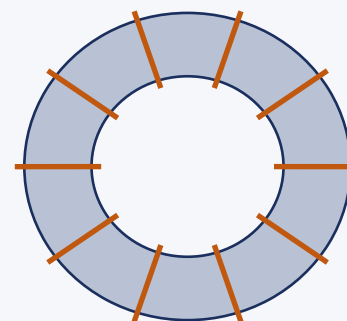
Түзу өткізгіш



$$H = I / (2\pi r)$$

- Күш сызықтары — концентрлі шеңберлер
- Бағыты **оң бұранда** ережесімен анықталады

Тороидтық орам



$$H = wI / l, \quad l = 2\pi r_{\text{орт}}$$

- Өріс тек өзекше ішінде
- wI — магнит қозғаушы күш (МҚК), F

Ампер күші

$$F = BIl \sin \alpha$$

- Магнит өрісіндегі тогы бар өткізгішке күш әсер етеді
- Бағыты **сол қол** ережесімен
- Электр қозғалтқыштарының жұмыс принципі
- α — ток пен B арасындағы бұрыш

Фарадей заңы

$$e = -d\Psi/dt = -w d\Phi/dt$$

- Ағын ілінісуі өзгергенде ЭҚК индукцияланады
- **Ленц ережесі**: индукциялық ток өзін тудырған ағын өзгерісіне қарсы әсер етеді («–» таңба)
- Қозғалатын өткізгіште: $e = Blv$ — генератор принципі

НЕГІЗГІ ОЙ

Бұл екі құбылыс — электр машиналарының негізі: қозғалтқыш ($F = BIl$) электр энергиясын механикалыққа, генератор ($e = Blv$) механикалықты электрге айналдырады.

Орамның өз тогы тудырған ағын ілінісуі токқа пропорционал; ток өзгергенде орамда өздік индукция ЭҚК-сі пайда болады:

$$\Psi = Li, \quad e_L = -L di/dt, \quad L = w^2/R_m = \mu_a w^2 S/l$$

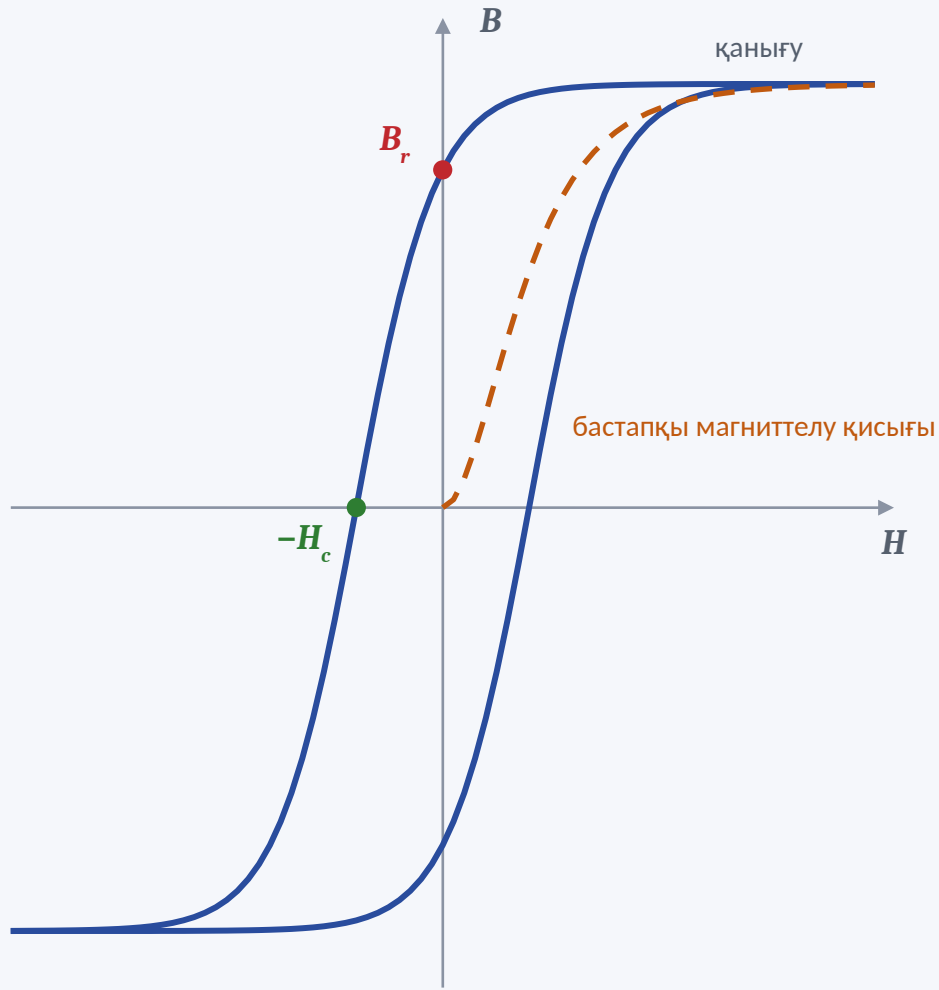
Шама	Мағынасы	Өлшем бірлігі
L	индуктивтілік	Гн (генри)
$\Psi = w\Phi$	ағын ілінісуі	Вб
$R_m = l/(\mu_a S)$	магнит кедергісі	А/Вб
$W_m = LI^2/2$	магнит өрісінің энергиясы	Дж

ФИЗИКАЛЫҚ МАҒЫНАСЫ

Индуктивтілік орам санының **квадратына** және өзекше өтімділігіне пропорционал.

ҚОЛДАНЫЛУ ШАРТЫ

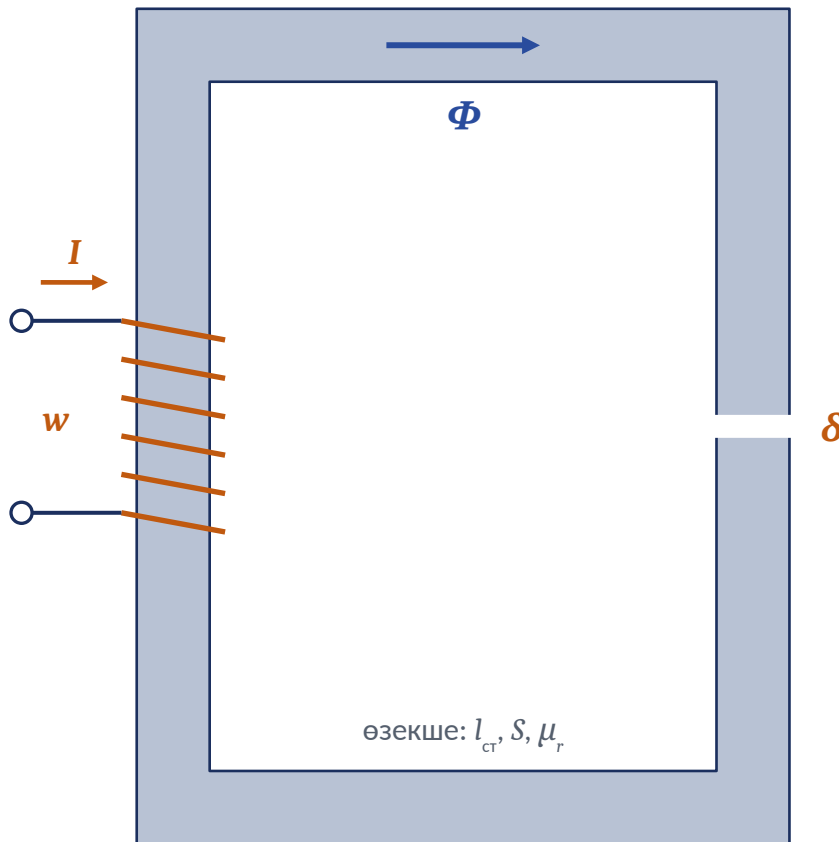
$L = \text{const}$ тек ауа немесе қанықпаған өзекше үшін; қанығуда L токқа тәуелді болады (сызықты емес элемент).



Негізгі ұғымдар

- **Қанығу** — H өскенде B іс жүзінде өспейді
- **Қалдық индукция** B_r — $H = 0$ болғандағы индукция
- **Коэрцитивтік күш** H_c — индукцияны нөлге келтіретін кернеулік
- **Жұмсақ** материалдар (электротехникалық болат): тар тұзақ, аз шығын
- **Қатаң** материалдар (тұрақты магниттер): кең тұзақ, үлкен H_c

Магнит тізбегі — магнит ағыны тұйықталатын ферромагнит өзекшелер мен ауа саңылауларының жиыны.



Құрамы

- **Орам** (w орам, I ток) — МҚК көзі: $F = wI$
- **Ферромагнит өзекше** — ағынды шоғырландырады
- **Ауа саңылауы δ** — магнит кедергісі үлкен бөлік
- Қолданылуы: трансформаторлар, электр машиналары, реле, электромагниттер

Магнит тізбегі мен электр тізбегінің ұқсастығы

Магнит тізбегі	Белгісі, бірлігі	Электр тізбегі	Белгісі, бірлігі
Магнит қозғаушы күш	$F = wI, A$	Электр қозғаушы күш	E, B
Магнит ағыны	$\Phi, B\delta$	Электр тогы	I, A
Магнит кедергісі	$R_m = l/(\mu_a S), A/B\delta$	Электр кедергісі	$R = \rho l/S, \text{Ом}$
Магнит кернеуі	$U_m = Hl, A$	Электр кернеуі	$U = IR, B$
Ом заңы	$\Phi = F/R_m$	Ом заңы	$I = E/R$
Кирхгофтың 1-заңы	$\Sigma\Phi = 0$	Кирхгофтың 1-заңы	$\Sigma I = 0$
Кирхгофтың 2-заңы	$\Sigma Hl = \Sigma wI$	Кирхгофтың 2-заңы	$\Sigma IR = \Sigma E$

НАЗАР АУДАРЫҢЫЗ

Айырмашылық: болаттың μ_r мәні H -қа тәуелді, сондықтан магнит тізбегі негізінен **сызықты емес** — есеп магниттелу қисығы бойынша шешіледі.

Мысал: ауа саңылауы бар магнит тізбегі



БЕРІЛГЕНІ

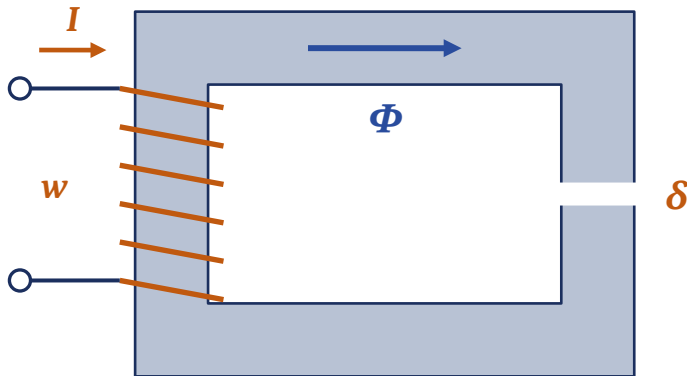
$$l_{\text{ст}} = 0,5 \text{ м}, S = 4 \text{ см}^2, \mu_r = 2000$$

$$\delta = 1 \text{ мм}, w = 500$$

қажет: $B = 1 \text{ Тл}$ (өзекше мен саңылауда)

ТАБУ КЕРЕК

Φ , МҚҚ F , ток I



ШЕШУІ

Ағын

1

$$\Phi = BS = 1 \cdot 4 \cdot 10^{-4} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}$$

Болаттағы магнит кернеуі

2

$$H_{\text{ст}} l_{\text{ст}} = B l_{\text{ст}} / (\mu_0 \mu_r) = 0,5 / (4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 2000) \approx 199 \text{ А}$$

Саңылаудағы магнит кернеуі

3

$$H_{\delta} \delta = B \delta / \mu_0 = 10^{-3} / (4\pi \cdot 10^{-7}) \approx 796 \text{ А}$$

Қажетті МҚҚ

4

$$F = 199 + 796 \approx 995 \text{ А}$$

Орам тогы

5

$$I = F/w = 995/500 \approx 2,0 \text{ А}$$

ЖАУАБЫ

$I \approx 2 \text{ А}$. 1 мм саңылауға МҚҚ-тің 80 %-ы жұмсалады!

Магнит тізбегін есептеудің тура және кері есептері



Болаттың $B(H)$ тәуелділігі сызықты емес, сондықтан есеп магниттелу қисығын пайдаланып шешіледі.



ЕСКЕРТУ

Практикада кері есеп компьютерде итерациялық әдіспен (мысалы, Ньютон әдісі) немесе ақырлы элементтер әдісімен (FEM) шешіледі.

Гистерезистік шығын

$$P_{\Gamma} \sim f B_m^n$$

Әр қайта магниттелу циклінде тұзақ ауданына пропорционал энергия жылуға айналады ($n \approx 1,6 \dots 2$). Жұмсақ материалдар қолданылады.

Құйынды токтар шығыны

$$P_{\kappa} \sim f^2 B_m^2 d^2$$

Өзгермелі ағын өзекше ішінде токтар индукциялайды. Өзекше оқшауланған жұқа табақтардан ($d = 0,27 \dots 0,5$ мм) жиналады.

Нәтиже

Болаттағы жалпы шығын $P_{\text{ст}} = P_{\Gamma} + P_{\kappa}$ бос жүріс тәжірибесінде өлшенеді және кернеуге (индукцияға) тәуелді, жүктемеге іс жүзінде тәуелсіз.

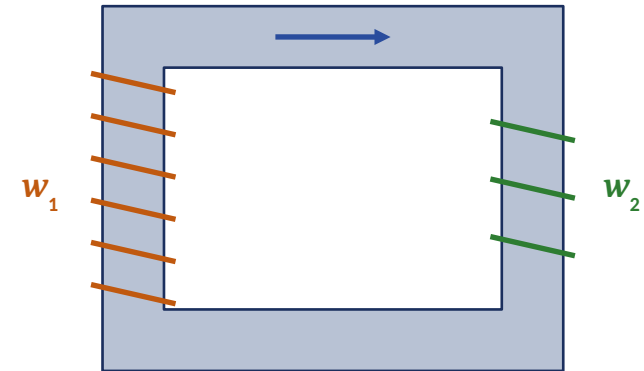
Трансформатор: жұмыс принципі

Бірінші ретті орамның айнымалы тогы өзекшеде ортақ ағын $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$ тудырады; ол екі орамда ЭҚК индукциялайды:

$$E = 4,44 f w \Phi_m$$

$$n = w_1 / w_2 \approx U_1 / U_2 \approx I_2 / I_1$$

Шама	Мағынасы	Өлшем бірлігі
E	орамдағы ЭҚК-тің әсерлік мәні	В
Φ_m	ағынның амплитудасы	Вб
n	трансформациялау коэффициенті	—



ФИЗИКАЛЫҚ МАҒЫНАСЫ

$4,44 = 2\pi / \sqrt{2}$: синусоидалы ағында $E = \omega w \Phi_m / \sqrt{2}$. Кернеу орам санына пропорционал.

ҚОЛДАНЫЛУ ШАРТЫ

Идеал трансформатор (шығынсыз, шашырау ағыны жоқ). Нақты трансформатордың орынбасу сұлбасы «Электротехниканың теориялық негіздері II» пәнінде қарастырылады.

Мысал: трансформатор орамдарын есептеу



БЕРІЛГЕНІ

$$U_1 = 220 \text{ В}, f = 50 \text{ Гц}$$

$$w_1 = 500$$

өзекше қимасы $S = 20 \text{ см}^2$

$$\text{қажет: } U_2 = 12 \text{ В}$$

ТАБУ КЕРЕК

$$\Phi_m, B_m, w_2$$

Электротехникалық болат үшін $B_m \approx 1,0 \dots 1,6$ Тл — нәтиже рұқсат етілген аймақта.

ШЕШУІ

Ағын амплитудасы

$$1 \quad \Phi_m = U_1 / (4,44 f w_1) = 220 / (4,44 \cdot 50 \cdot 500) \approx 1,98 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$$

Индукция амплитудасы

$$2 \quad B_m = \Phi_m / S = 1,98 \cdot 10^{-3} / (20 \cdot 10^{-4}) \approx 0,99 \text{ Тл}$$

Екінші орам саны

$$3 \quad w_2 = w_1 U_2 / U_1 = 500 \cdot 12 / 220 \approx 27,3 \Rightarrow 28 \text{ орам}$$

Трансформациялау коэффициенті

$$4 \quad n = 500 / 28 \approx 17,9$$

ЖАУАБЫ

$$\Phi_m \approx 2 \text{ мВб}, B_m \approx 1 \text{ Тл}, w_2 = 28 \text{ орам}$$

Электромагниттік реле мен контакторлар

Орам тогы өзекшені магниттеп, якорьді тартады — релелік қорғау мен автоматиканың негізгі элементі.

Трансформаторлар

Кернеуді түрлендіреді; өлшеуіш ток және кернеу трансформаторлары қорғаныс пен есептеуге сигнал береді.

Электр машиналары

Генераторлар ($e = Blv$) мен қозғалтқыштар ($F = BIl$); магнит тізбегінде ауа саңылауы міндетті.

Датчиктер

Холл датчиктері, индукциялық және трансформаторлық ток датчиктері магнит өрісін өлшеу арқылы тоқты анықтайды.



1 Магнит индукциясы B мен кернеулік H -тың физикалық айырмашылығы неде?

2 Неліктен ферромагнит өзекше магнит ағынын мыңдаған есе күшейтеді?

3 Ленц ережесі энергияның сақталу заңымен қалай байланысты?

4 Жұқа ауа саңылауы неге МҚК-тің басым бөлігін «алады»?

5 Магнит тізбегін электр тізбегі сияқты неге сызықты деп есептеуге болмайды?

6 Трансформатор өзекшесін неге тұтас болаттан емес, жұқа табақтардан жинайды?

7 Трансформатордың бірінші ретті кернеуін 20 %-ға арттырса, өзекшедегі индукция қалай өзгереді?

Қорытынды



Магнит өрісі B , H , Φ шамаларымен сипатталады: $B = \mu_0 \mu_r H$, $\Phi = BS$



Толық ток заңы $\oint H dl = \Sigma I$ магнит тізбегінің 2-заңының негізі: $\Sigma HI = \Sigma wI$



Фарадей заңы $e = -d\Psi/dt$ және Ленц ережесі — генераторлар, трансформаторлар және индуктивтіліктің негізі



Ферромагнетиктер қанығуымен және гистерезисімен сипатталады; өзекшеде гистерезис және құйынды токтар шығыны бар



Магнит тізбегі Ом ($\Phi = F/R_m$) және Кирхгоф заңдарымен есептеледі; ауа саңылауының магнит кедергісі өте үлкен

ӘДЕБИЕТ (силлабус бойынша)

[5] Floyd T. L., Buchla D. M. Principles of Electric Circuits, 10th ed. — 406–443 б.