

Раздел 9. Электромагнитное поле. Цепи переменного тока.

Тема 1. Законы индукции

Тема 2. Цепи переменного тока

Для работы с тестами скорректируйте Word:
Сервис→Макрос→Безопасность→Низкая

Тема 1. Законы индукции

П.1. Общий вид законов индукции

П.2. Явление ЭМИН в отсутствие вещества

П.3. ЭМИН при наличии проводящего контура

**П.4. ЭМИН при наличии переменного тока
в проводящем контуре (самоиндукция)**

**П.5. Явление магнитоэлектрической индукции
МЭИН и его варианты**

П.6. Ток смещения. Полный ток.

П.1. Общий вид законов индукции

ЗНАЕМ: Электростатическое и магнитостатическое поля друг с другом не связаны. Этот вывод ограничен только случаем постоянных полей. Что изменится в случае переменных полей?

ВОПРОС: Что показал эксперимент для произвольно движущихся зарядов?

ОТВЕТ: Они порождают переменные поля, которые в свою очередь порождают друг друга.

Явление порождения одного поля другим называется индукцией.

Общее уравнение индукции выглядит так:

$$(C_0)_1 = \text{const} \frac{d}{dt} (\Phi_2)$$

Формулировка: Циркуляция по замкнутому контуру L_0 первого поля пропорциональна быстроте изменения (т.е. производной по времени, обозначаемой d/dt) потока второго поля через поверхность $S(L_0)$, ограниченную контуром интегрирования L_0 .

ТЕСТ

Закон электромагнитной индукции (ЭМИН):

поле 1 – электрическое (в формуле замена 1 \Rightarrow E);

поле 2 – магнитное (в формуле замена 2 \Rightarrow B).

CONST = -1

$$C_{OE} = - \frac{d}{dt} \Phi_B$$

ТЕСТ

Закон магнитоэлектрической индукции (МЭИН):

поле 1 – магнитное (в формуле замена 1 \Rightarrow B).

поле 2 – электрическое (в формуле замена 2 \Rightarrow E).

$$CONST = \mu_0 \varepsilon_0 = \frac{1}{c^2} \Rightarrow C_{OB} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d}{dt} \Phi_E$$

ТЕСТ

П.2. Явление ЭМИН в отсутствие вещества

Определение: Явлением электромагнитной индукции ЭМИН называется явление возникновения электрического поля при изменении потока магнитного поля.

1) ЭМИН в вакууме:
$$C_{0E} = - \frac{d}{dt} \Phi_B.$$

ЗАМЕЧАНИЕ: Электрическое поле, возникшее при изменении магнитного потока, будет вихревым $C_{0E} \neq 0!$

Словесная формулировка:

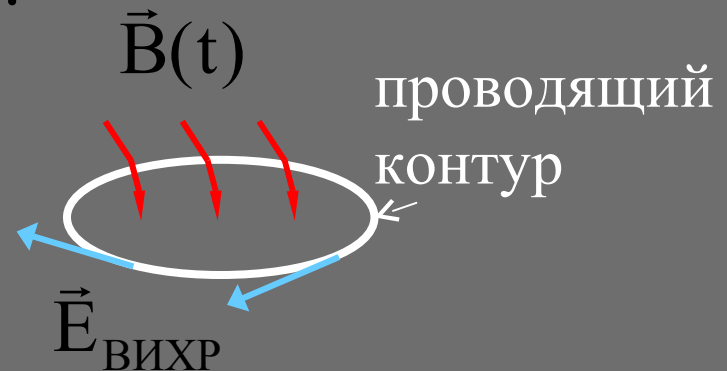
Циркуляция электрического поля по замкнутому контуру L_0 пропорциональна быстроте изменения магнитного потока через поверхность $S(L_0)$, ограниченную этим контуром.

П.3. ЭМИН при наличии проводящего контура

В этом случае имеет место переменный магнитный поток $\Phi_B(t)$ через реальный проводящий контур за счет пронизывания его переменным магнитным полем с индукцией $B(t)$.

Закон ЭМИН:
$$\mathcal{E}_{\text{ОЕ}} = - \frac{d}{dt} \Phi_B$$

Внутри проводника, из которого изготовлен контур, возникает вихревое электрическое поле.



ЗАМЕЧАНИЕ: Циркуляция вихревого электрического поля есть ЭДС, возникающая внутри проводника, т.к. ЭДС по определению есть работа сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда по замкнутому контуру.

$$\mathcal{E}_{\text{ОЕ}} = \oint_{L_0} \vec{E}_{\text{вихр}} d\vec{L} = \oint_{L_0} \vec{E}_{\text{стор}} d\vec{L} = \varepsilon_{\text{инд}} .$$

$$\varepsilon_{\text{инд}} = - \frac{d\Phi_{\text{В}}}{dt} .$$

ТЕСТ

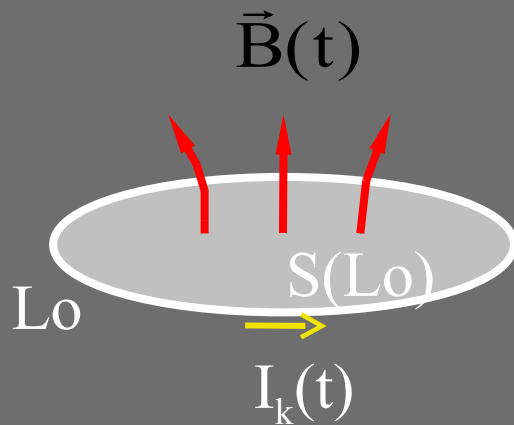
Получаем частный случай ЭМИН:

СЛОВАМИ: ЭДС индукции в некотором замкнутом проводящем контуре численно равна скорости изменения магнитного потока через площадь этого контура.

Знак (-) соответствует так называемому «правилу Ленца»:

ЭДС индукции создает в контуре индукционный ток, магнитное поле которого компенсирует то изменение магнитного потока, которое вызвало ЭДС индукции.

П.4. ЭМИН при наличии переменного тока в проводящем контуре (самоиндукция)



Явление самоиндукции – это явление возникновения дополнительной ЭДС при протекании в контуре переменного тока.

ЗАДАЧА: Вывести закон самоиндукции.

Используем: 1) Закон ЭМИН: $\mathcal{E}_{\text{ОЕ}} = - \frac{d}{dt} \Phi_{\text{В}}$.

2) определение ЭДС самоиндукции: $\mathcal{E}_{\text{с.и.}} = \oint \vec{E}_{\text{вихр}} d\vec{L} = \mathcal{E}_{\text{ОЕ}}$.

Дополнительная ЭДС самоиндукции вызывает дополнительный ток самоиндукции.

ЗАДАЧА: Связать магнитный поток Φ_B и ток $I_k(t)$ в контуре.

По определению:
$$\Phi_B = \int_{S(L_0)} \vec{B}(I_k) d\vec{s}.$$

Известно: в каждой точке площади контура $B \sim I_k$, следовательно, $\Phi_B \sim I_k$, т.е. весь поток пропорционален току контура: $\Phi_B = L \cdot I_k$.

L - коэффициент пропорциональности между магнитным потоком и током, который его вызвал, называется коэффициентом самоиндукции или коротко индуктивностью.

$$L = \frac{\Phi_B(I_k)}{I_k}.$$

ЗАДАЧА: Преобразовать закон ЭМИН, учитывая полученную СВЯЗЬ.

$$C_{\text{ОЕ}} = \varepsilon_{\text{С.И.}} = - \frac{d\Phi_{\text{В}}}{dt} = - \frac{d}{dt} (L \cdot I_{\text{к}}) \text{ и, т.к. } L = \text{const, то}$$

$$\varepsilon_{\text{С.И.}} = - L \frac{dI_{\text{к}}}{dt} \text{ - } \underline{\text{закон самоиндукции.}}$$

ТЕСТ

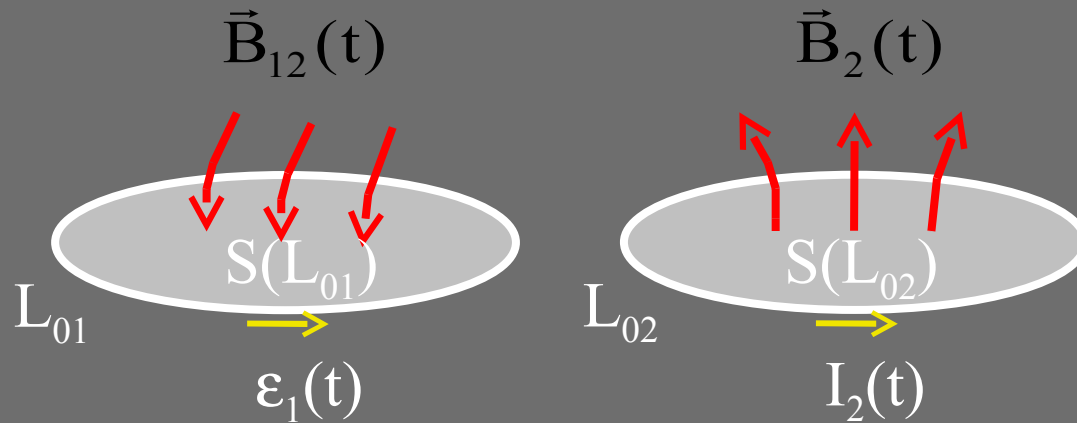
ДОПОЛНЕНИЯ:

1) индуктивность соленоида равна $L = \mu\mu_0 V n^2$,

где n – число витков провода на единицу длины соленоида, имеющего объем V .

2) Закон взаимной индукции: ЭДС индукции в первом контуре ε_1 возникает, если его пронизывает переменный магнитный поток, создаваемый током I_2 , протекающим во втором контуре.

$\varepsilon_1 = -L_{12} \frac{dI_2}{dt}$, где L_{12} – взаимная индуктивность двух контуров.

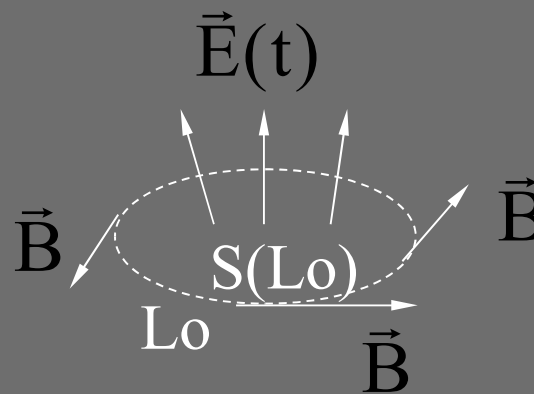


ТЕСТ

П.5. Явление магнитоэлектрической индукции МЭИН и его варианты

1. Если нет вещества (вакуум), то источником магнитного поля может быть переменное электрическое:

$$C_{\text{ОВ}} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}.$$



Закон МЭИН: В отсутствие электрических токов циркуляция магнитного поля по замкнутому контуру L_0 пропорциональна скорости изменения потока вектора напряженности электрического поля Φ_E через площадку $S(L_0)$, ограниченную контуром интегрирования L_0 .

ТЕСТ

При наличии в пространстве переменного электрического поля появляется магнитное поле с циркуляцией, пропорциональной скорости изменения электрического поля.

Оно ничем не отличается от «обычного» магнитного поля, источником которого являются токи.

2. Пусть имеются обычные токи (I_i) и переменный Φ_E .

Используем закон циркуляции МП: $C_{OB} = \mu_0 \sum I_i$,

и закон МЭИН в вакууме: $C_{OB} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$.

После суммирования получим: $C_{OB} = \mu_0 \sum I_i + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$.

$$C_{\text{ОВ}} = \mu_0 \left(\underbrace{\sum I_i}_{\text{"обычный ток"}} + \underbrace{\varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}}_{\text{ток смещения}} \right).$$

Внутри скобок суммируются 2 слагаемых. Они имеют одинаковую размерность. Второе слагаемое

$$I_{\text{см}} = \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \text{ называется } \underline{\text{током смещения}}.$$

Сумма токов проводимости и смещения получила название полного тока:

$$I_{\text{пров}} + I_{\text{см}} = I_{\text{полный}} \cdot$$

П.6. Ток смещения. Полный ток.

ИЗВЕСТНО: Локальной характеристикой тока является его плотность, обозначаемая символом \vec{j} .

Величина тока смещения связана с его плотностью известным соотношением:

$$I_{\text{см}} = \int_S \vec{j}_{\text{см}} \cdot d\vec{s} = \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt},$$

где по определению $\Phi_E = \int_S \vec{E} \cdot d\vec{s}$.

$$\int_S \vec{j}_{\text{см}} d\vec{s} = \varepsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} d\vec{s} = \int_S \varepsilon_0 \left(\frac{d}{dt} \vec{E} \right) d\vec{s} \Rightarrow \vec{j}_{\text{см}} = \varepsilon_0 \frac{d\vec{E}}{dt}.$$

Плотность тока смещения пропорциональна скорости изменения напряженности электрического поля.

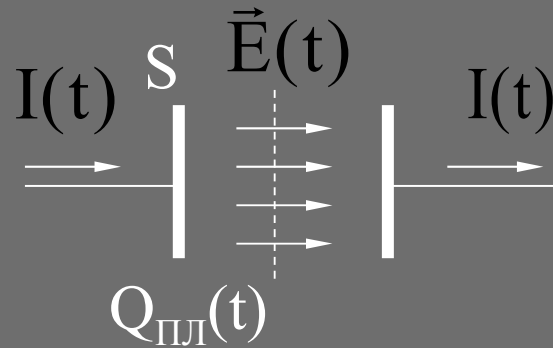
ИЗВЕСТНО: Плотность тока проводимости связана с направленным движением зарядов:

$$\vec{j}_{\text{ПРОВ}} = q \cdot n \cdot \vec{V}_{\text{НАПР}}.$$

Вопрос: Где же проявляется ток смещения?

Ответ: Наиболее характерный случай – протекание переменного тока в цепи с конденсатором.

Рассмотрим цепь переменного тока в которую включили конденсатор:



Известно: $|\vec{E}| = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$, где $\sigma = \frac{Q_{\text{пл}}}{S}$ - поверхностная плотность заряда.

Поток вектора напряженности $\Phi_E = E \cdot S$, а величина тока смещения есть интеграл $I_{\text{СМ}} = \int_S \vec{j}_{\text{СМ}} \cdot d\vec{s}$.

$$\begin{aligned} I_{\text{СМ}}^{\text{КОНД}} &= \int_S \vec{j}_{\text{СМ}} \cdot d\vec{s} = \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} = \varepsilon_0 \frac{d}{dt} (S \cdot E) = \varepsilon_0 \cdot S \frac{dE}{dt} = \\ &= \varepsilon_0 \cdot S \cdot \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{d\sigma}{dt} = \frac{d(\sigma S)}{dt} = \frac{dQ_{\text{ПЛ}}}{dt} = I_{\text{ЦЕПИ}}^{\text{ПРОВ}}. \end{aligned}$$

Вывод: Внутри конденсатора, включенного в цепь переменного тока, протекает ток смещения, равный току проводимости в подводящих проводах.

В цепях переменного тока выполняется закон сохранения полного тока: во всех элементах цепи, соединенных последовательно, полный ток будет один и тот же.