

Прочитайте вступление к учебной лекции.

Если читали ранее – можно пропустить этот блок информации.

Учебная лекция в ДО – это учебный материал для конспектирования

Инструкция для работы с учебным материалом (для конспектирования):

1. Первый раз прочитайте всю лекцию, ничего не записывая.
2. Ответьте мысленно на вопрос, что главное в лекции, из скольких основных частей лекция состоит (*на сколько частей ее можно мысленно разбить*), придумайте название для каждой части – это будет план конспекта.
3. Откройте тетрадь для лекций и запишите в тетради тему, дату лекции и план конспекта.
4. Второй раз начинайте читать лекцию и приступайте к конспектированию: в соответствии с планом – в каждой части плана пишите определения величин, формулы законов, формулировки законов, делайте рисунки к разбираемым примерам или другому. Чем больше будет ваших записей, поясняющих о чем идет речь, тем лучше вы поймете и запомните учебный материал.

Внимание! Важно обращать внимание на то, что вы описываете – явление, закон, величину или другое понятие (например, модель объекта).

Руководствуйтесь правилами:

А) если описываете явление – запишите особенности рассматриваемого явления (*в чем заключается явление, каковы условия его возникновения, какие законы и величины используются для исследования явления*)

В) если описываете величину – запишите определение величины (*укажите физическая скалярная или векторная величина, формулу/ы для определения величины, единицу величины, поясните, что характеризует и, если векторная величина, то она как направлена*),

С) если описываете понятие (не величину) – запишите одно предложение, которое раскрывает смысл понятия (*для примера см. система отсчета, материальная точка, система материальных точек и др.*),

Д) если описываете закон – название, формулу, формулировку, физический смысл запишите закона. **Помните, что при записи формулы надо расшифровать названия величин, входящих в данную формулу.**

ЯВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ И САМОИНДУКЦИИ

Явление электромагнитной индукции. Вихревое электрическое поле. Явление самоиндукции. Индуктивность.

Введение

Магнитное поле – вид материи, который обладает тремя выраженными свойствами: создается только движущимися зарядами, действует с силой только на движущиеся заряды и может создаваться переменным электрическим полем. Магнитное поле всегда вихревое (его силовые линии всегда замкнуты).

Электрическое поле – вид материи, который обладает тремя выраженными свойствами: создается неподвижными и движущимися зарядами, действует с силой на неподвижные и движущиеся заряды и может создаваться переменным магнитным полем. Электрическое поле может быть двух видов – потенциальное (силовые линии разомкнуты, начинаются и(или) заканчиваются на электрических зарядах) и вихревое (силовые линии замкнуты). Вихревое электрическое поле создается только переменным (изменяющимся) магнитным полем – это явление получило название явление электромагнитной индукции. Существуют всего три способа изменения той характеристики магнитного поля, с помощью которой можно описать магнитное поле в исследуемой области пространства, это уже знакомая нам величина – магнитный поток. Итак, существует три способа изменения магнитного потока, приводящие к рождению вихревого электрического поля.

Вихревое электрическое поле впервые было обнаружено в замкнутом проводящем контуре, в котором оно проявилось в качестве ЭДС (ЭДС индукции) и привело к появлению электрического тока (индукционного тока). Величина ЭДС индукции зависит от скорости изменения магнитного потока.

Особый случай, когда возникает явление электромагнитной индукции, – это случай изменения магнитного потока, порожденного изменяющимся

электрическим током. Получается, что сам контур с изменяющимся током наводит на себя переменное магнитное поле, которое также порождает ЭДС индукции, препятствующее изменению силы тока. Это явления назвали явлением самоиндукции, а ЭДС индукции в этом случае называют ЭДС самоиндукции. Величина ЭДС самоиндукции зависит от скорости изменения силы тока и от величины индуктивности. Индуктивность – характеристика контуров и катушек с током, которая по существу характеризует «электрическую инертность» контура или катушки: чем больше индуктивность, тем больше контур или катушка «сопротивляется» внешнему электрическому воздействию (аналог массы в механике). Индуктивность контура или катушки становится одной из важных характеристик электрической цепи наряду с сопротивлением резистора и емкостью конденсатора.

Явление электромагнитной индукции

Явление электромагнитной индукции впервые было открыто Фарадеем в 1831 году.

В эксперименте обнаружено, что переменное магнитное поле, наведенное на замкнутый проводящий контур, создает в контуре электрический ток. Уточним еще раз: если взять простой замкнутый проводник (естественно, что в нем нет тока, так как нет источника тока, так как нет ЭДС) и навести на него изменяющееся магнитное поле, то в контуре обнаруживается ток. Этот, возникающий в контуре под действием переменного (изменяющегося) магнитного поля, ток, назвали индукционным (что можно перевести как «наведенный», то есть созданный внешним условием). Если есть ток, то его должно создавать ЭДС (это ЭДС назвали ЭДС индукции). Откуда оно появилось? Разберем «механизм» его появления.

Объяснение, почему возникает ЭДС индукции, заключается в том, что переменное (изменяющееся) МП создает вихревое ЭП, то есть в замкнутом проводнике возникает ЭП, силовые линии которого замкнуты. Именно вихревое электрическое поле обеспечивает существование ЭДС индукции и

под его воздействием возникает движение электрических зарядов в замкнутом проводнике. Теперь становится понятно, что все дело в вихревом электрическом поле, возникающем в замкнутом проводнике. ЭДС индукции в этом случае отлично от нуля. По определению оно равно:

$$\varepsilon = \oint_L \vec{E} d\vec{l}$$

Обратите внимание, что ЭП может быть двух видов: силовые линии одного из них начинаются или заканчиваются на электрических зарядах (поле называют потенциальным), силовые линии другого всегда замкнуты (поле называют вихревым), в явлении электромагнитной индукции появляется электрическое поле именно второго типа.. Сравните с магнитным полем: силовые линии магнитного поля всегда замкнуты (магнитное поле всегда вихревое), магнитных зарядов не существует.

Закон электромагнитной индукции

Закон электромагнитной индукции в трактовке Фарадея: при всяком изменении МП в замкнутом проводящем контуре возникает ЭДС индукции, численно равная скорости изменения магнитного потока, пронизывающего данный контур:

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt}$$

Закон называют законом Фарадея для электромагнитной индукции.

Знак «минус» отражает направление ЭДС индукции и индукционного тока в контуре, очевидно, что они одного направления. Объяснение «минусу» дает правило Ленца. *Правило Ленца: при наведении на контур переменного МП, в контуре возникает индукционный ток такого направления, что МП индукционного тока противодействует изменению внешнего МП.* Математически это записывают таким образом:

$$\text{Если } \frac{d\Phi}{dt} > 0, \text{ то } \varepsilon < 0.$$

Если $\frac{d\Phi}{dt} < 0$, то $\mathcal{E} > 0$.

Рис. 1 демонстрирует возникновение индукционного тока, направление которого определяется с помощью правила Ленца (что происходит с замкнутым проводником, что происходит с разомкнутым проводником?)?

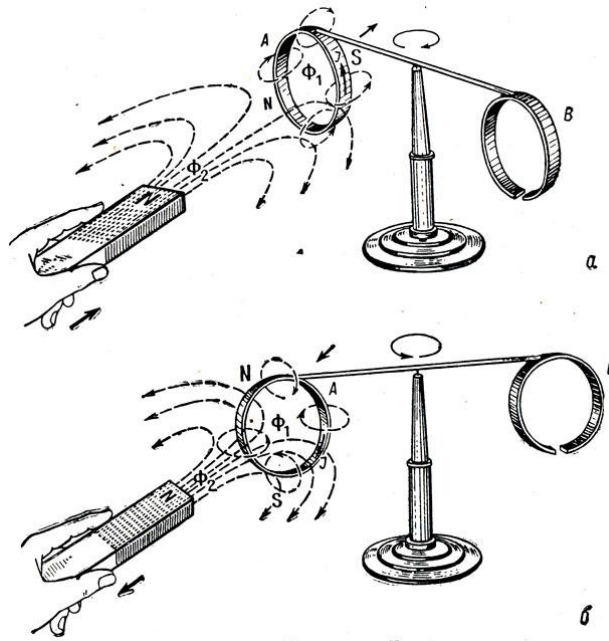


Рис.1. В замкнутом кольце при наведении на него изменяющегося МП возникает ЭДС индукции и индукционный ток: а) кольцо отталкивается от магнита, в) кольцо следует за магнитом. В разомкнутом кольце ток не возникает.

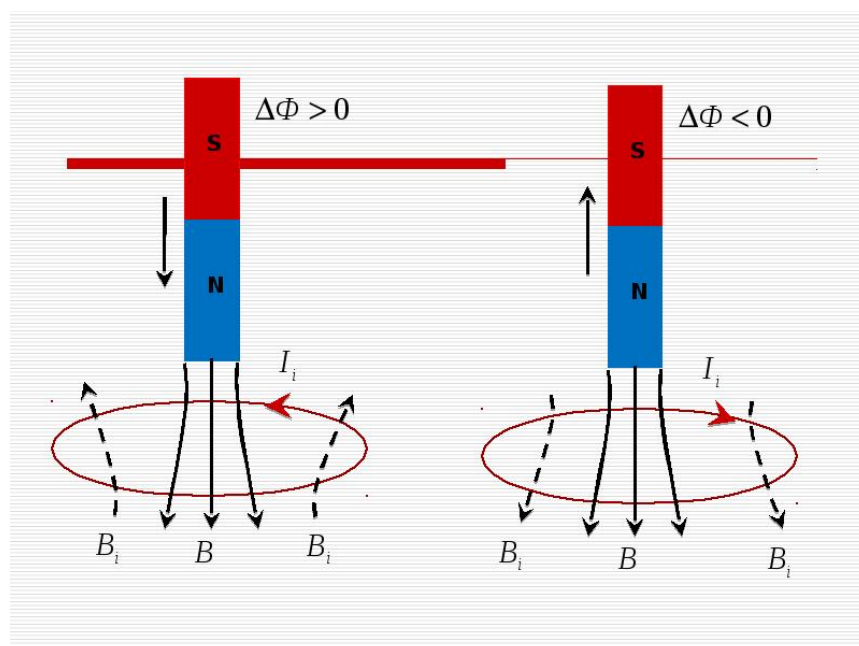


Рис.2. В замкнутом контуре при наведении на него изменяющегося внешнего МП возникает ЭДС индукции и индукционный ток такого направления, что магнитное поле индукционного тока препятствует изменению внешнего МП.

Графически правило Ленца можно представить так, как это сделано на рис. 2 (**обратите внимание на направление тока в контуре и как это связано с увеличением и уменьшением магнитного потока, объясните, почему так направлен ток в контуре**).

Если есть ЭДС – в контуре возникает индукционный ток I , величину которого можно определить по амперметру, а можно – с помощью закона Ома для замкнутой цепи, для этого надо знать ЭДС индукции и сопротивление проводника:

$$I = \frac{\varepsilon_i}{R}.$$

Закон электромагнитной индукции в трактовке Максвелла

Для вихревого электрического поля ЭДС индукции будет отлична от нуля, как выяснили выше:

$$\varepsilon_i = \oint_L \vec{E} d\vec{l} \neq 0$$

Подставим выражение для ЭДС индукции в закон Фарадея:

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt}$$

Подставим в закон Фарадея и формулу для определения магнитного потока:

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

После подстановки формул-определений ЭДС индукции и магнитного потока получим

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

Здесь S – площадь контура, ограниченного контуром L . Знак интеграла и дифференциала можно поменять местами:

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \int_S \frac{d\vec{B}}{dt} \cdot d\vec{S}$$

Математическая формулировка закона Фарадея в трактовке Максвелла (не нужен проводник, чтобы обнаруживать явление электромагнитной индукции): циркуляция вектора напряженности \vec{E} вдоль произвольного контура L равна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего поверхность, ограниченную данным контуром.

Физический смысл: вихревое ЭП порождается переменным МП, при этом вектора \vec{E} и $\frac{d\vec{B}}{dt}$ связаны друг с другом как «левая тройка векторов».

Правило Ленца, связанное теперь с вихревым электрическим полем, можно представить так, как это сделано на рис.3 (определите, почему силовые линии электрического поля направлены так, как это изображено на рисунке):

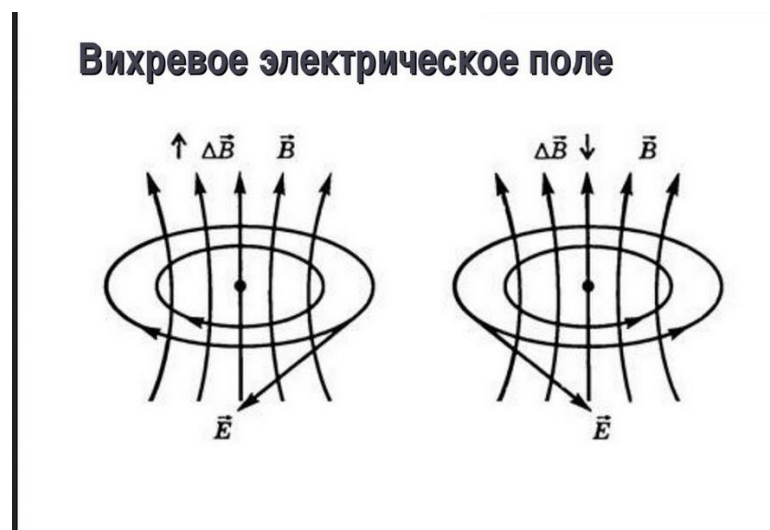


Рис.1. В области изменяющегося МП возникает вихревое электрическое поле, направление силовых линий которого зависит от того, увеличивается (левый рисунок) или убывает МП (правый рисунок).

Частные случаи явления электромагнитной индукции

Существует ТРИ способа изменения магнитного потока, поскольку изменяться могут три величины, стоящие в определении магнитного потока:

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos \alpha$$

Это вектор магнитной индукции B , площадь S , пронизываемая магнитным полем и угол α между вектором магнитной индукции и нормалью к контуру.

Рассмотрим два важных для инженерной практики случая.

1. Изменение угла α между вектором магнитной индукции и нормалью к контуру. На этом принципе работает генератор переменного тока.

Если в МП вращать проводящую рамку, то магнитный поток изменяется по закону

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \alpha, \quad \text{где} \quad \alpha = \omega \cdot t$$

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos \omega t$$

В контуре наводится ЭДС индукции

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}$$

$\varepsilon_i = -(B \cdot S \cdot \cos \omega t)'$ - производная от магнитного потока по времени, если взять производную, получим:

$$\varepsilon_i = B \cdot S \cdot \omega \cdot \sin \omega t, \quad \text{или}$$

$$\boxed{\varepsilon_i = \varepsilon_0 \sin \omega t}$$

Если увеличить число витков, число контуров, то ЭДС возникает в каждом витке, при этом все ЭДС соединены последовательно. Результатом будет сумма ЭДС, равная $\varepsilon = N \cdot \varepsilon_i$. С учетом этого закон Фарадея можно представить таким образом:

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt}, \quad \text{или}$$

$$\varepsilon = -\frac{d(N\Phi)}{dt}$$

Потокоцепление – физическая скалярная величина, которая характеризует магнитный поток, пронизывающий катушку, численно равная произведению числа витков на магнитный поток в каждом:

$$\psi = N\Phi \quad [\psi] = 1 \text{ Вб (вебер)}.$$

Используя новое понятие – потокосцепление, – перепишем закон Фарадея для этого случая:

$$\boxed{\varepsilon_i = -\frac{d\psi}{dt}}$$
 - закон Фарадея для катушки.

2. Движение проводника с током в МП.

По проводящим направлениям движется проводник со скоростью V , длина проводника l .

Можно считать, что на участке l создается эффективное ЭП с напряженностью E^{\wedge}

$$\vec{E}_{\text{эф.}} = \frac{\vec{F}}{q}$$

$$\vec{E}_{\text{эф.}} = \frac{q[\vec{V}, \vec{B}]}{q} = [\vec{V}, \vec{B}]$$

ЭДС возникнет на том участке l , который движется:

$$\varepsilon_i = \oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_l \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

$$\varepsilon_i = \int_l [\vec{V}, \vec{B}] \cdot d\vec{l}$$

Если $\vec{F} \uparrow \uparrow d\vec{l}$, то $\cos(\vec{F}, d\vec{l}) = 1$

$$\varepsilon_i = \int_l V \cdot B \cdot \sin \alpha \cdot dl = V \cdot B \cdot \sin \alpha \int_l d\vec{l}$$

$$\boxed{\varepsilon_i = V \cdot B \cdot l \cdot \sin \alpha}$$

ЭДС индукции зависит от скорости движения проводника, от его длины, от угла между V и B .

Анализируя α , можно обнаружить, что для возникновения ЭДС необходимо, чтобы проводник пересекал силовые линии, а не скользил вдоль них. Это можно обнаружить и с помощью закона Фарадея.

$$\varepsilon_i = -\frac{d(\vec{B} \cdot \vec{S})}{dt}$$

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}$$

$$\varepsilon_i = -B \frac{dS}{dt}$$

$$\varepsilon_i = -B \frac{d(l \cdot r)}{dt}$$

$$\varepsilon_i = -Bl \frac{dr}{dt} = -B \cdot l \cdot V$$

С учетом $\cos \alpha(\vec{B}, \vec{S})$ мы бы получили $\boxed{\varepsilon_i = B \cdot l \cdot V \cdot \sin \alpha}$

Т.о., при движении отрезка проводника в МП в нем всегда возникает ЭДС индукции, численно равная скорости изменения пересекаемого магнитного потока, что приводит к появлению на концах проводника разности потенциалов.

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 \pm \varepsilon}{R} \quad \varphi_1 - \varphi_2 = IR \pm \varepsilon$$

Если сила тока равна нулю $I=0$, то разность потенциалов равна $\varphi_1 - \varphi_2 = B \cdot l \cdot V \cdot \sin \alpha$.

Таким образом при пересечении проводником силовых линий МП на концах проводника всегда возникает разность потенциалов.

Явление самоиндукции-

- это явление возникновения ЭДС электромагнитной индукции в замкнутом контуре вследствие изменения в нем электрического тока.

Рисунок Таким образом, в данном проводящем контуре всегда возникает дополнительная ЭДС – ЭДС электромагнитной индукции, которая называется ЭДС самоиндукции.

$$B \sim I \quad \Phi \sim B \sim I \quad \Phi = LI$$

Магнитный поток всегда прямо пропорционален току.

L – коэффициент самоиндукции или индуктивность.

Индуктивность контура – физическая скалярная величина, характеризует «электрическую инертность» контура, численно равна отношению магнитного потока, создаваемого данным током, к величине его силы тока

$$L = \frac{\Phi}{I} \quad [L] = 1 \text{ Гн}$$

Индуктивность зависит от геометрической формы и размеров контура, а также от наличия магнитной среды.

Индуктивность катушки – физическая скалярная величина, характеризует «электрическую инертность» катушки, численно равна отношению потокосцепления, создаваемого данным током, к величине этого тока.

$$L = \frac{\psi}{I} \quad \varepsilon_i = -\frac{d\psi}{dt} \quad L = \mu\mu_0 n^2 V, \quad V - \text{объем, } n - \text{число витков, } \mu -$$

магнитная проницаемость среды, $\mu_0 = \text{const.}$, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м

$$\varepsilon_s = -\frac{d(L \cdot I)}{dt}$$

если $L = \text{const}$, то $\varepsilon_s = -L \frac{dI}{dt}$ - закон Фарадея для явления самоиндукции.

ЭДС самоиндукции всегда направлена не против тока, а против изменения тока. Если $\frac{dI}{dt} > 0$, то $\varepsilon_s < 0$ направлена против тока. Если $\frac{dI}{dt} < 0$, то $\varepsilon_s > 0$ - противодействует уменьшению.

Чем больше индуктивность, тем в большей степени ε_s противодействует изменению тока, т.е. индуктивность выполняет роль «электрической инертности» контура или катушки.

Пример. Экстратоки при размыкании или замыкании контура.

Рисунок. Рассмотрим пример возникновения ЭДС самоиндукции в этом случае в контуре с L , ε_0 (источника) и с его общим сопротивлением R .

В момент замыкания или размыкания цепи

$$I = \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_s}{R}$$

Определим, как изменяется этот ток с течением времени

$$\varepsilon_s = -L \frac{dI}{dt} \quad IR = \varepsilon_0 - L \frac{dI}{dt}$$

$$\varepsilon_0 - IR = \frac{dI}{dt}$$

Метод разделения переменных

$$\frac{dI}{\varepsilon_0 - IR} = \frac{1}{L} dt \quad (\times R)$$

$$\frac{dIR}{\varepsilon_0 - IR} = \frac{R}{L} dt \quad (\times -1)$$

$$\int \frac{d(\varepsilon_0 - IR)}{\varepsilon_0 - IR} = -\int \frac{R}{L} dt$$

$$\ln(\varepsilon_0 - IR) = -\frac{R}{L} t + \ln C$$

Проекспонируем выражение

$$\varepsilon_0 - IR = C \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$$

$$t = 0, I = I_0$$

$$\varepsilon_0 - I_0 R = C$$

$$\varepsilon_0 - I_0 R = (\varepsilon_0 - I_0 R) \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$$

$$I = I_0 \cdot e^{-\frac{R}{L}t} + \frac{\varepsilon}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) \quad - \text{закон изменения силы тока при замыкании или}$$

размыкании контура, т.е. при включении или выключении ЭДС.

<p>а) включение ЭДС источника в цепь – замыкание цепи</p> <p>$t = 0, I_0 = 0$</p> $I = \frac{\varepsilon}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right)$ <p>Постепенное нарастание тока</p>	<p>б) выключение источника</p> <p>$t = 0, I = I_0, \varepsilon_0 = 0$</p> $I = I_0 e^{-\frac{R}{L}t}$
--	--

Нарастание или убывание тока происходит тем быстрее, чем больше величина $\frac{R}{L}$, следовательно, при большой индуктивности L нарастание или убывание тока происходит медленнее вследствие явления самоиндукции.

Большая ЭДС самоиндукции, возникающая при быстром размыкании цепи, может во много раз превышать ЭДС источника, что приводит к пробое воздушного зазора между контактами (необходимы дугогасящие контакты).

Явление взаимной индукции.

Если расположить две катушки рядом, при этом по одной из них пропустить переменный ток, то он создаст переменное МП, которое порождает во второй проводящей катушке ЭДС электромагнитной индукции:

$$\varepsilon_i = -M_{12} \frac{dI}{dt}$$

Токи Фуко

Индукционный ток возникает не только во всех рассмотренных случаях.

В толще сплошных массивных проводников при изменении наведенного на них магнитного потока возникают токи, вызванные вихревыми полями – токи Фуко, что приводит к сильному нагреванию данного вещества, т.е. часть мощности электрической цепи расходуется на данные вихревые токи. Это наблюдается в сердечниках трансформаторов. Для уменьшения эффекта сердечники делают составными (слоями).

Основы теории Максвелла

1. Теорема Гаусса 2. Закон ЭМИ	$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = q_{своб.}$	ЭП создается эл. Зарядами.
3. Закон полного тока	$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = - \int_S \frac{d\vec{B}}{dt} d\vec{S}$	Переменное МП порождает ЭП.
4. Теорема Гаусса для МП	$\oint \vec{H} d\vec{l} = I_{макро} + I_{смещ}$ $\oint \vec{B} d\vec{S} = 0$	МП создается как макротоками, так и токами смещения, т.е. переменным ЭП.
		В природе не существует магнитных зарядов.

Уравнения связи

$$\vec{j} = \gamma \vec{E}, \quad \vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}$$

В основе теории Максвелла 4 основных уравнения и 3 уравнения связи. Они позволяют описать любые электрические и магнитные. Например, используя уравнения, Максвелл математически доказал существование ЭМ волн и рассчитал скорость их распространения.

$$\frac{d}{dt} \oint \vec{D} d\vec{S} = \frac{dq}{dt}$$

$$I_{см} = \oint \frac{d\vec{D}}{dt} d\vec{S}$$

Ток смещения – это переменное ЭП.

Выводы:

1. При всяком изменении МП в этой области возникает вихревое ЭП.
2. Существуют три способа изменения магнитного потока, следовательно, три способа использования явления ЭМИ в технике.

Нами рассмотрено это явление при изменении направления вектора \vec{B} , при изменении площади S .

3. Явление самоиндукции заключается в наведении переменного МП переменным электрическим током в проводнике.
4. Оба явления играют важную роль в технике (**приведите примеры самостоятельно**). Они имеют как положительные, так и отрицательные стороны в технике.