

ЕЛЕКТРОМАГНІТИЗМ ТА МАГНІТНІ КОЛА

План лекції

1. Магнітне поле і його характеристики.
2. Закони електромагнітного поля.
3. Магнітні кола електричних машин, трансформаторів та електричних апаратів.

1. Магнітне поле і його характеристики

Параметри магнітного поля

Магнітне поле

```
graph TD; A[Магнітне поле] --> B[Магнітна індукція (В)]; A --> C[Напруженість магнітного поля (Н)]; A --> D[Величина магнітного потоку (Ф)];
```

Магнітна
індукція
(В)

Напруженість
магнітного
поля (Н)

Величина
магнітного
потoku (Ф)

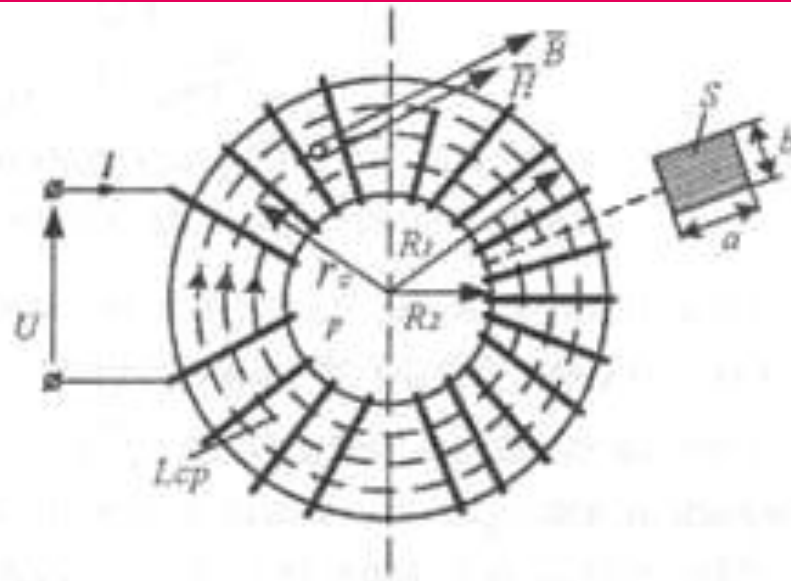
Магнітне поле

Магнітне поле – це один з проявів електромагнітного поля. Магнітне поле створюється рухомими електричними зарядами, а також змінним електричним полем.

Магнітні силові лінії є неперервними, тобто не мають ні початку, ні кінця, й утворюють замкнені контури. Це явище називається принципом неперервності магнітного потоку.



Магнітне поле струму
прямолінійного круглого провідника



Магнітне коло
замкнутого кільця

Рис. 1

Магнітна індукція

Магнітна індукція – це векторна величина, спрямована за напрямом магнітних ліній (від полюса N до полюса S) і є дотичною до силової лінії в кожній її точці.

$$\vec{F} = q[\vec{v} \times \vec{B}].$$

$$F = QBv \cos \alpha,$$

$$\vec{B} = \frac{\vec{F}}{Q\vec{v}} \quad \text{або} \quad B = \frac{F}{Qv \cos \alpha}.$$

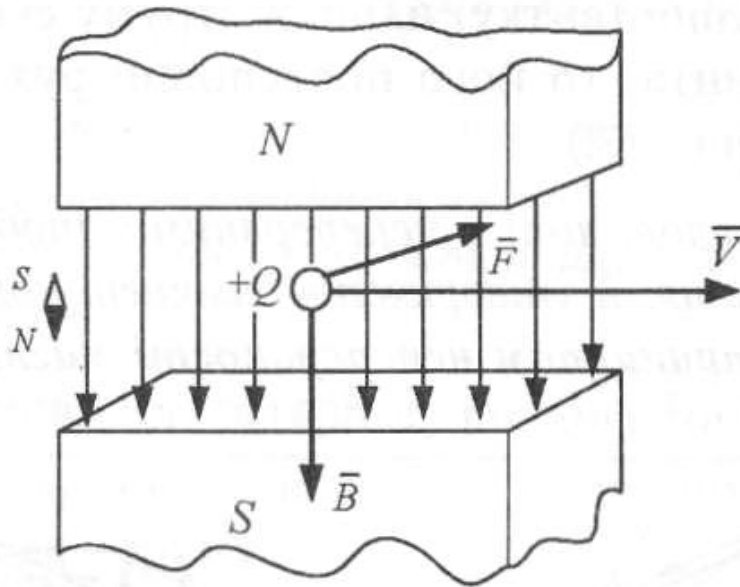


Рис. 2

7.3. Дія поля на електричний заряд, що рухається перпендикулярно до силових магнітних ліній

$$[B] = 1 \text{ Тл} = 1 \text{ Вб/м}^2 = 1 \text{ В} \cdot \text{с/м}^2$$

Магнітний потік

Магнітний потік – це потік вектора магнітної індукції крізь певну поверхню.

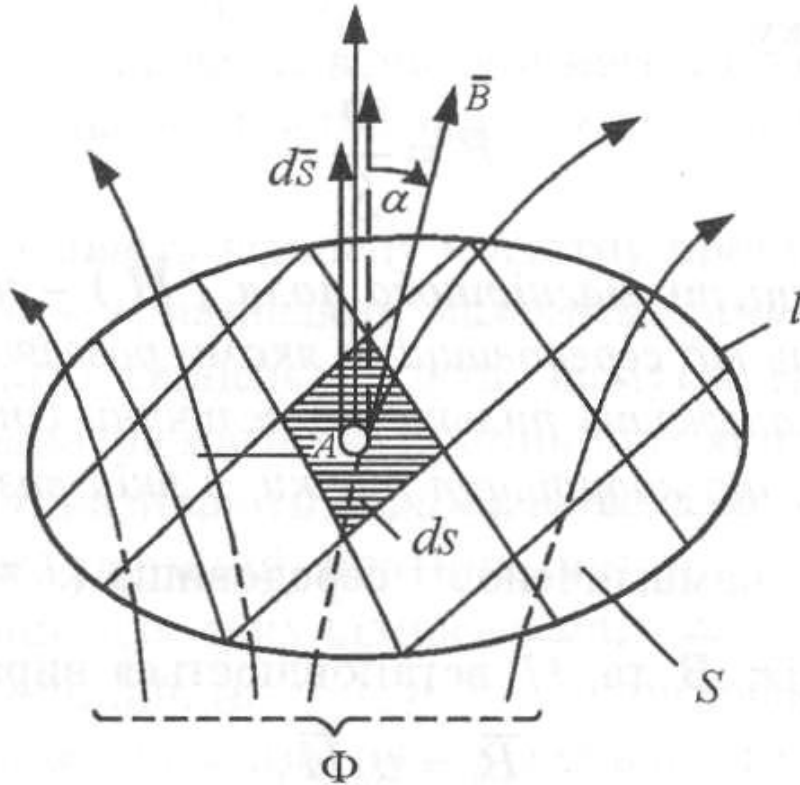


Рис. 3

По визначення магнітного потоку крізь поверхню S

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{s}.$$

$$\Phi = BS.$$

$$[\Phi] = [BS] = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2 = 1 \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} \cdot \text{м}^2 = 1 \text{ В} \cdot \text{с} = 1 \text{ Вб}.$$

Напруженість магнітного поля

Напруженість магнітного поля – це величина яка не залежить від середовища, в якому розглядається магнітне поле, а залежить тільки від величини струму, що створив це поле, та координат точки, в якій визначається H .

Напруженість магнітного поля – векторна величина, спрямована за напрямом магнітних ліній. Напрям вектора H визначають згідно з правилом правого гвинта відповідно до напрямку струму, який створює магнітне поле.

$$\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H},$$

Сумарний магнітний момент одиниці об'єму речовини називається намагніченістю J [А/м], який визначають стан речовини, набуває нею в результаті намагнічування.

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{J}) = \mu_0 \vec{H} (1 + \vec{J} / \vec{H}) = \mu_0 \vec{H} (1 + \kappa).$$

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H} = \mu_a \vec{H},$$

$$\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$$

$\mu_r = 1 + k$ називається
відносною магнітною
проникністю
 $\mu_a = \mu_0 \mu_r$ – називається
абсолютною магнітною
проникністю середовища

Пам`ятай!
Для вакууму $\mu_a \approx \mu_0$

Поділ речовини в залежності від μ_r

Речовини

```
graph TD; A[Речовини] --> B[Діамагнетики<br/>μ<sub>r</sub> < 1]; A --> C[Парамагнетики<br/>μ<sub>r</sub> > 1]; A --> D[Феромагнетики<br/>μ<sub>r</sub> >>> 1];
```

Діамагн
етики
 $\mu_r < 1$

Парамагн
етики
 $\mu_r > 1$

Феромагн
етики
 $\mu_r \gg \gg 1$

Петля гістерезису

Магнітні властивості феромагнітних матеріалів характеризують залежністю магнітної індукції від напруженості магнітного поля, яку знімають експериментально. Ця залежність утворює петлю гістерезису.

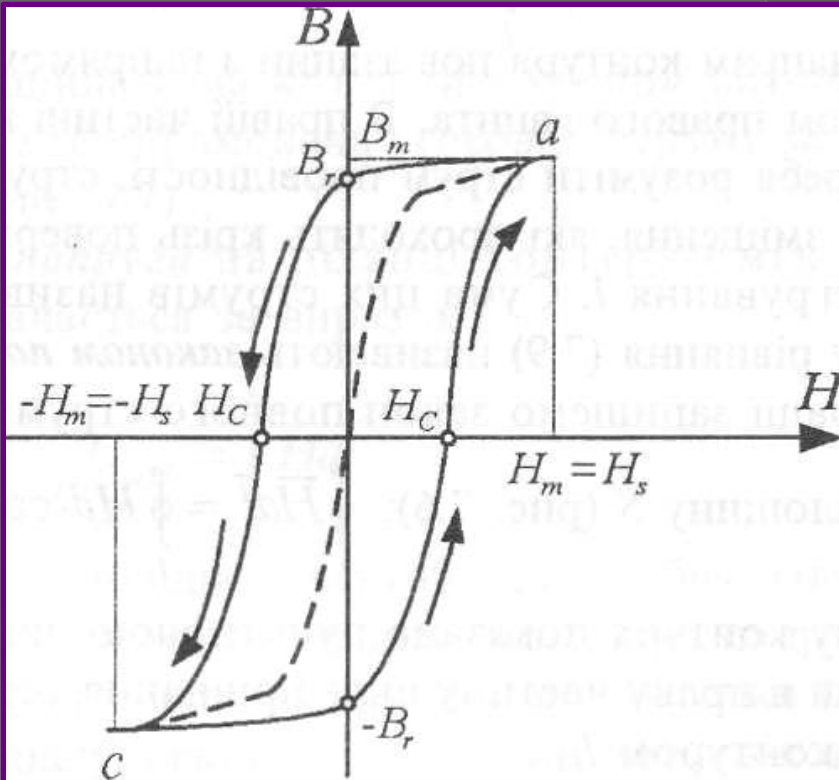


Рис. 5 Петля гістерезису та крива намагнічування

Пам`ятай

- Магнітний стан речовини завжди характеризується точкою (B, H) , котра лежить в середині петлі Гістерезису.
- При розрахунках електромагнітних кіл користуються середньою лінією, яку називають КРИВОЮ НАМАГНІЧУВАННЯ (пунктирна крива)
- Середовище магнітного поля характеризується магнітною проникністю μ_r , яка вказує на здатність середовища до намагнічування. Величина μ_r знімається експериментально й виражається залежністю $B=f(H)$, яку називають кривою намагнічування.
- Залежність між B і H описується виразом:

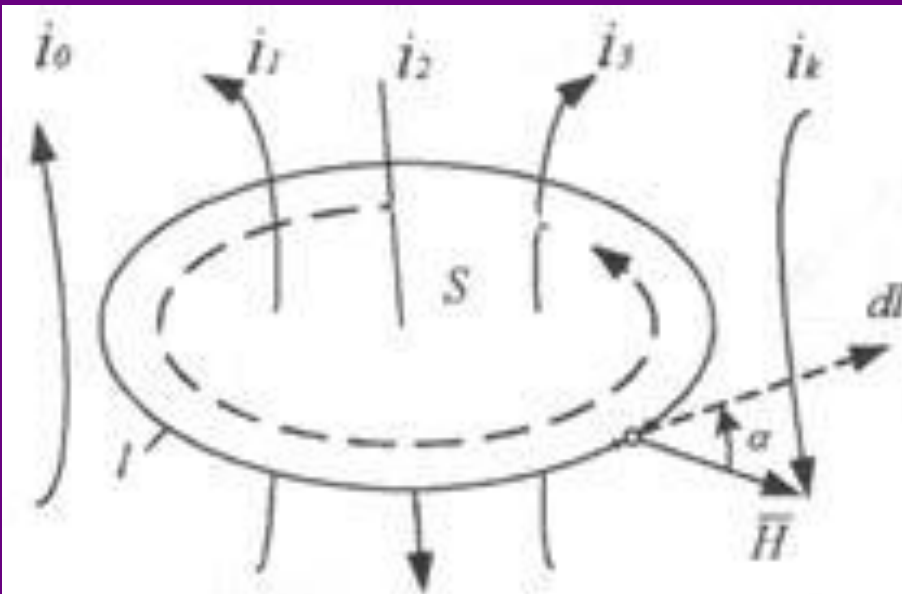
$$B = \mu_0 \mu_r H$$

2. Закони електромаг нітного кола



Закон повного струму

Лінійний інтервал вектора напруженості магнітного поля вздовж замкненого контура дорівнює електричному струму, що охоплюється цим контуром, тобто струму, який проходить крізь поверхню, що обмежується цим контуром.



До пояснення закону
повного струму

$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = \sum i$$

$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = \oint_l H dl \cos \alpha = i_1 - i_2 + i_3$$

$$\int_l \vec{H} d\vec{l} = W_1 i_1 - W_2 i_2.$$

Під магніторушійною силою (МРС) чи намагнічувальною силою розуміють величину Σi , що входить в праву частину рівняння й позначається літерою F .

$$F = \Sigma i$$

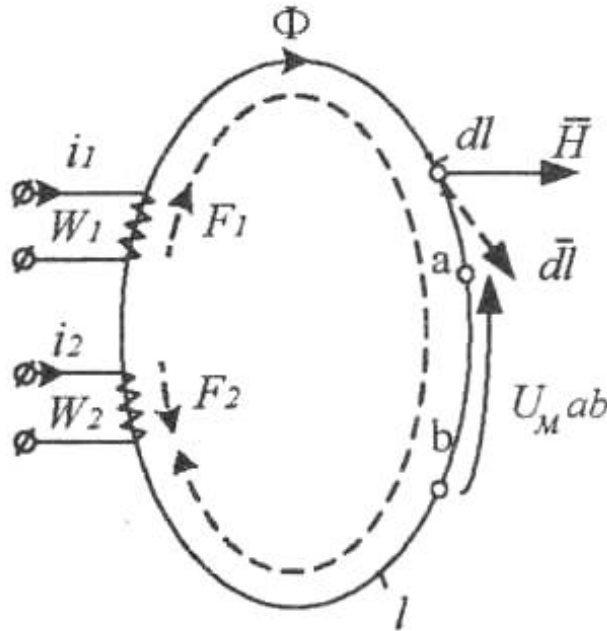


Рис. 7.7. Скерування магніторушійної сили та магнітної напруги

Магнітна напруга на ділянці контура l між точками a і b визначаються за виразом

Рис. 4

$$U_{Mab} = \int_a^b \vec{H} d\vec{l}.$$

$$[U_M] = [F] = 1 \text{ А.}$$

Закони Кірхгофа для магнітних кіл

Магнітне коло – це сукупність магніторушійних сил, феромагнітних сил, феромагнітних тіл, інших тіл чи середовищ, що утворюють шлях для замикання магнітного потоку.

Магнітний потік визначається за виразом:

$$\Phi = \frac{IW}{R_M} = \frac{F}{R_M}.$$

За аналогією з електричним колом, вираз називають законом Ома для магнітного кола, а величину

$$R_m = \frac{l_{cp}}{\mu_a S}$$

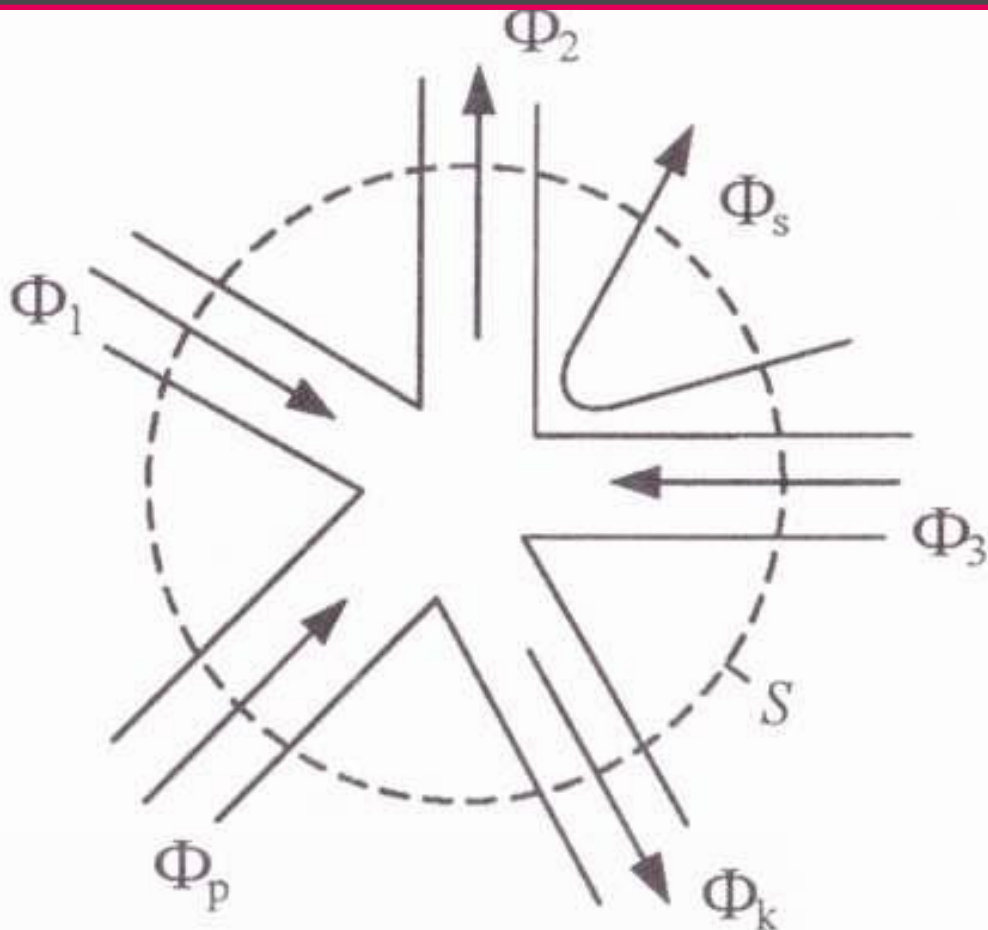
- магнітним опором магнітопровода довжиною l_{cp} , площею S та магнітною проникністю μ_a . R_m відповідає за аналогією електричному опоріві $R_E = l/(yS)$. Одиницею вимірювання магнітного опору в системі СІ є $[R_m] = 1 \text{ Гн}^{-1} = 1/(\text{Ом см})$.

Перший закон Кірхгофа для магнітного кола випливає з принципу неперервності магнітних силових ліній (магнітного потоку)

$$\oint_s \vec{B} d\vec{S} = \Phi_1 - \Phi_2 + \Phi_3 - \Phi_K + \Phi_P = 0$$

Або в загальному вигляді:

$$\sum_{k=1}^p \Phi_k = 0.$$



**Замкнута
поверхня S
охоплює
магнітний вузол**

Перший закон Кірхгофа для магнітного кола можна сформулювати так: алгебрична сума магнітних потоків, які належать до будь-якого вузла магнітного кола, дорівнює нулеві.

Другий закон Кірхгофа для магнітного кола формулюється так: алгебрична сума спадів магнітних напруг ($R_{mk} \Phi_k$) на окремих ділянках замкненого контура дорівнює алгебричній сумі магніторушійних сил ($w_k i_k$), що діють в цьому контурі:

$$\sum_{k=1}^p R_{mk} \Phi_k = \sum w_k i_k.$$

Цей закон може бути сформульовано й так: алгебрична сума магнітних напруг (U_m) і магніторушійних сил (F) в замкненому контурі дорівнює нулеві:

$$\sum_{k=1}^p U_{mk}, F_k = 0.$$

3. Магнітні кола електричних машин, трансформаторів та електричних апаратів

Магнітні кола із змінною намагнічувальною силою

В 1831 р. англійський фізик М. Фарадей відкрив явище виникнення електрорушійної сили в контурі, зчепленому із змінним магнітним потоком. Це явище отримало назву закону електромагнітної індукції. Індукована ЕРС пропорційна швидкості зміни магнітного потоку і кількості зчеплених з ним витків:

$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -W \frac{d\Phi}{dt},$$

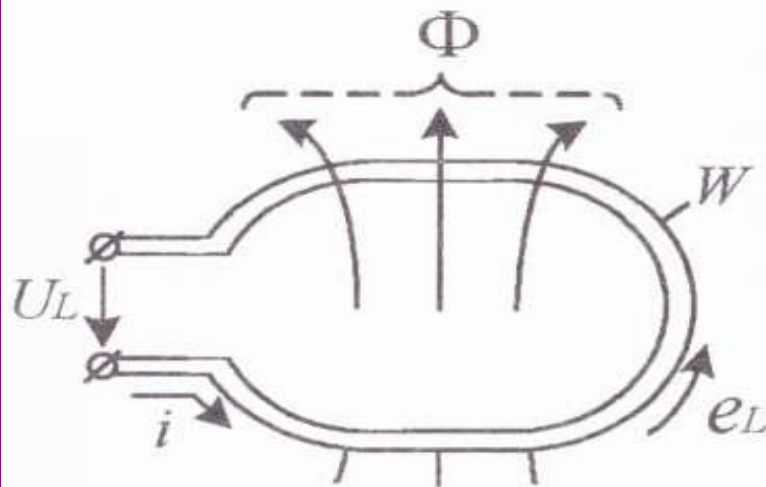
Де



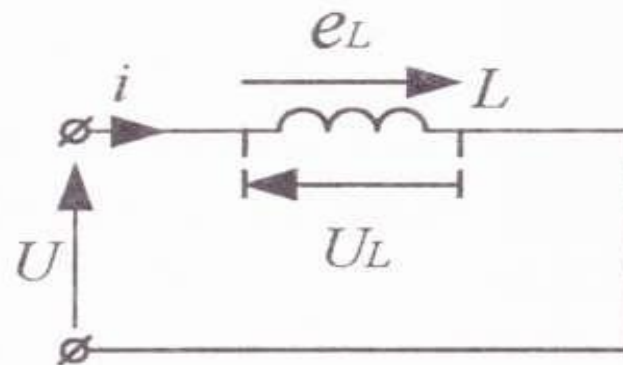
= WΦ – потокозчеплення котушки

Діюче значення ЕРС самоіндукції за умови синусоїдного магнітного потоку визначають за виразом:

$$E = 4,44 \Phi_m f W.$$



а)



б)

Рис.6 До визначення ЕРС самоіндукції котушки (а) та її скерування на схемі (б)

Змінний струм в котушці створює змінну магніторушійну силу $F=Wi$, яка збуджує змінний магнітний потік.

Явище наведення ЕРС в котушці змінним магнітним полем, збудженим власним струмом, називається самоіндукцією

ЕРС самоіндукції пропорційна індуктивності котушки L та швидкості зміни струму в ній:

$$e = -L \frac{di}{dt}$$

L – індуктивність котушки, яка визначається розмірами та формою котушки й залежить від магнітних властивостей середовища

Взаємна індуктивність

- Явище наведення ЕРС в будь-якому контурі (катушці) при зміні струму в іншому контурі (катушці) називається взаємодукуцією.
- Два контури або катушки є індуктивно або магнітно зв'язаними, якщо частина магнітного потоку, створеного струмом першого контура, пронизує другий контур, а частина магнітного потоку, викликаного струмом другого контура, пронизує перший контур.

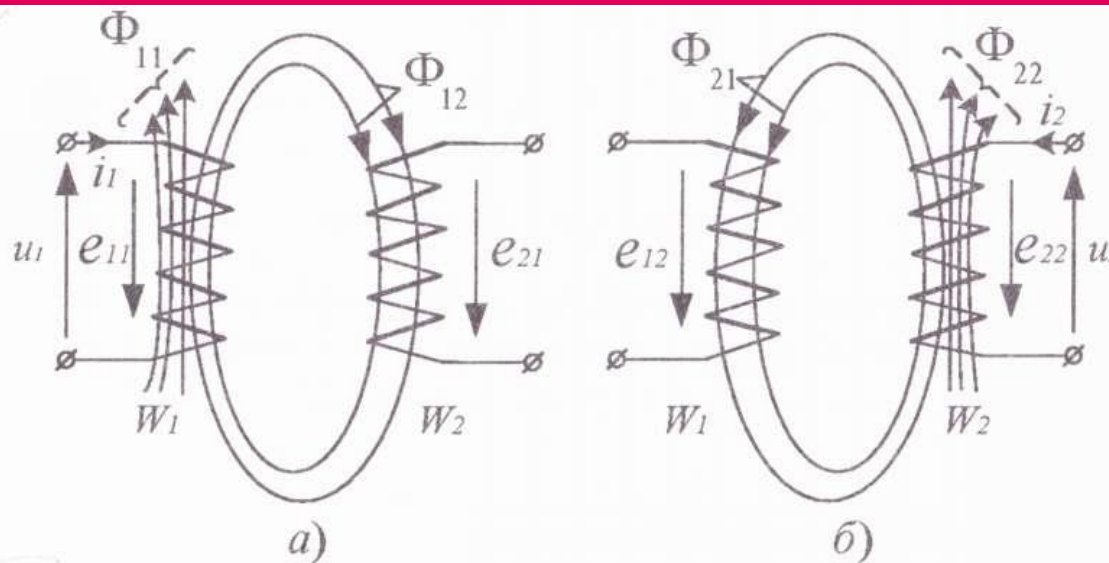


Рис.7 . Індуктивно зв'язані катушки: при проходженні струму i_1 по першій катушці в другій катушці наводиться ЕРС взаємодукуції e_{21} (а), і навпаки, при струмі другої катушки i_2 в першій катушці виникає e_{12} (б)

При проходженні струму i_1 по першій котушці W_1 виникає магнітний потік Φ_1 , який частково замикається без зчеплення з другою котушкою (Φ_{11}), і частково пронизує другу котушку (Φ_{12}). Магнітний потік Φ_{11} наводить ЕРС самоіндукції e_{11} в першій котушці. У другій котушці магнітним потоком Φ_{12} наводиться ЕРС взаємоіндукції e_{21} , величина якої пропорційна коефіцієнту взаємоіндукції M_{12} і швидкості зміни струму i_1 в часі. Коефіцієнт взаємної індукції M вимірюється в генрі.

$$e_{11} = -W_1 \frac{d\Phi_{11}}{dt} = -L_1 \frac{di_1}{dt}; \quad e_{22} = -W_2 \frac{d\Phi_{22}}{dt} = -L_2 \frac{di_2}{dt};$$

$$e_{12} = -\frac{d\psi_{21}}{dt} = -M_{21} \frac{di_2}{dt}; \quad e_{21} = -\frac{d\psi_{12}}{dt} = -M_{12} \frac{di_1}{dt};$$

$$\psi_{21} = M_{21} i_1; \quad \psi_{12} = M_{12} i_2.$$

$$\Phi_1 = \Phi_{11} + \Phi_{21};$$

$$\Phi_2 = \Phi_{22} + \Phi_{12};$$

$$e_1 = e_{11} + e_{12} = -L_1 \frac{di_1}{dt} - M_{21} \frac{di_2}{dt};$$

$$e_2 = e_{22} + e_{21} = -L_2 \frac{di_2}{dt} - M_{12} \frac{di_1}{dt},$$

де Φ_1 Φ_2 - сумарний магнітний потік, який зчеплюється відповідно з витками першої та другої котушок; e_1 e_2 - сумарні ЕРС, індуковані відповідно в першій і другій котушках.

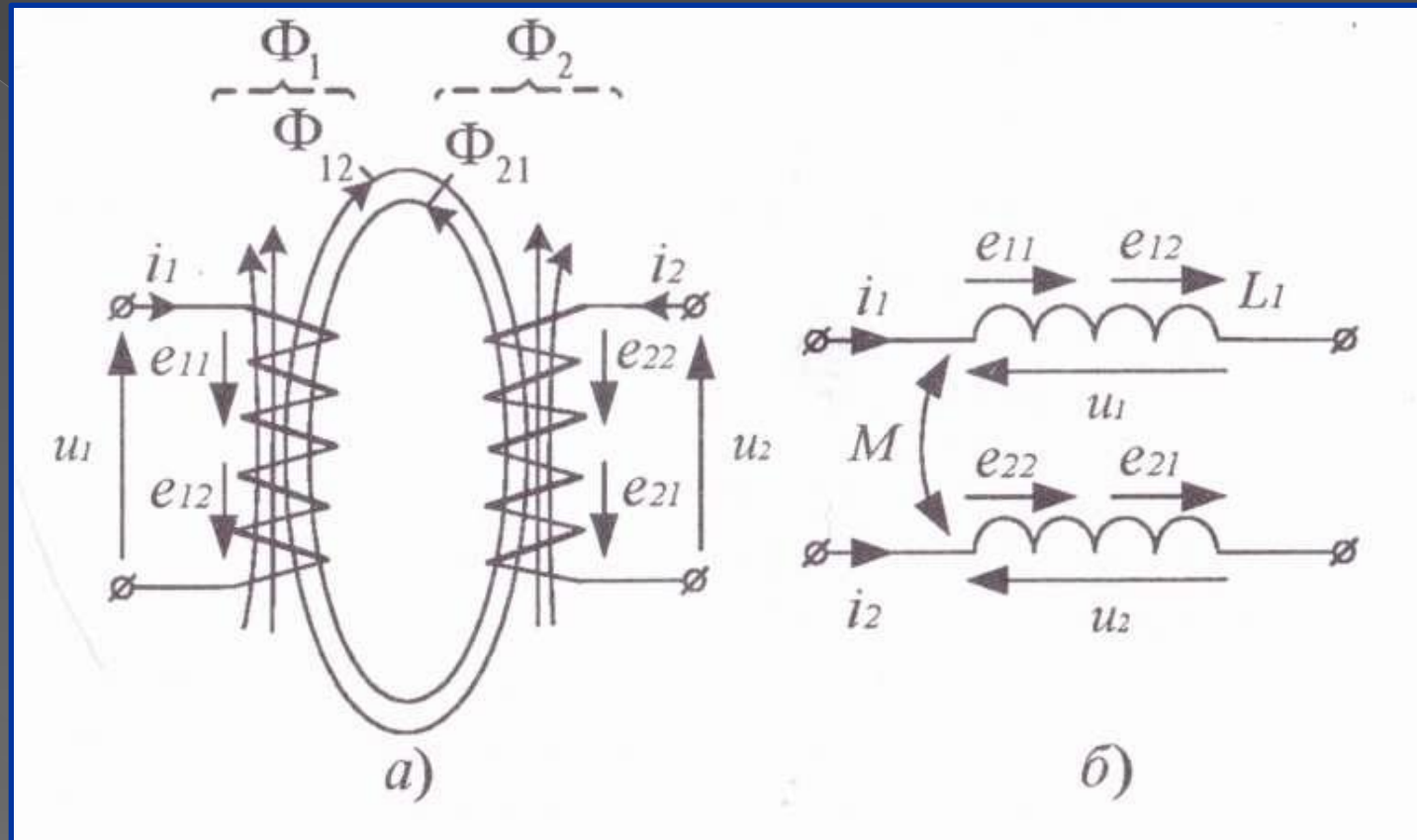


Рис.8 . Індуктивно зв'язані котушки: дві котушки (а) та їх позначення на схемі (б)

Рівняння за другим законом Кірхгофа для контурів і котушок із урахуванням спаду напруги на обвитках

$$u_1 + u_{R1} + e_{11} + e_{12} = 0; \quad u_2 + u_{R2} + e_{22} + e_{21} = 0;$$

Звідси

$$u_1 = -u_{R1} - e_{11} - e_{12}; \quad u_2 = -u_{R2} - e_{22} - e_{21},$$

Отримаємо значення напруги на котушках:

$$u_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt},$$
$$u_2 = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt}.$$

Пам`ятай!

При узгодженому увімкненні двох котушок (рис. 9, а) їхні магнітні потоки спрямовані в один бік і додаються, а при зустрічному увімкненні (рис. 9, б) потоки спрямовані в протилежні боки і віднімаються.

