

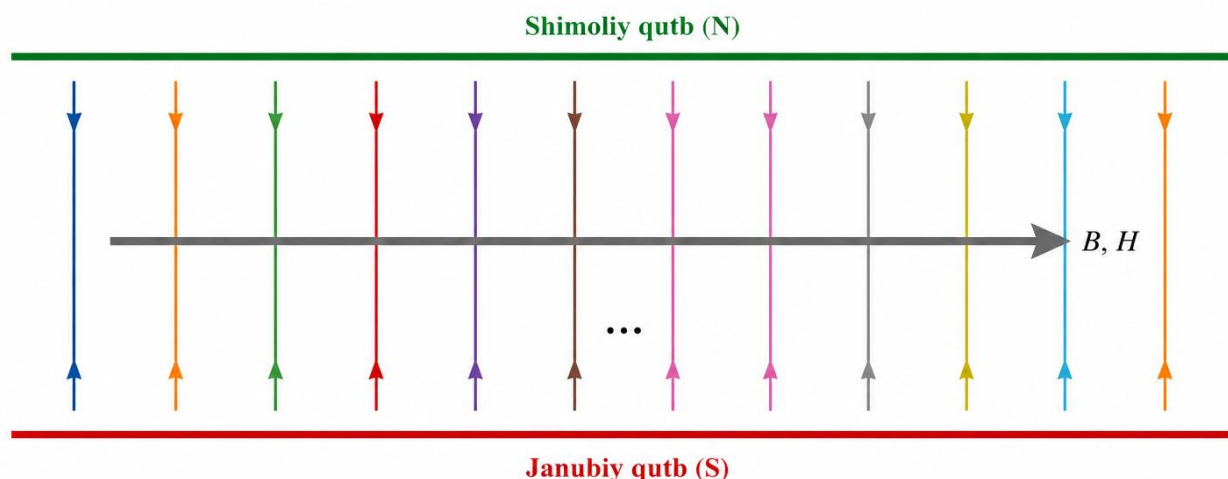
# MAGNIT MAYDON ENERGIYASI. INDUKTIVLIK, SOLENOID INDUKTIVLIGI, MAGNIT DOIMIYSI VA ENERGIYA ZICHLIGI

Magnit maydon energiyasi elektromagnit tizimlarda energiyaning maydon ko'rinishida saqlanishini ifodalaydi. Tokli g'altak, solenoid, elektromagnit va transformator o'zaklarida tok hosil qilgan magnit maydon ma'lum energiyaga ega. Induktivlik zanjirining magnit oqim bog'lanishini tok bilan bog'lovchi parametr bo'lib, o'zinduksiya, o'tkinchi jarayonlar va energiya saqlanishini tavsiflashda markaziy o'rin tutadi.

## Darsning maqsadi

Induktivlikning fizik mazmunini, solenoid induktivligini bosqichma-bosqich keltirib chiqarish, vakuum magnit doimiysi  $\mu_0$  va muhitning magnit singdiruvchanligi  $\mu = \mu_0 \mu_r$  ni farqlash, induktor energiyasi  $W = LI^2/2$  hamda magnit maydon energiya zichligi  $w = BH/2$  formulalarini ilmiy asosda tushuntirish va hisoblash misollarida qo'llash.

## N o'ramli uzun solenoid



$\rightarrow B$  — magnit induksiya vektori  
 $H$  — magnit maydon kuchlanganligi vektori  
 $N$  — solenoid o'ramlar soni (o'tkazgichlar soni)

O'tkazgichlardan tok o'tganda solenoid ichida magnit maydon bir jinsli (deyarli o'zgarmas) bo'ladi va o'q yo'nalishida yo'nalgan.

### Uzun solenoid ichidagi maydon:

$$B = \mu_0 \mu n I \quad (\text{T})$$

$n = \frac{N}{l}$  — o'ramlar zichligi (1/m)  
 $I$  — tok (A),  $\mu_0$  — vakuum magnit doimiysi,  
 $\mu$  — muhitning nisbiy magnit o'tkazuvchanligi.

*1-rasm. Uzun solenoid ichidagi deyarli bir jinsli magnit maydon*

|                        |                |                  |
|------------------------|----------------|------------------|
| Kattalik               | Belgi          | SI               |
| Induktivlik            | $L$            | H                |
| Magnit oqimi           | $\Phi$         | Wb               |
| Oqim bog'lanishi       | $\Psi = N\Phi$ | Wb·o'ram         |
| Magnit induksiya       | $B$            | T                |
| Maydon kuchlanganligi  | $H$            | A/m              |
| Vakuum magnit doimiysi | $\mu_0$        | H/m              |
| Energiya zichligi      | $w$            | J/m <sup>3</sup> |

## 1. Induktivlik tushunchasi

Tok o'tayotgan kontur o'z magnit maydonini hosil qiladi. Chiziqli magnit muhitda kontur bilan bog'langan magnit oqim tokka proporsional. N o'ramli g'altak uchun oqim bog'lanishi  $\Psi = N\Phi$  bo'lib, induktivlik quyidagicha aniqlanadi:

$$L = \Psi/I = N\Phi/I$$

Induktivlikning SI birligi genri (H). Agar tok 1 A bo'lganda oqim bog'lanishi 1 Wb·o'ram bo'lsa,  $L=1$  H.

Tok vaqt bo'yicha o'zgarganda o'zinduksiya EYuK hosil bo'ladi:

$$\varepsilon_L = -d\Psi/dt$$

L doimiy bo'lsa:

$$\varepsilon_L = -L dI/dt$$

Induktivlik zanjirning tok o'zgarishiga elektromagnit inertligini tavsiflaydi; u geometriya, o'ramlar soni va magnit muhitga bog'liq.

### 1-misol

$N=500$  o'ramli g'altakda  $I=2$  A tokda har bir o'ram orqali  $\Phi=0.8$  mWb oqim o'tsa,  $\Psi=N\Phi=0.4$  Wb·o'ram va  $L=\Psi/I=0.20$  H.

### 2-misol

$L=0.50$  H g'altakdagi tok 0.02 s ichida 1 A dan 5 A gacha o'zgarsa,  $|\varepsilon_L|=L\Delta I/\Delta t=0.5\times 4/0.02=100$  V.

## 2. Solenoidning induktivligini keltirib chiqarish

Uzunligi l, kesim yuzi S, N o'ramli uzun solenoidda birlik uzunlikdagi o'ramlar soni  $n=N/l$ . Chekka effektlar e'tiborga olinmasa, Amper qonunidan solenoid ichidagi maydon:

$$H = nI = (N/l)I$$

Chiziqli muhitda  $B=\mu H$ :

$$B = \mu(N/l)I$$

Har bir o'ram orqali magnit oqim:

$$\Phi = BS = \mu(N/l) I S$$

Oqim bog'lanishi  $\Psi=N\Phi$ :

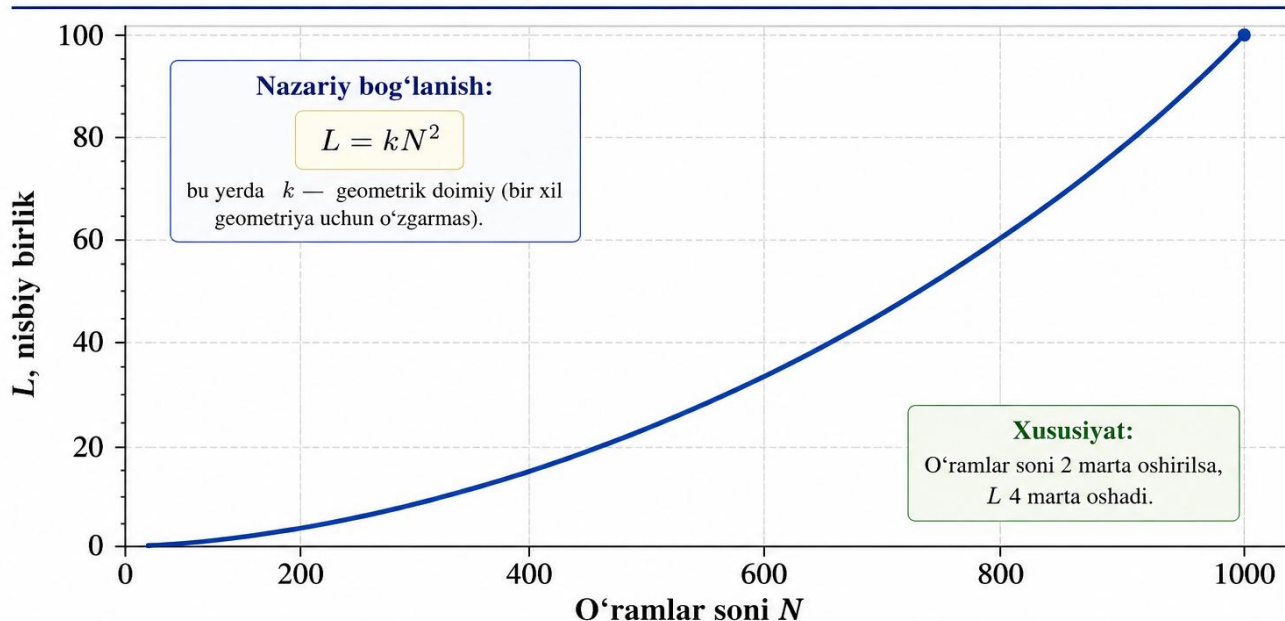
$$\Psi = \mu N^2 S I / l$$

$L=\Psi/I$  ta'rifidan:

$$L = \mu N^2 S / l$$

Vakuum yoki havoda  $\mu\approx\mu_0$ ; magnit o'zakli chiziqli solenoidda  $\mu=\mu_0\mu_r$ .

## Bir xil geometriyada Solenoid induktivligi $L \propto N^2$



|                                                                                                                                                                       |                                       |                                       |                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|
| <b>Izoh:</b><br>Agar solenoidning uzunligi $l$ , kesim yuzasi $S$ ,<br>o'ramlar zichligi $n = \frac{N}{l}$ va magnit o'tkazuvchanligi<br>$\mu$ doimiy bo'lsa, u holda | <b><math>N</math> (o'ramlar soni)</b> | <b><math>L</math> (nisbiy birlik)</b> | <b><math>L/N^2</math></b> |
|                                                                                                                                                                       | 100                                   | 1                                     | $1.0 \times 10^{-4}$      |
|                                                                                                                                                                       | 200                                   | 4                                     | $1.0 \times 10^{-4}$      |
|                                                                                                                                                                       | 400                                   | 16                                    | $1.0 \times 10^{-4}$      |
|                                                                                                                                                                       | 600                                   | 36                                    | $1.0 \times 10^{-4}$      |
|                                                                                                                                                                       | 800                                   | 64                                    | $1.0 \times 10^{-4}$      |
|                                                                                                                                                                       | 1000                                  | 100                                   | $1.0 \times 10^{-4}$      |

2-rasm. Solenoid induktivligining o'ramlar soni kvadratiga proporsional o'sishi

### 3-misol

$N=1000$ ,  $l=0.50$  m,  $S=4$  cm<sup>2</sup> va havo o'zakli solenoid uchun  $L=\mu_0 N^2 S/l \approx 1.01$  mH.

### 3. Magnit doimiysi va magnit singdiruvchanlik

Vakuum magnit doimiysi  $\mu_0$  elektromagnit tenglamalarda vakuumdagi  $B$  va  $H$  ni bog'lovchi fundamental konstanta sifatida qatnashadi. SI tizimining 2019-yildan keyingi ta'rifida  $\mu_0$  aniq belgilangan son emas, tajriba bilan aniqlanadigan konstanta bo'lib, qiymati  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m ga nihoyatda yaqin. Darslik hisoblarida odatda  $\mu_0 \approx 1.256637 \times 10^{-6}$  H/m olinadi.

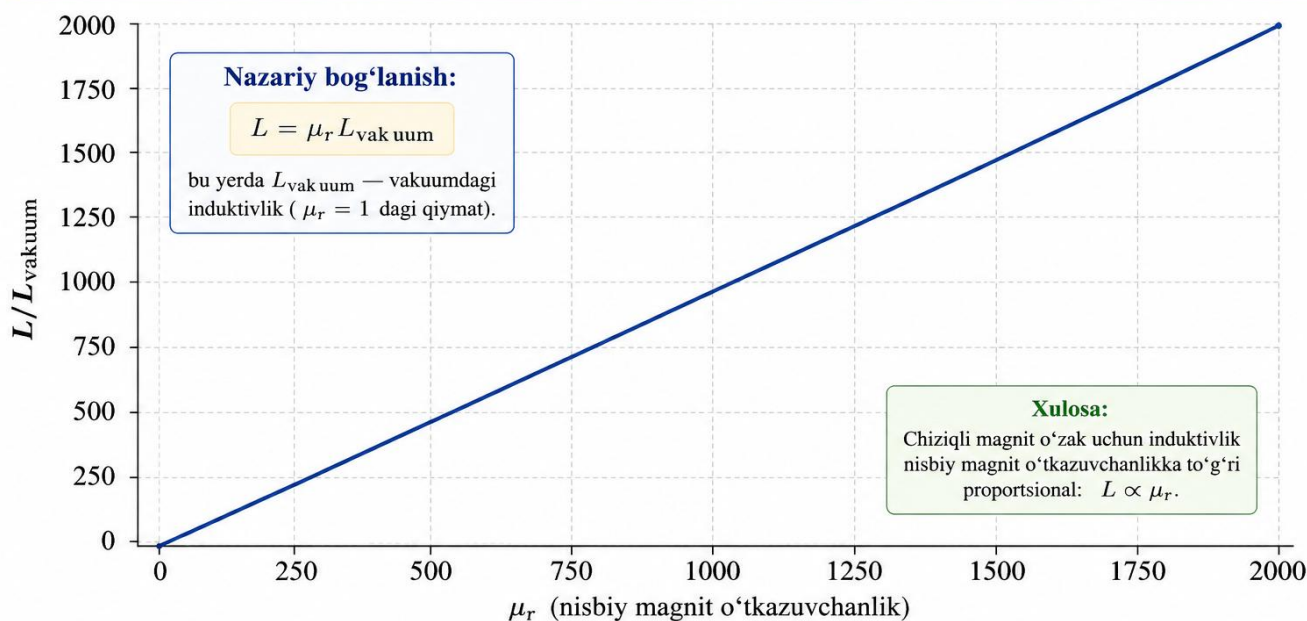
$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (\text{vakuumda})$$

Chiziqli izotrop muhitda:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H}$$

Bu yerda  $\mu_r$  - nisbiy magnit singdiruvchanlik. Dia- va paramagnitlarda  $\mu_r$  birlikka juda yaqin; ferromagnitlarda esa  $\mu_r$  katta va odatda  $H$  ga bog'liq, shu sababli  $L$  ham tokka bog'liq bo'lishi mumkin.

## Chiziqli o'zakda induktivlikning $\mu_r$ ga bog'liqligi



### Belgilar va birliklar:

$L$  — induktivlik (H)  
 $L_{\text{vakuum}}$  — vakuumdagi induktivlik (H)  
 $\mu_r$  — nisbiy magnit o'tkazuvchanlik (o'lchamsiz)

### Chiziqli magnit o'zak uchun:

$$L = \mu_r L_{\text{vakuum}}$$

Agar  $\mu_r = 1000$ ,  $L = 1000 L_{\text{vakuum}}$  bo'ladi.

### Namunaviy qiymatlar ( $L_{\text{vakuum}} = 1 \text{ H}$ uchun)

| $\mu_r$ | $L/L_{\text{vakuum}}$ |
|---------|-----------------------|
| 0       | 0                     |
| 500     | 500                   |
| 1000    | 1000                  |
| 1500    | 1500                  |
| 2000    | 2000                  |

3-rasm. Chiziqli modelda solenoid induktivligining  $\mu_r$  ga proporsional o'zgarishi

| Muhit       | $\mu_r$ ning xususiyati | Induktivlikka ta'siri     |
|-------------|-------------------------|---------------------------|
| Vakuum/havo | $\approx 1$             | Bazaviy $L$               |
| Diamagnit   | 1 dan biroz kichik      | $L$ juda oz kamayadi      |
| Paramagnit  | 1 dan biroz katta       | $L$ juda oz ortadi        |
| Ferromagnit | katta, nochiziqli       | $L$ keskin ortishi mumkin |

## 4. Magnit maydon energiyasining kelib chiqishi

Induktorda tokni oshirish uchun manba o'zinduksiya EYuKiga qarshi ish bajaradi. Zanjir tenglamasida induktiv kuchlanish  $u_L = L \, dI/dt$ .  $dt$  vaqt ichida manbaning induktiv qismga bergan elementar energiyasi:

$$dW = u_L I \, dt$$

$u_L = L \, dI/dt$  ni qo'ysak:

$$dW = L I \, dI$$

Tokni 0 dan  $I$  gacha oshirib integrallaymiz:

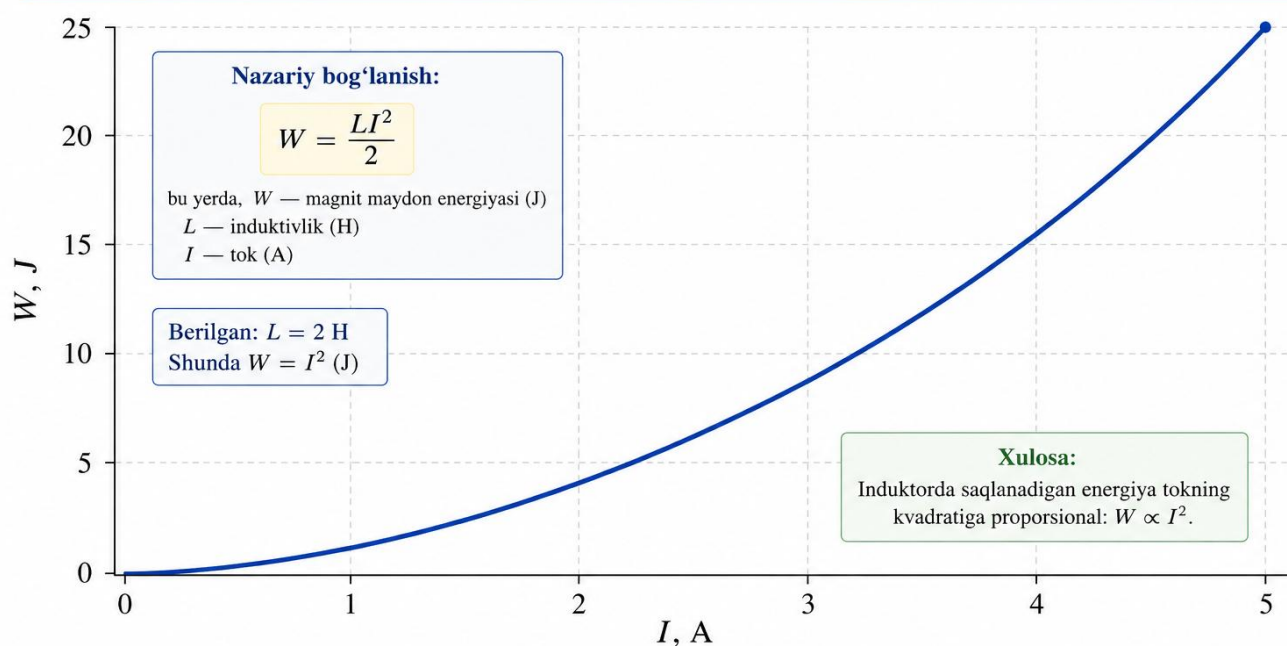
$$W_m = \int_0^I L I \, dI$$

$L$  doimiy bo'lgan chiziqli induktor uchun:

$$W_m = \frac{1}{2} L I^2$$

Bu energiya rezistordagi kabi issiqlikka darhol sarflanmaydi; ideal induktorda magnit maydonda saqlanadi va tok kamayganda zanjirga qaytarilishi mumkin.

$$L = 2 \text{ H induktorda } W = \frac{LI^2}{2}$$



**$L = 2 \text{ H}$  uchun nazariy qiymatlar**

| Tok $I$ , A                     | 0 | 1 | 2 | 3 | 4  | 5  |
|---------------------------------|---|---|---|---|----|----|
| Energiya $W = LI^2/2 = I^2$ , J | 0 | 1 | 4 | 9 | 16 | 25 |

4-rasm. Induktivlikda saqlanadigan energiyaning tok kvadratiga bog'liqligi

#### 4-misol

$L=2 \text{ H}$  induktordan  $I=3 \text{ A}$  tok o'tsa,  $W=LI^2/2=2 \times 9/2=9 \text{ J}$ .

#### 5. Magnit maydon energiya zichligi

Uzun solenoid uchun  $W=LI^2/2$  va  $L=\mu N^2 S/l$ . Solenoid hajmi  $V=Sl$ ,  $H=NI/l$ . Formulalarni almashtirsak:

$$W = 1/2 \cdot (\mu N^2 S/l) I^2$$

$$W = 1/2 \mu H^2 \cdot Sl$$

$V=Sl$  bo'lgani uchun birlik hajmdagi energiya:

$$w = W/V = 1/2 \mu H^2$$

$B=\mu H$  dan ekvivalent ko'rinishlar:

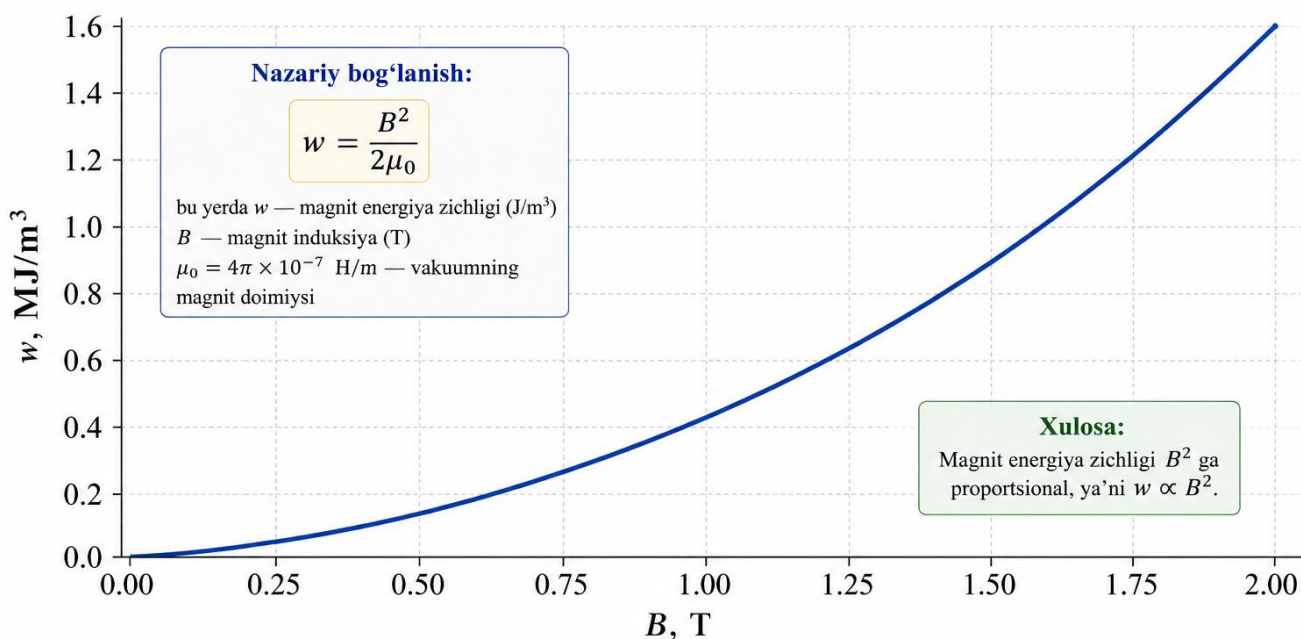
$$w = 1/2 BH = B^2/(2\mu)$$

Vakuumda:

$$w = B^2/(2\mu_0)$$



## Vakuumba magnit energiya zichligi $w = \frac{B^2}{2\mu_0}$



| Hisoblash uchun ba'zi qiymatlar ( $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ ) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $B \text{ (T)}$                                                               | 0     | 0.25  | 0.50  | 0.75  | 1.00  | 1.25  | 1.50  | 1.75  | 2.00  |
| $w \text{ (MJ/m}^3\text{)}$                                                   | 0.000 | 0.025 | 0.100 | 0.225 | 0.398 | 0.622 | 0.896 | 1.221 | 1.592 |

5-rasm. Vakuumba magnit energiya zichligining  $B^2$  ga bog'liqligi

### 5-misol

Vakuumba  $B=1.0 \text{ T}$  bo'lsa,  $w=B^2/(2\mu_0)\approx 3.98\times 10^5 \text{ J/m}^3=0.398 \text{ MJ/m}^3$ .

## 6. Solenoid energiyasi va hisoblash misollari

Solenoid uchun energiyani ikki xil usulda hisoblash mumkin: lumped parametr modeli  $W=LI^2/2$  yoki maydon modeli  $W=\int w \, dV$ . Ideal uzun solenoidda bu ikki natija aynan mos keladi. Bu moslik energiyaning induktivlik parametrda emas, fizik jihatdan magnit maydonda joylashganini ko'rsatadi.

### 6-misol

Havo o'zakli solenoid:  $N=800$ ,  $l=0.40 \text{ m}$ ,  $S=6\times 10^{-4} \text{ m}^2$ ,  $I=2 \text{ A}$ .  $L=\mu_0 N^2 S/l \approx 1.206 \text{ mH}$ .  $W=LI^2/2 \approx 2.41 \text{ mJ}$ .

Tekshirish:  $H=NI/l=4000 \text{ A/m}$ ,  $w=\mu_0 H^2/2 \approx 10.05 \text{ J/m}^3$ . Hajm  $V=Sl=2.4\times 10^{-4} \text{ m}^3$ .  $W=wV \approx 2.41 \text{ mJ}$  - natijalar mos.

### 7-misol

Xuddi shu geometriyada ideal chiziqli  $\mu_r=500$  o'zak kiritilsa,  $L$  nazariy jihatdan 500 marta ortib  $\approx 0.603 \text{ H}$  bo'ladi.  $I=0.5 \text{ A}$  da  $W \approx 0.0754 \text{ J}$ . Real ferromagnitda to'yinish sabab  $\mu_r$  doimiy bo'lmasligi mumkin.

### 8-misol

$L=0.10 \text{ H}$  induktorda energiya  $5 \text{ J}$  bo'lishi uchun  $I=\sqrt{2W/L}=\sqrt{100}=10 \text{ A}$ .

| Berilgan | Formula    | Natija yo'nalishi |
|----------|------------|-------------------|
| $L, I$   | $W=LI^2/2$ | Umumiy energiya   |

|              |                 |                       |
|--------------|-----------------|-----------------------|
| B, $\mu$     | $w=B^2/(2\mu)$  | Energiya zichligi     |
| N,S,l, $\mu$ | $L=\mu N^2 S/l$ | Solenoid induktivligi |
| W,L          | $I=\sqrt{2W/L}$ | Kerakli tok           |

## 7. Nochiziqli magnit muhitda energiya

Ferromagnit o'zakda B-H bog'lanish nochiziqli bo'lsa,  $\mu$  va L ni doimiy deb olish har doim to'g'ri emas. Umumiy holda magnit maydon energiya zichligi magnitlanish yo'li bo'yicha integral bilan aniqlanadi:

$$w = \int_0^B \mathbf{H}(\mathbf{B}') d\mathbf{B}'$$

Chiziqli muhitda  $H=B/\mu$  bo'lgani uchun integral  $B^2/(2\mu)$  ga keladi. Gisterezis mavjud materiallarda bir sikldagi energiya yo'qotishi B-H sirtmog'i yuzasi bilan bog'liq; demak saqlanadigan qaytar energiya va dissipativ yo'qotishni farqlash kerak.

Induktivlik ham sekant va differensial ko'rinishlarda qaralishi mumkin:

$$L_{\text{sec}} = \Psi/I$$

$$L_{\text{diff}} = d\Psi/dI$$

Kichik signal va o'tkinchi jarayon tahlilida differensial induktivlik muhim bo'lishi mumkin. Magnit o'zak to'yinganda  $dB/dH$  kamayadi, natijada differensial induktivlik ham kamayadi.

Shuning uchun amaliy elektromagnit qurilmalarni loyihalashda nominal tok, o'zak materiali, havo oralig'i, maksimal B va issiqlik yo'qotishlari birgalikda hisobga olinadi.

## 8. Darsni tashkil etish metodikasi

| Bosqich | Faoliyat                                                                                         |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1       | Tok uzilganda induktiv g'altakda nega kuchlanish impulsi paydo bo'lishi haqidagi muammoli savol. |
| 2       | $L=N\Phi/I$ ta'rifi orqali induktivlikning fizik mazmunini ochish.                               |
| 3       | $H=NI/l$ va $B=\mu H$ dan $L=\mu N^2 S/l$ ni bosqichma-bosqich chiqarish.                        |
| 4       | $\mu_0$ , $\mu$ va $\mu_r$ kattaliklarini birliklari bilan taqqoslash.                           |
| 5       | $dW=LI dI$ dan $W=LI^2/2$ formulani integrallash orqali chiqarish.                               |
| 6       | Solenoid modeli orqali $w=BH/2=B^2/(2\mu)$ energiya zichligini keltirib chiqarish.               |
| 7       | Bir masalani $W=LI^2/2$ va $W=wV$ bilan ikki usulda yechib natijalarni tekshirish.               |
| 8       | Ferromagnit o'zakdagi nochiziqlik va to'yinish cheklovlarini tahlil qilish.                      |

## Muammoli savollar

Nima uchun L o'ramlar soniga  $N^2$  bo'yicha bog'liq? Nima sababdan magnit o'zak solenoid induktivligini oshiradi? Induktor energiyasi qayerda saqlanadi? B bir xil bo'lganda  $\mu$  katta muhitda  $w=B^2/(2\mu)$  nima uchun kichikroq chiqadi? Ferromagnit to'yinganda

induktivlik nima sababdan kamayishi mumkin?  $\mu_0$  va  $\mu_r$  ning fizik va o'lchov jihatidan farqi nimada?

### Ko'p uchraydigan xatolar

$L=N\Phi/I$  formulada  $N$  ni unutish;  $\text{cm}^2$  ni  $\text{m}^2$  ga noto'g'ri o'tkazish;  $\mu$  va  $\mu_r$  ni aralashtirish;  $W=LI^2/2$  da tokni kvadratga oshirmaslik; energiya zichligini energiya bilan bir xil birlikda talqin qilish; ferromagnitda  $\mu_r$  ni barcha toklar uchun o'zgarmas deb olish; vakuum magnit doimiysini 'muhitning magnit doimiysi' bilan aynan bir tushuncha sifatida qo'llash.

## 9. Asosiy formulalar, mustaqil topshiriqlar va xulosa

| Formula                     | Mazmuni                                 |
|-----------------------------|-----------------------------------------|
| $L=N\Phi/I$                 | Induktivlik ta'rifi                     |
| $\varepsilon L=-L \, dI/dt$ | O'zinduksiya EYuK                       |
| $H=NI/l$                    | Uzun solenoid maydoni                   |
| $B=\mu H$                   | Chiziqli muhit                          |
| $L=\mu N^2 S/l$             | Solenoid induktivligi                   |
| $\mu=\mu_0\mu_r$            | Muhit singdiruvchanligi                 |
| $W=LI^2/2$                  | Induktor magnit energiyasi              |
| $w=BH/2$                    | Chiziqli muhit energiya zichligi        |
| $w=B^2/(2\mu)$              | Ekvivalent energiya zichligi            |
| $w=\int H \, dB$            | Nochiziqli muhit uchun umumiy ko'rinish |

### Mustaqil topshiriqlar

1.  $N=600$ ,  $\Phi=0.5 \text{ mWb}$  va  $I=1.5 \text{ A}$  bo'lsa,  $L$  ni hisoblang.
2.  $N=1200$ ,  $l=0.6 \text{ m}$ ,  $S=3 \text{ cm}^2$  havo o'zakli solenoid induktivligini toping.
3.  $L=0.25 \text{ H}$  va  $I=4 \text{ A}$  induktorda saqlangan energiyani hisoblang.
4. Vakuumda  $B=0.8 \text{ T}$  bo'lsa, magnit energiya zichligini aniqlang.
5. Solenoidda  $N$  ikki marta oshirilib, boshqa kattaliklar o'zgarmasa  $L$  va  $W$  qanday o'zgaradi?
6. Ferromagnit o'zak to'yinganda differensial induktivlikning kamayishini  $B$ - $H$  egri chizig'i asosida izohlang.

### Yakuniy xulosa

Induktivlik tokli zanjirning magnit oqim bog'lanishini tavsiflaydi va  $L=N\Phi/I$  bilan aniqlanadi. Uzun chiziqli solenoid uchun  $L=\mu N^2 S/l$  bo'lib, o'ramlar sonining kvadrati, kesim yuzi va magnit singdiruvchanlik ortishi induktivlikni oshiradi, uzunlik ortishi esa kamaytiradi. Tokni hosil qilishda bajarilgan ish magnit maydonda  $W=LI^2/2$  energiya ko'rinishida saqlanadi. Chiziqli muhitda uning zichligi  $w=BH/2=B^2/(2\mu)=\mu H^2/2$ . Vakuumda  $\mu=\mu_0$ . Real ferromagnitlarda  $\mu$  ning maydonga bog'liqligi, to'yinish va gisterezis sababli umumiy  $w=\int H \, dB$  ifodasi muhim ahamiyatga ega.

### Tavsiya etiladigan adabiyotlar

1. Griffiths D. J. Introduction to Electrodynamics. Cambridge University Press.
2. Halliday D., Resnick R., Walker J. Fundamentals of Physics. Wiley.
3. Young H. D., Freedman R. A. University Physics with Modern Physics. Pearson.
4. Purcell E. M., Morin D. Electricity and Magnetism. Cambridge University Press.