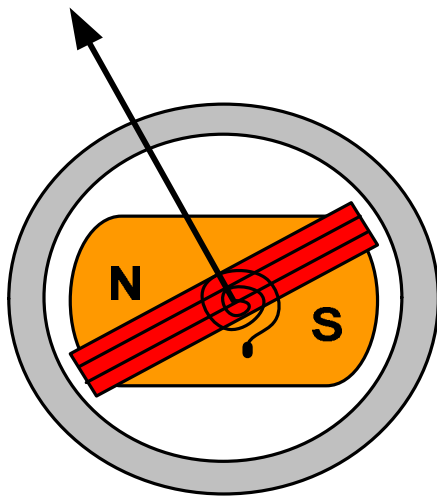


Лекция 14 Измерение магнитных величин

1. Основы магнитометрии.
2. Измерительные преобразователи магнитных величин.
3. Измерение характеристик магнитного поля.
4. Измерение характеристик магнитных материалов.

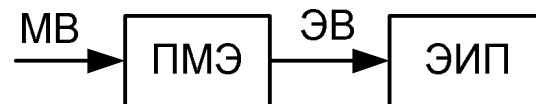


14.1 Основы магнитометрии

Измеряемые величины:

- характеристики магнитного поля H , Φ , B ;
- характеристики материалов: μ , B_s , B_r , H_c , H_0 , S_w , $P_{y\delta}$ и др.

Структурная схема прибора для измерения магнитной величины:

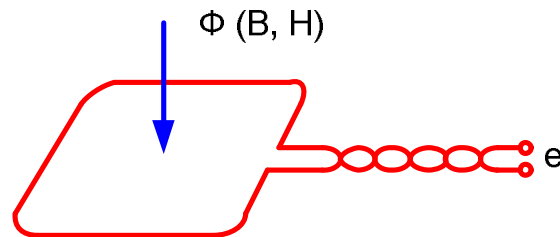


Преобразователи магнитных величин в электрические (ПМЭ):

- ▣ электромагнитные:
 - индукционные;
 - ферромодуляционные;
- ▣ гальваномагнитные:
 - магнитогенераторные;
 - магниторезистивные;
- ▣ квантовые:
 - магниторезонансные непрерывного действия;
 - магниторезонансные дискретного действия.

14.2 Измерительные преобразователи магнитных величин

Индукционные преобразователи (измерительные катушки)

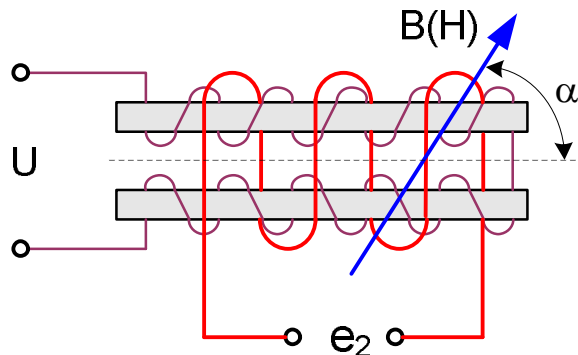


$$e = -\frac{d\Psi}{dt} = -w_k S \frac{dB}{dt} =$$
$$= -w_k \frac{d\Psi}{dt} = -w_k S \mu \mu_0 \frac{dH}{dt}$$

В постоянном магнитном поле измерительную катушку:

- ▶ быстро вынести за пределы поля;
- ▶ повернуть на 180° ;
- ▶ вращать с равномерной скоростью.

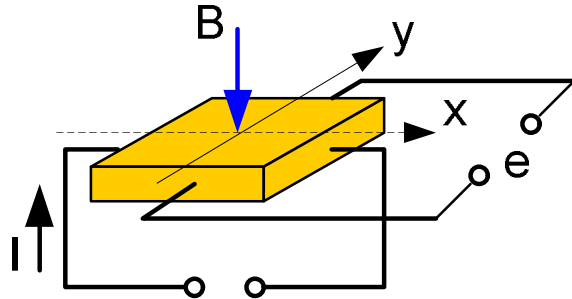
Ферромодуляционные преобразователи (феррозонды)



ЭДС четных гармоник

$$e_2 = 4k\omega B \cos \alpha \cdot \mu_2 \sin 2\omega t$$

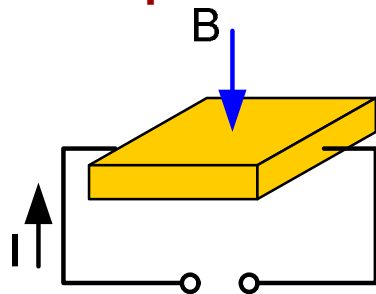
Магнитогенераторные преобразователи (Холла)



$$e = \frac{R_h}{d} IB$$

R_h – коэффициент Холла;
 d – толщина полупроводника.

Магниторезистивные преобразователи (Гаусса)



Сопротивление полупроводника

$$R_B = \left[1 + \frac{aB^2}{1 + (\mu B)^2} \right]$$

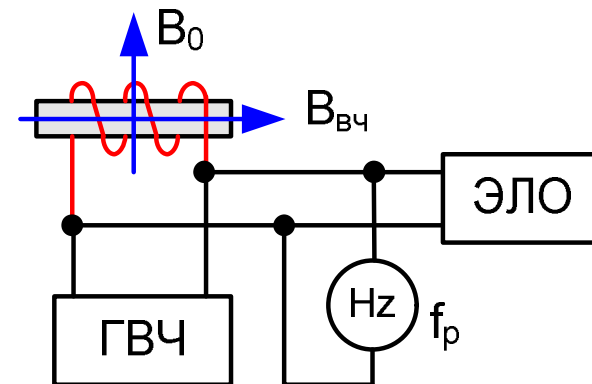
a – коэффициент Гаусса.

Магниторезонансные преобразователи

В постоянном поле B_0 частота резонансной прецессии атомов:

$$\nu = \frac{\gamma}{2\pi} B_0 \quad \gamma \text{ – гиромангнитное отношение}$$

При резонансе $U_{ГВЧ} = \min$, $\nu = f_p$, $B_0 = 2\pi f_p / \gamma$.



14.3 Измерение характеристик магнитного поля

Характеристики магнитного поля: **B** , **H** , **Φ**

$$B = \mu\mu_0 H; \quad H = \frac{Iw}{l}; \quad \Phi = \int B ds; \quad F = \int H dl = Iw$$

Измерение магнитного потока **Φ** : веберметр (Wb)
(беспружинный МЭ прибор с измерительной катушкой)

$$\alpha = S_{\Phi} \int_0^{\tau} e dt = S_{\Phi} w \Phi \quad (\text{индукционно-импульсный метод})$$

Измерение магнитной индукции **B** :

► тесламетры

- ферромодуляционные
(диапазон измерения **B** от 10^{-9} до 10^{-4} Тл);
- с преобразователями Холла и Гаусса
(диапазон измерения **B** : от 10^{-2} до 10 Тл);
- квантовые (диапазон измерения **B** : от 10^{-5} до 1 Тл);

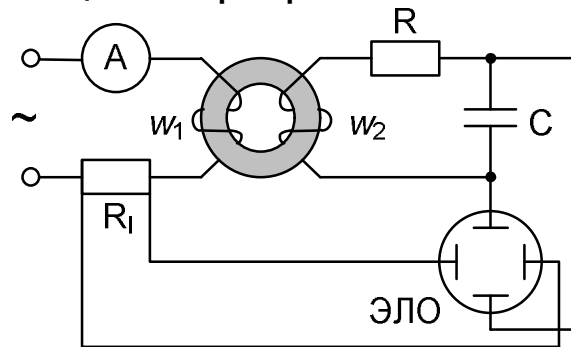
- **индукционный метод**: с помощью измерительной катушки и вольтметра
(диапазон измерения **B** от 10^{-4} до 10 Тл).



14.3 Измерение характеристик магнитных материалов

■ Измерение петли гистерезиса

- осциллографический метод

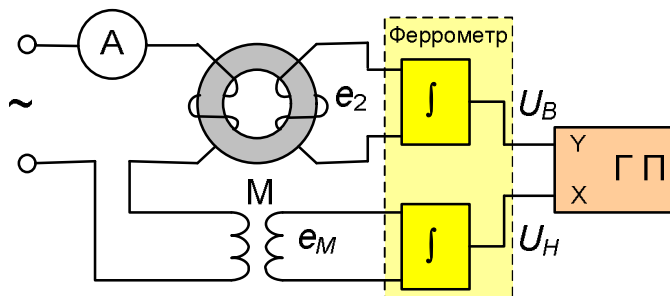


При $R \gg 1/\omega C$

$$U_y = U_C = \frac{1}{C} \int \frac{e_2(t)}{R} dt = -\frac{w_2 s}{RC} B(t);$$

$$U_x = i(t)R_i = \frac{R_i l}{w_1} H(t).$$

- фазочувствительный метод



феррометр – прибор с фазочувствительным преобразователем для измерения мгновенных значений интеграла от периодического входного сигнала.

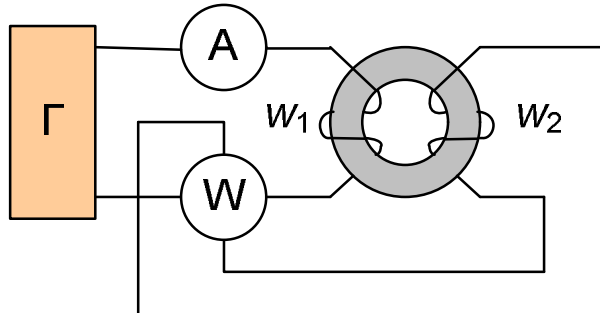
$$e_2 = w_2 s \frac{dB}{dt}; \quad U_B = \frac{2}{T} \int_{t_i}^{t_i + \frac{T}{2}} e_2(t) dt = 4w_2 s f B(t_i)$$

ГП - графопостроитель

$$e_M = M \frac{di}{dt} = -M \frac{l_{cp}}{w_1} \frac{dH}{dt}; \quad U_H = \frac{2}{T} \int_{t_i}^{t_i + \frac{T}{2}} e_M(t) dt = \frac{4M f l_{cp}}{w_1} H(t_i)$$

Измерение удельных магнитных потерь

- ваттметровый метод



$$P_{y\delta} = \frac{V}{m} \frac{1}{T} \int H dB = \frac{w_1}{w_2 m} \frac{1}{T} \int_0^T i_1(t) e_2(t) dt$$

$$H(t) = \frac{i_1(t) w_1}{l_{cp}}; \quad \frac{dB}{dt} = \frac{-e_2(t)}{w_2 l_{cp}}; \quad V = l_{cp} S;$$

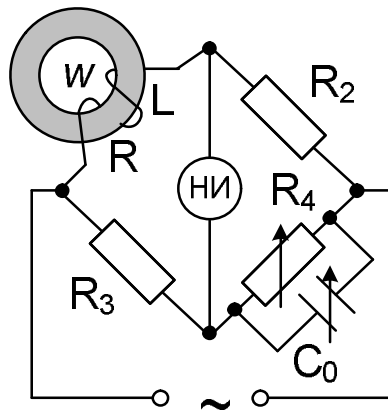
$$P_{y\delta} = \frac{w_1}{w_2 m} I_1 E_2 \cos \varphi$$

Г – генератор синусоидального напряжения

m – масса магнитопровода

Измерение магнитной проницаемости

- мостовой метод



$$L_{изм} = C_0 R_2 R_3; \quad R_{изм} = R_2 \frac{R_3}{R_4}$$

$$\mu_1 = \frac{l_{cp}}{\mu_0 s w^2} L_{изм}; \quad \mu_2 = \mu_1 \operatorname{tg} \delta = \frac{\mu_1 R_M}{\omega L_{изм}} = \frac{l_{cp}}{\mu_0 s w^2 \omega} (R_{изм} - R_w)$$

μ_1 – действительная часть комплексной магнитной проницаемости;

μ_2 – мнимая часть комплексной магнитной проницаемости;

ω – угловая частота намагничивающего тока;

R_M – сопротивление магнитных потерь; R_w – сопротивление обмотки