

Лекция №1.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Учебные вопросы

1. Введение.
2. Электрическое и магнитное поле - две стороны единого электромагнитного поля.
3. Основные понятия и определения: напряженность электрического поля, магнитная индукция, магнитный поток, электрические токи проводимости, переноса, смещения.

1. Роль и место дисциплины

В своей повседневной деятельности инженер имеет дело с эксплуатацией устройств, обеспечивающих получение, передачу, распределение и потребление электрической энергии, ее измерение и контроль и поэтому к профессиональной электротехнической подготовке современного инженера-эксплуатационника предъявляются очень высокие требования. Так, например:

современные системы выполняются на базе электрических и электромеханических элементов;

автоматизированные информационные и управляющие системы включают в себя электрические преобразователи, контролирующие параметры управляемого объекта, линии связи, по которым передается информация от преобразователей в ЦВМ; на базе переработки информации принимаются решения о воздействии на ход технологического процесса.

Сознательная, творческая работа инженера немыслима без глубокого понимания им физических процессов в электротехнических устройствах, системах и цепях, без умения предвидеть возможные результаты и последствия внедряемых технических новшеств, без стремления самому внести определенный вклад в развитие техники.

Другими словами, инженер должен хорошо знать электротехнику.

В широком научном смысле электротехника - это наука, изучающая способы практического использования электрической энергии. В практическом смысле под электротехникой понимается ряд отраслей техники, связанных с производством, передачей, распределением и потреблением электроэнергии, а также с ее различными преобразованиями.

Запишем следующие определение:

Электротехника - это учение об электромагнитных явлениях и способах их применения, о математических моделях и методах аналитиче-

ских расчетов и экспериментальных исследований процессов, протекающих в электротехнических устройствах.

Электротехника сформировалась в самостоятельную научную дисциплину в связи с конкретными инженерными задачами и использует законы учения об электричестве и магнетизме применительно к электрическим устройствам для решения вопросов, далеко выходящих за рамки изучаемых в курсе физики.

Электротехника содержит в себе два основных и единых раздела – **теорию электрических и магнитных цепей и теорию электромагнитного поля.**

Предметом дисциплины является изучение свойств, режимов работы и методов расчета типовых электрических и магнитных цепей и устройств. От практики данная дисциплина берет **объекты исследования** - указанные типовые цепи и устройства, от физики - ее законы электромагнитного поля, от математики - мощный аппарат исследования.

Дисциплина электротехника закладывает теоретическую основу, базу, фундамент для успешного изучения последующих общепрофессиональных и специальных дисциплин.

История электротехники как науки берет начало в глубокой древности.

До XVII века человечество, в основном, накапливало наблюдения электромагнитных явлений в природе, не понимая их сущности.

В XVII-XVIII вв :

- Отто фон Герике открыл первый электростатический генератор;
- А. Вольта создал первый гальванический элемент и батарею;
- М.В. Ломоносов создал теорию атмосферного электричества.

Использование электромагнитных явлений на практике началось сравнительно недавно, в XIX веке, когда была раскрыта сущность электромагнитных явлений:

- в 1802 г. В.В. Петров открыл электрическую дугу;
- Фарадей открыл закон электролиза и закон электромагнитной индукции (1831 г.);
- Джоуль и Ленц - закон теплового действия тока;
- Ампер - закон взаимодействия токов (по его закону в 1832 г. создан первый электромеханический генератор);
- Ом - закон, устанавливающий связь между током, напряжением и сопротивлением;
- Кирхгоф - 1 и 2 законы для расчета электрических цепей (1847 г.);
- Максвелл разработал теорию электромагнетизма (1873 г.);
- Эдиссон создал первую электростанцию;
- Доливо-Добровольский (1889 г.) изобрел трехфазный двигатель и трехфазный трансформатор;

- Столетов разработал теорию магнитных цепей и теорию фотоэлектрического эффекта;

- Попов изобрел радио (1895 г.).

В XX веке происходило широкое внедрение электротехники во все области:

- создание энергосистем;
- сверхмощные ГЭС и сверхдальние ЛЭП;
- развитие нетрадиционной энергетики.

Необходимо отметить большой вклад в развитие учения об электричестве русских ученых: Ломоносова, Лачинова, Лодыгина, Яблочкова, Попова, Доливо-Добровольского, Якоби и др.

Дисциплина имеет четко выраженную расчетную направленность. Овладение современными инженерными методами - одна из главных задач дисциплины, и ее решение немыслимо без наличия хорошей математической базы. Основы векторной алгебры и векторного анализа, дифференциальное и интегральное исчисление, операционное исчисление - все это находится на вооружении дисциплины электротехника.

Электротехника - дисциплина инженерная, поэтому требует большой строгости в начертании схем и отдельных элементов, записи формул, оформления отчетов по лабораторным занятиям. Поэтому большое внимание уделяется освоению общих требований ГОСТов Единой системы конструкторской документации (ЕСКД) и ГОСТа на единицы физических величин, а также инженерной электротехнической терминологии.

При изучении дисциплины будущие специалисты приобретают навыки обращения с техникой, навыки самостоятельного проведения физического эксперимента, преодоление боязни техники, осваивают правила и меры обеспечения электробезопасности при работе с электротехническими устройствами и цепями.

2. Электрическое и магнитное поле - две стороны единого электромагнитного поля.

Электромагнитное поле (ЭМП) – это особый вид материи, характеризующийся совокупностью взаимно связанных и взаимно обуславливающих друг друга электрического и магнитного полей.

Напомним известные из курса физики наиболее значимые для дальнейшего изложения материала свойства ЭМП.

ЭМП характеризуется непрерывным распределением в пространстве, например, в виде электромагнитной волны в вакууме, и вместе с тем оно может существовать в виде квантов излученного ЭМП, например, фотонов.

ЭМП оказывает силовое воздействие на электрические заряды.

Электрическое и магнитное поля могут быть изменяющимися и неизменными во времени.

Любое электромагнитное явление, рассматриваемое в целом, характеризуется двумя сторонами – электрической и магнитной, между которыми существует тесная связь.

Вместе с тем можно создать условия, когда в некоторой области пространства заметно проявление только электрических или только магнитных явлений. Таковыми являются, например, случай заряженных неподвижных проводящих тел, вне которых обнаруживается только электрическое поле, или в пространстве, окружающем неподвижные постоянные магниты, обнаруживается только магнитное поле.

Однако, если рассматривать явление в целом, нетрудно усмотреть как электрическую, так и магнитную его стороны. Так, в случае с постоянными магнитами в окружающем магниты пространстве взаимно компенсируются электрические поля элементарных частиц, образующих вещество магнитов, вследствие равенства суммарных зарядов положительно и отрицательно заряженных частиц. Магнитные же поля вследствие согласованного движения частиц, возникшего при намагничивании магнитов, суммируются в пространстве, окружающем магниты.

Таким образом, и в случаях, когда в некоторой области пространства обнаруживается только одно из полей (электрическое или магнитное), явление в целом оказывается электромагнитным. В переменном ЭМП само электрическое поле возникает вследствие изменения во времени магнитного поля и в свою очередь возникновение магнитного поля является результатом изменения во времени электрического поля.

Электрическое поле создается электрическими зарядами, а также изменяющимся магнитным полем.

Магнитное поле создается движущимися заряженными частицами, а также изменяющимся электрическим полем.

Для обнаружения электрического и магнитного полей, являющихся двумя сторонами единого электромагнитного поля, можно воспользоваться тем или иным их проявлением.

Электрическое поле принято определять по механическим силам, которые испытывают неподвижные заряженные тела, вносимые в это поле. Поэтому можно дать следующее определение:

Электрическое поле – это одна из сторон электромагнитного поля, обусловленная электрическими зарядами и изменением магнитного поля, оказывающая силовое воздействие на заряженные частицы и тела и выявляемая по силовому воздействию на неподвижные заряженные частицы и тела.

Простейшим случаем электрического поля является поле неподвижных электрически заряженных тел, называемое *электростатическим*.

Если скорость движения в электромагнитном поле заряженного точечного тела или заряженной частицы отлична от нуля, то, как показывает опыт, на них действует дополнительная сила, возникновение которой обусловлено наличием магнитного поля.

Магнитным полем называется одна из двух сторон электромагнитного поля, обусловленная движущимися заряженными частицами и изменением электрического поля, оказывающая силовое воздействие на движущиеся заряженные частицы и выявляемая по силовому воздействию, направленному нормально к направлению движения этих частиц и пропорциональному их скорости.

Таким образом, в каждой точке поля и в каждый момент времени заряженная частица испытывает вполне определенную по величине и направлению механическую силу.

3. Основные понятия и определения: напряженность электрического поля, магнитная индукция, магнитный поток, электрические токи проводимости, переноса, смещения

Основной физической величиной, характеризующей электрическое поле в каждой его точке является напряженность электрического поля.

Напряженность электрического поля – это силовая характеристика поля, равная отношению механической силы, действующей на неподвижное положительно заряженное тело, помещенное в данную точку поля, к величине заряда этого тела.

Напряженность электрического поля изображают вектором \vec{E} , по направлению совпадающим с вектором \vec{f}_Δ механической силы, действующей на положительно заряженное тело с зарядом q . (рис. 1). Следовательно, с учетом закона Кулона, определяющего силу взаимодействия между зарядами, получим:

$$\vec{E} = \frac{\vec{f}_\Delta}{q} = \frac{q}{4 \pi \varepsilon_a r^2} \cdot \vec{r}_0, \quad (1.1)$$

где r - расстояние от заряда до точки, в которой определяют напряженность поля, измеряемое в метрах (м);

\vec{r}_0 - единичный вектор;

ε_a - абсолютная диэлектрическая проницаемость среды, измеряемая в фарадах на метр (Ф/м).

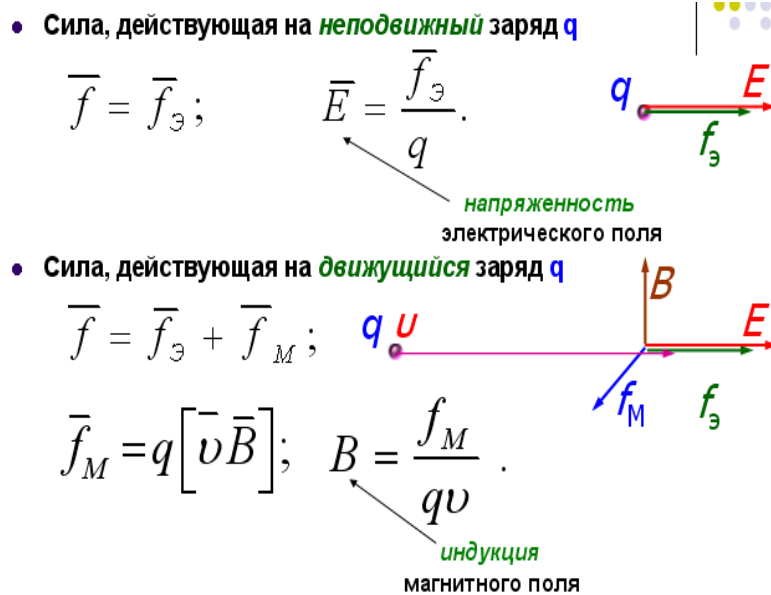


Рисунок 1.

В системе СИ сила $\vec{f}_э$ измеряется в ньютонах (Н), заряд измеряется Кулонами (Кл). При этом напряженность электрического поля, как следует из формулы (1.1), измеряется в Кл / (Ф/м·м²) = В/м (Вольт на метр).

Определив напряженность поля во всех его точках, можно провести ряд линий так, чтобы в каждой точке этих линий касательные к ним совпадали по направлению с вектором напряженности поля. Эти линии называют **линиями напряженности** электрического поля. На рисунке их снабжают стрелками, указывающими направление вектора \vec{E} . Совокупность таких линий образует картину электрического поля (рис. 2)

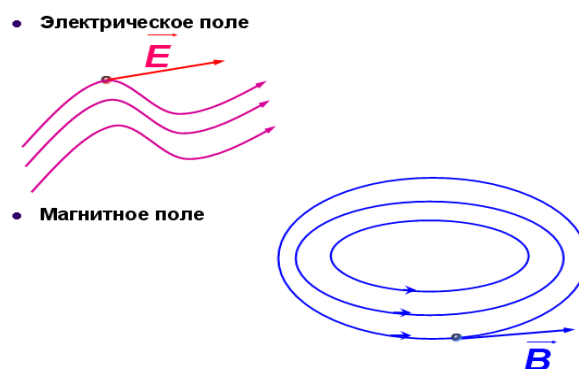


Рисунок 2. Силовые линии электрического и магнитного полей

При рассмотрении макроскопических процессов в электротехнических устройствах обычно усредняют во времени и в пространстве микроскопические неоднородности, являющиеся результатом того, что изучаемые процессы в

действительности представляют собой совокупность огромного числа элементарных процессов. Поэтому вещество характеризуют усредненными параметрами и называют средой.

Однородной называют среду, которая во всех элементах объема обладает одинаковыми физическими свойствами. *Изотропной* называют среду, обладающую в каждом элементе объема одинаковыми свойствами во всех направлениях.

В ряде случаев электрическое поле удобно характеризовать не напряженностью, а *электрической индукцией* \vec{D} . В однородной и изотропной среде напряженность и индукция электрического поля связаны соотношением (**записать на доске**):

$$\vec{D} = \epsilon_a \vec{E}.$$

На рис.3 изображена картина электрического поля двух неподвижных заряженных тел: с положительным зарядом q_1 и отрицательным зарядом q_2 .

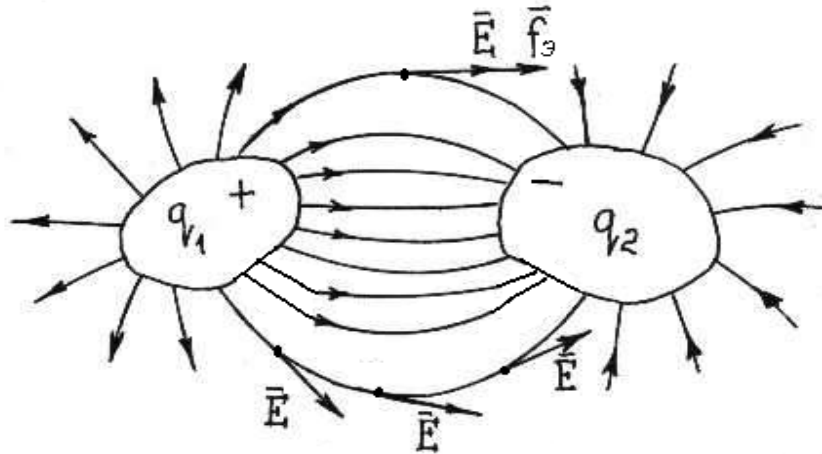


Рис.3 Картина электрического поля

Основная физическая величина, характеризующая магнитное поле в каждой его точке называется *магнитной индукцией*. Магнитная индукция есть векторная величина, которая изображается вектором \vec{B} .

Если заряженное точечное тело или заряженная частица движется в электромагнитном поле со скоростью \vec{v} , то на него действует сила \vec{f}_M со стороны магнитного поля, перпендикулярная вектору скорости \vec{v} и пропорциональная величине скорости v .

Кроме того, сила \vec{f}_M пропорциональна величине магнитной индукции, причем имеет место равенство:

$$\vec{f}_M = q[\vec{v} \vec{B}], \quad (1.2)$$

где $[\vec{v} \vec{B}]$ - векторное произведение векторов \vec{v} и \vec{B} .

Из (1.2) следует, что вектор силы \vec{f}_M перпендикулярен к векторам \vec{v} и \vec{B} . Таким образом, величину магнитной индукции B находим из выражения:

$$B = \frac{f_M}{qv}. \quad (1.3)$$

Направление магнитной индукции может быть определено по правилу левой руки (см. рис. 4) или совпадает с поступательным перемещением правого винта при вращении его от направления механической силы к направлению движения. Единицей измерения магнитной индукции является тесла (Тл).

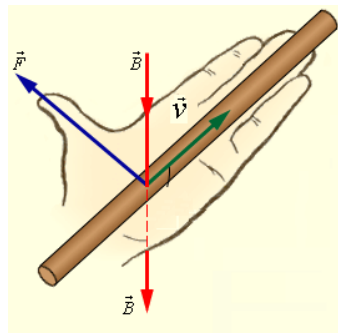


Рисунок 4. К определению направление магнитной индукции

Графически магнитное поле изображается с помощью линий магнитной индукции. **Линиями магнитной индукции** называются кривые, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора магнитной индукции в этих точках поля (рис. 5).

Для удобства практических расчетов полей Максвелл ввел в теорию ещё одну векторную характеристику магнитного поля – *напряженность магнитного поля* \vec{H} .

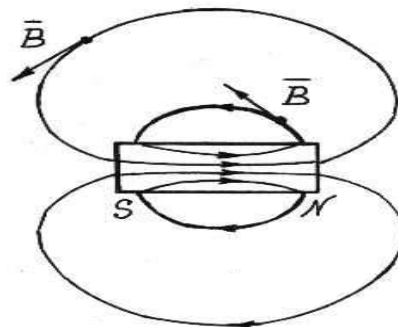


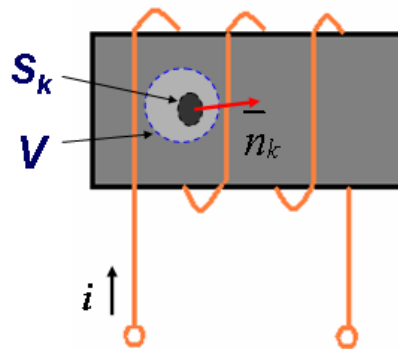
Рис.5 Магнитное поле постоянного магнита

Как известно из физики, вещество, внесенное во внешнее магнитное поле, испытывает со стороны сил этого поля механическое воздействие на элементарные микротоки, то есть на движущиеся по орбитам электроны атомов. Происходит ориентация микротоков в определенном направлении - намагничивание. Степень намагниченности вещества характеризуется *вектором намагниченности* \overline{M} , равному магнитному моменту единицы объема V вещества (записать на доске):

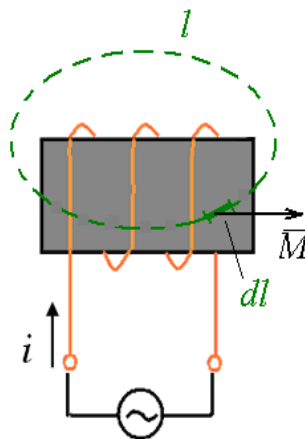
$$\overline{M} = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\sum_k i'_k \cdot S_k \cdot \overline{n}_k}{V},$$

где i'_k – элементарные микротоки в данном объеме вещества;

\overline{n}_k – единичный вектор нормали к поверхности S_k , ограниченной контуром, в котором протекает микроток i'_k .



С другой стороны, намагниченность определяют как *сумму микротоков на единицу длины линии, проведенной в данной точке вещества в том направлении, в котором эта сумма будет максимальной*. Направление этой линии и есть направление вектора \overline{M} .



Математически это определение можно записать следующим образом

$$i' = \int \overline{M} d\overline{l}, \quad (2)$$

где i' - сумма микротоков вдоль контура интегрирования.

Намагниченность вещества измеряется в амперах на метр (А/м) (**записать на доске**).

Для удобства практических расчетов полей Максвелл ввел в теорию ещё одну векторную характеристику магнитного поля – *напряженность магнитного поля* \overline{H} .

В изотропной среде вектор напряженности \overline{H} связан с вектором магнитной индукции соотношением

$$\overline{B} = \mu_a \cdot \overline{H},$$

где μ_a – *абсолютная магнитная проницаемость* вещества, измеряемая в генри на метр (Гн/м) (**записать на доске**).

Напряженность магнитного поля измеряется в амперах на метр (А/м) (**записать на доске**).

Опытным путем установлено соотношение

$$\overline{M} = \alpha \overline{H},$$

где α – *магнитная восприимчивость вещества*, величина безразмерная.

Все три векторных характеристики магнитного поля связаны соотношением

$$\overline{B} = \mu_0 (\overline{H} + \overline{M}),$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – *абсолютная магнитная проницаемость вакуума* (**записать на доске**).

В изотропной среде вектор напряженности \overline{H} связан с вектором магнитной индукции соотношением

$$\overline{B} = \mu_a \cdot \overline{H}, \quad (1.4)$$

где μ_a – абсолютная магнитная проницаемость вещества, измеряемая в генри на метр (Гн/м).

Напряженность магнитного поля измеряется в амперах на метр (А/м).

Магнитный поток Φ (рис. 6) через некоторую поверхность S – это поток вектора магнитной индукции через эту поверхность:

- **Магнитный поток**

- **Потокосцепление** катушки с w витками

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

$$\Psi = w\Phi.$$

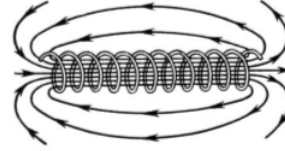
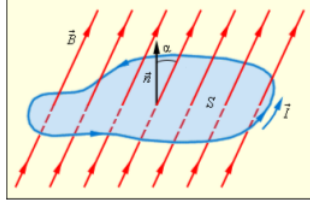


Рисунок 6. Магнитный поток и потокосцепление

$$\Phi = \int_S B \cos\beta \, dS = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}. \quad (1.5)$$

Единицей магнитного потока является вебер (Вб).

Источниками магнитного поля служат **движущиеся электрические** заряды или изменяющееся электрическое поле. В общем случае под источником магнитного поля понимают так называемый *полный электрический ток*. Связь между магнитным полем и полным электрическим током устанавливается *законом полного тока*. В интегральной форме это уравнение имеет вид:

$$\oint_{\ell} \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S}, \quad (1.6)$$

где \vec{j} - плотность *полного электрического тока*.

Это уравнение также записывают в форме

$$\oint_{\ell} \vec{H} \cdot d\vec{l} = i,$$

где i - полный электрический ток.

С позиций теории ЭМП принято различать три вида электрического тока. **Ток проводимости** $i_{\text{пр}}$ представляет собой упорядоченное движение зарядов: электронов в металле или ионов в электролите. Он определяется потоком вектора плотности тока $\vec{j}_{\text{пр}} = \gamma \vec{E}$ через поперечное сечение S проводника с проводимостью γ и численно равен отношению количества электричества Δq , переносимого заряженными частицами, к промежутку времени Δt , стремящемуся к нулю:

$$i_{np} = \int_S \bar{j}_{np} d\bar{S} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt}.$$

Ток переноса i_{np} возникает под действием электрического поля \bar{E} в свободном пространстве, заполненном зарядами со среднеобъемной плотностью ρ , движущимися со скоростью \bar{v} :

$$i_{np} = \int_S \bar{j}_{np} d\bar{S},$$

где $\bar{j}_{np} = \rho \bar{v}$ - плотность тока переноса.

Ток электрического смещения $i_{см}$ возникает в диэлектриках или в вакууме при изменении электрического поля во времени и обусловлен изменением электрической поляризованности вещества:

$$i_{см} = \int_S \bar{j}_{см} d\bar{S},$$

где $\bar{j}_{см}$ - плотность тока смещения.

Токи проводимости и переноса могут возникать как в постоянных, так и в переменных электрических полях. Ток смещения присутствует только в переменных полях.

Таким образом, полный электрический ток представляет собой два разнородных явления - движение электрических зарядов и изменение электрического поля во времени.

Плотность полного электрического тока определяется выражением:

$$\bar{j} = \bar{j}_{np} + \bar{j}_{пер} + \bar{j}_{см}.$$