

*1- тема: Энергия  
электромагнитного поля и её  
превращение в другие виды*

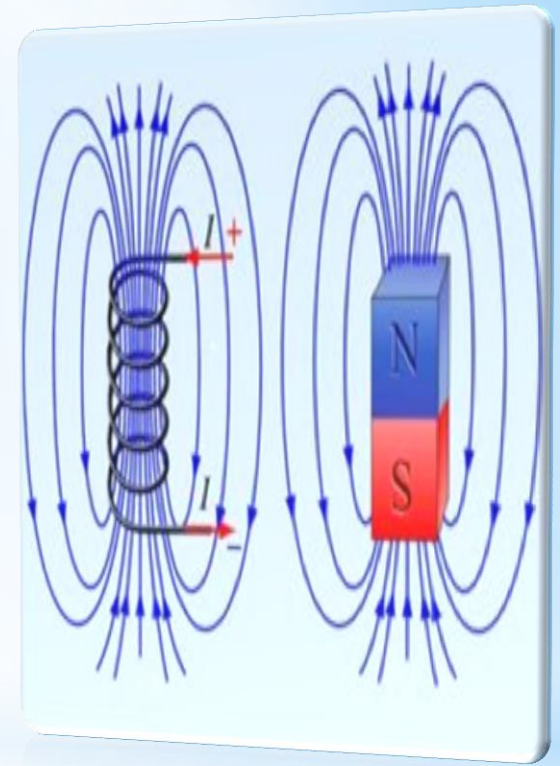
## План:

1. Характеристика электромагнитного поля как носителя энергии;
2. Поглощение и превращении энергии электромагнитного поля в вещественных средах.

- \* **Электротехнология** - область науки и техники, изучающая приемы, способы и средства выполнения производственных процессов, использующих электрическую энергию непосредственно или с предварительным преобразованием в другие виды.
- \* Технологические процессы, связанные с преобразованием электрической энергии в тепловую и ее использованием, объединяют термином "**электротермия**", а процессы, в которых электрическая энергия применяется непосредственно или с предварительным преобразованием в механическую или химическую, - понятием "**электрофизические и электрохимические методы обработки материалов**".

\* **Электромагнитное поле**-одна из форм существования материи, характеризующаяся совокупностью взаимосвязанных и взаимно обуславливающих электрического и магнитного полей. Распространение электромагнитного поля сопровождается движением электромагнитной энергии, представляющей собой сумму энергий электрического и магнитного полей. Изменениям электрического и магнитного полей сопутствует превращение электрической энергии в магнитную и магнитной в электрическую.

\* **Электромагнитное поле** может существовать (проявляться) в различных формах: электрического поля, магнитного поля, электромагнитных волн, электрического тока и других электрических и магнитных явлений. Каждая из этих форм поля несет соответствующую ей энергию: электростатическую, магнитную, электромагнитную, электродинамическую и др.



# Открытие

В 1831г. английский физик М. **Фарадей** экспериментально обнаружил явление Электромагнитной индукции и дал его математическое описание.



*James Clerk Maxwell.*

- В 1864г. Дж. **Максвелл** создаёт теорию электромагнитного поля, согласно которой электрическое и магнитное поля существуют как взаимосвязанные составляющие единого целого — электромагнитного поля. Благодаря теории Максвеллу, эл. поле было предсказано за 22 года до открытия.

*\* Каждый из видов энергии электромагнитного поля имеет определенные технологические свойства - способность поглощаться в вещественных средах и превращаться в тепловую, механическую, химическую или биологическую энергию. Преобразование электрической энергии в другие электрические и неэлектрические виды и их целенаправленное использование для воздействия на предметы труда в технологических процессах составляет сущность электротехнологии. Из теоретической электротехники известно, что все разнообразие форм и проявлений электричества подчиняется общим законам электромагнитного поля, описываемым системой уравнений Максвелла.*

Для переменного электромагнитного поля в неподвижной однородной и изотропной среде полная система уравнений имеет вид:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \bar{H} &= \bar{J} ; \operatorname{rot} \bar{E} = -\partial \bar{B} / \partial \tau ; \bar{j} = \gamma \bar{E} + \partial \bar{D} / \partial \tau + \rho \bar{v} ; \\ \bar{D} &= \varepsilon_a \bar{E} ; \bar{B} = \mu_a \bar{H} ; \operatorname{div} \bar{D} = \rho ; \operatorname{div} \bar{B} = 0 \end{aligned}$$

Здесь:

$\bar{H}$  - напряженность магнитного поля, А/м;

$\bar{J}$  - плотность полного тока, А/м<sup>2</sup>;  $\tau$  - время, сек.

$\bar{E}$  - магнитная индукция, Тл

$\bar{v}$  - скорость движения свободных зарядов, м/с;

$\gamma$  - удельная электрическая проводимость, См/м;

$\bar{D}$  - электрическая индукция, Кл/м<sup>2</sup>;

$\varepsilon_a$  - абсолютная диэлектрическая проницаемость вещества, Ф/м;

$\mu_a$  - абсолютная магнитная проницаемость вещества, Гн/м.

Объемная плотность энергии магнитного поля (при линейной зависимости между  $D = \varepsilon_a E$ )

$$W_{\text{э}} = \frac{1}{2} \varepsilon_a E^2$$

Объемная плотность энергии электромагнитного поля (при линейной зависимости между  $\bar{B}$  и  $\bar{H}$ )

$$W_M = \frac{1}{2} \mu_a H^2$$

Объемная плотность энергии электромагнитного поля:

$$W = \frac{1}{2} (\varepsilon_a E^2 + \mu_a H^2)$$

Энергия переносится электромагнитными волнами, которые согласно закону Максвелла распространяются в вещественных средах со скоростью:

$$v = 1/(\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \sqrt{\varepsilon \mu}) = c / \sqrt{\varepsilon \mu}$$

где  $\varepsilon_0$  - электрическая постоянная ( $8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м);  $\mu_0$  - магнитная постоянная, равная  $1,26 \cdot 10^{-6}$  Гн/м;  $\varepsilon$  - относительная диэлектрическая проницаемость;  $\mu$  - относительная магнитная проницаемость вещества;  $c = 1/\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$  - скорость электромагнитных волн в вакууме, приблизительно равная  $3 \cdot 10^8$  м/с.

Скорость распространения электромагнитных волн в воздухе ( $\varepsilon \approx 1, \mu \approx 1$ )  $v = c \approx 3 \cdot 10^8$ .

*Движение энергии в электромагнитном поле характеризуется вектором Пойнтинга*

$$\vec{\Pi} = \left[ \vec{E} \vec{H} \right]$$

*представляющем собой поток энергии,  $V \cdot A/m^2$ , переносимой электромагнитными волнами за единицу времени через единичную поверхность, перпендикулярную направлению движения энергии. Направление вектора перпендикулярно векторам  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  и совпадает с направлением движения энергии (распространения электромагнитных волн).*

*Энергия, поступающая в единицу времени в некоторый объем  $V$ , ограниченный поверхностью  $A$ ,*

$$\vec{S} = -\oint_A \vec{\Pi} d\vec{A} = -\oint_A \left[ \vec{E} \vec{H} \right] d\vec{A}$$

*Знак минус перед интегралом означает, что поток энергии направлен внутрь тела навстречу нормали к элементарной поверхности тела  $dA$ .*



Превращение энергии электромагнитного поля (ЭМП) в другие виды происходит при поглощении электромагнитных волн средами. Интенсивность поглощения и направленность превращений зависит от электрофизических свойств сред и частоты поля. Необходимое условие поглощения - наличие в веществе тела "приемников" электромагнитной энергии - элементарных свободных или связанных электрических зарядов, имеющих собственную частоту колебаний, не сильно отличающуюся от частоты колебаний поля. Поглощение энергии поля тем больше, чем ближе собственная частота колебаний частиц тела к частоте колебаний поля.

В проводниках при сравнительно низких частотах поля приходят в движение "свободные" электроны или ионы, в результате чего образуется ток электронной или ионной проводимости. Связанные заряды металлов слабо реагируют на низкие частоты, а электромагнитные волны частотой выше 1 МГц металлы отражают. В диэлектриках "приемниками" электромагнитных волн на высоких частотах становятся связанные заряды, образуя ток электрического смещения, и т. д.

Электромагнитная волна, распространяясь в поглощающей среде, ослабляется в направлении распространения. Поток энергии, определяемый вектором Пойнтинга, является функцией расстояния  $z$  от поверхности среды и убывает по экспоненциальному закону

$$S_z = S_e \exp(-2kz)$$

где  $S_e$  – поток энергии на поверхности среды,  $B \cdot A/m^2$ ;  $k$  – коэффициент затухания волны,  $m^{-1}$ .

Таким образом, интенсивность затухания волны и, следовательно, поглощение энергии, определяются коэффициентом затухания  $k$ , представляющим собой функцию электрофизических свойств среды и частоты поля. Для поглощающих сред коэффициент  $k$  определяется формулой

$$k = \omega \sqrt{\frac{\epsilon_a \cdot \mu_a}{2} \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{\gamma}{\omega \epsilon_a} \right)^2} - 1 \right]}$$

где  $\omega = 2\pi f$  – угловая скорость поля, рад/с.

В идеальных диэлектриках  $\gamma/\omega\varepsilon_a = 0$ ,  $\kappa = 0$ , электромагнитные волны не затухают и энергия не поглощается. В реальных диэлектриках  $0 < \gamma/\omega\varepsilon_a \ll 1$  поэтому поглощение энергии поля возможно лишь на высоких частотах (более 1 МГц). В металлах  $\omega\varepsilon_a \ll \gamma$ , тогда коэффициент затухания для металлов

$$k = \sqrt{\omega \mu_a \gamma / 2}$$

**Магнитное действие** тока отражает глубинную, неразрывную связь электрических и магнитных явлений, основанную на природе микромира вещества: протекание тока всегда сопровождается возникновением магнитного поля.

**Термическое действие** тока проявляется в нагреве сред, в которых он протекает.

**Механические силы поля** в отличие от электродвижущих сил, действующих на элементарные заряды внутри тел, механически воздействуют на заряженные макротела, проводники с током, электро- и магнитострикционные тела, производя механическую работу по перемещению тел или изменению их объема и плотности.

**Химическое действие** тока состоит в том, что его протекание в проводниках II рода (электролитах) сопровождается электролизом - окислительно-восстановительными реакциями на электродах, в результате которых получают новые вещества с новыми химическими свойствами.

**Биологическое действие** заключается в том, что ток (поле) влияет на протекание жизненных процессов в биологических объектах. Это влияние может быть как стимулирующим, так и угнетающим.

Контрольные вопросы и задания 1. Какие факторы определяют энергию электромагнитного поля, как она распространяется в пространстве, чем различаются электромагнитная и электрическая энергии? 2. При каких условиях энергия электромагнитного поля преобразуется в другие виды? 3. Какие технологические свойства имеет электромагнитное поле? 4. Почему нельзя нагреть проводник — "обычную" воду — в переменном магнитном поле, а металлический проводник в переменном электрическом поле?