

## Лекция №3


### Электрофизические характеристики материалов. Диэлектрическая и магнитная проницаемости.

Особенностями использования материалов в электроэнергетике является то, что они эксплуатируются в условиях воздействия электрических полей, и в несколько меньшей степени, в условиях воздействия магнитных полей. Основными процессами, происходящими под действием этих полей являются поляризация вещества, электропроводность, намагничивание вещества. В предыдущей лекции рассматривалась электропроводность. В этой лекции будут рассмотрены следующие вопросы:

#### 3.1. Диэлектрическая проницаемость и электрические поля в диэлектриках.

#### 3.2.. Магнитная проницаемость и магнитные поля.

Прежде чем приступить к лекции хотелось бы напомнить термины и определения.

 **Электрическое поле** - это вектор, направленный от положительного заряда к отрицательному заряду. Численно оно равно силе, действующей на единичный заряд (заряд в один кулон). Размерность напряженности поля в системе единиц СИ - В/м. С напряжением между точками а и b оно связано следующим выражением:

$$U = \int_a^b E dx \quad (3.1),$$

а с потенциалом  $\varphi$ :

$$E = - \text{grad } \varphi. \quad (3.2)$$

В однородном поле, в межэлектродном зазоре d, эти выражения упрощаются

$$U = E \cdot d, \text{ или } E = U/d \quad (3.3)$$

---

### *3.1. Диэлектрическая проницаемость материалов.*

[в начало лекции](#)


---

Определение этой величины вы должны помнить еще из школы. Давайте вспомним. Если взять плоский конденсатор в вакууме, то заряд на каждой его пластине равен (по модулю):

$$Q_0 = \frac{\epsilon_0 \cdot S \cdot U}{d} \quad (3.4)$$

где  $\epsilon_0$  - диэлектрическая постоянная, или диэлектрическая проницаемость вакуума,  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м,  $S$  - площадь каждой из пластин,  $d$  - зазор между пластинами,  $U$  - напряжение между ними. Разделив на площадь и перейдя к плотности заряда на обкладке получим  $\sigma_{\square} = \epsilon_0 E$ .

Если в межэлектродное пространство ввести диэлектрик, то что произойдет? Все зависит от того, подключен заряженный конденсатор к источнику или отключен. В подключенном конденсаторе напряжение между пластинами принудительно поддерживается, но заряд на каждой пластине увеличивается до нового значения  $Q_m$ .

 **Отношение  $Q_m/Q_0 = \epsilon$  называется диэлектрической проницаемостью материала.**


Из самого определения видно, что диэлектрическая проницаемость материала является **безразмерной** величиной. Перейдя к плотности заряда на обкладке в случае диэлектрика получим  $\sigma_{\square} = \epsilon_0 \epsilon E$ .

Откуда притекает дополнительный заряд? Ясно, что заряд притекает из источника.


В отключенном от источника заряженном конденсаторе ситуация несколько отличается. Заряд не может измениться, т.к. ему некуда утекать и неоткуда притекать. В этом случае изменится другой параметр. Оказывается, уменьшаются напряжение на конденсаторе и, соответственно, напряженность поля в конденсаторе.

**Коэффициент ослабления поля тот же самый, как и в случае увеличения заряда при подключенном источнике, т.е. он равен  $\epsilon$ .** Это второе определение диэлектрической проницаемости.

За счет чего это происходит? Рассмотрим этот вопрос подробнее. Здесь придется обратиться к понятию **поляризации**. Как известно, молекулы состоят из атомов, окруженных электронными оболочками. При этом электроны могут равномерно распределяться по молекуле, а могут и концентрироваться на каких-либо атомах. В первом случае говорят, что молекула неполярная. Пример - молекула водорода или атом гелия, или молекула бензола. Во втором случае в молекуле образуются области с положительным и отрицательным зарядом. Если в молекуле можно выделить направление, вдоль которого с одной стороны можно расположить положительные заряды, а с другой стороны - отрицательные, то такая молекула называется **полярной** или **дипольной**.

 **Дипольный момент молекулы  $\vec{d}$  является вектором, направленным от отрицательного к положительному заряду. Численно он равен произведению расстояния между зарядами на модуль заряда.**

В неполярной молекуле под действием электрического поля происходит смещение электронных оболочек. Возникает индуцированный дипольный момент у молекулы, молекула поляризуется.


 **Поляризация за счет смещения электронов называется электронной.** Возникающий дипольный момент невелик. Диэлектрическая проницаемость неполярных жидкостей и твердых диэлектриков также невелика, она не превышает 3.


 **Диэлектрики, состоящие из неполярных молекул называются неполярными диэлектриками.**


В полярной молекуле под действием поля происходит поворот диполя в направлении напряженности электрического поля. В этом случае, в зависимости от значения дипольного момента молекулы и концентрации молекул поляризация может быть значительной. Для жидкостей и твердых диэлектриков с дипольной поляризацией диэлектрическая проницаемость достигает примерно 100 и даже больше.

 **Диэлектрики, состоящие из полярных молекул называются полярными диэлектриками.**


В некоторых твердых диэлектриках может существовать особый вид поляризации: спонтанная, или доменная поляризация. Она существует только в кристаллах, но далеко не во всех, в аморфных телах ее не бывает. Оказывается, иногда в среде возникают самопроизвольно микроскопические области с поляризацией, которая получается при смещении положительно заряженных ионов решетки в одну сторону, а отрицательно заряженных ионов в другую сторону.

 **Микрообласть со спонтанной поляризацией называется доменом.** Обычно размер доменов составляет микроны и десятки микрон. Суммарный дипольный момент любого образца равен нулю, т.к. дипольные моменты доменов направлены в разные стороны.

 **Если дипольные моменты доменов хаотически направлены в разные стороны, то такой диэлектрик называется сегнетоэлектриком.**

 **Если домены существуют парами, причем у каждой пары дипольные моменты направлены в противоположные стороны, такой диэлектрик называется антисегнетоэлектриком.** Под действием электрического поля домены в диэлектрике поворачиваются в направлении электрического поля, как гигантские диполи. Только в отличие от диполей, где молекулы физически поворачиваются, в доменах перестраивается структура, так, что результирующий вектор поляризации каждого домена чуть-чуть смещается в направлении поля.

**Диэлектрическая проницаемость сегнетоэлектриков и антисегнетоэлектриков велика, она может достигать десятков тысяч.**

 **Суммарный дипольный момент единицы объема называется поляризацией**  $\vec{P} = \sum \vec{d}_i$ . Вектор поляризации, появляющейся под действием электрического поля, направлен вдоль направления электрического поля. Его

значение связано с напряженностью поля  $P = \epsilon_0 \chi E$ , где  $\chi$  - диэлектрическая восприимчивость. Диэлектрическая проницаемость связана с восприимчивостью  $\epsilon = 1 + \chi$ .

В газообразном диэлектрике количество дипольных моментов мало вследствие низкой плотности газа, поэтому диэлектрическая проницаемость мало отличается от единицы, даже для полярных газов (Отличие в третьем, четвертом знаке после запятой).

Именно поляризация и вызывает увеличение плотности заряда на обкладках конденсатора при подключенном источнике. Значение плотности заряда на обкладках конденсатора  $\sigma = P + \epsilon_0 E$ . Естественно, что в случае вакуума поляризация равна нулю, диэлектрическая проницаемость в точности равна единице.

 В электродинамике вводят понятие **вектора электрического смещения**

$$\vec{D} = \vec{P} + \epsilon_0 \cdot \vec{E} = \epsilon_0 \epsilon E \quad (3.5.)$$

который определяет заряд как в случае вакуума, так и в случае диэлектрика. Другие названия этого термина - **электрическая индукция или электростатическая индукция**. Размерность индукции Кл/м<sup>2</sup>. Кроме приведённых выражений полезно будет также вспомнить соотношения для электрического смещения **D**:

$$D = \frac{q}{S} = \sigma = \epsilon_0 \epsilon E, \quad (3.6.)$$

Энергия электрического поля в среде связана с диэлектрической проницаемостью

$$W = \epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot E^2 / 2 \text{ или } W = DE / 2, \text{ или } W = D^2 / 2\epsilon.$$

Для устройств, содержащих в себе электрические поля важно понимать как изменяется напряженность электрического поля при использовании комбинации двух диэлектриков с разной диэлектрической проницаемостью. Если расположить диэлектрики так, что электрическое поле перпендикулярно поверхности раздела, то значения напряжённости поля в каждом материале обратно пропорциональны диэлектрическим проницаемостям:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} \quad (3.7)$$

Рассмотрим простую задачку. В плоский конденсатор с зазором  $d$  и напряжением  $U$  вводят пластину диэлектрика, которая имеет толщину  $d_1$ , диэлектрическую проницаемость  $\epsilon$ . Как изменится поле в оставшейся части зазора и какое поле будет в диэлектрике?

Несложно решить эту задачу воспользовавшись выражениями (3.3) и (3.7), которые для нашего случая можно переписать как

$$E_B(d-d_1) + E_D d_1 = U \quad (3.8)$$

$$E_B \epsilon_B = E_D \epsilon_D$$

Решив систему уравнений получим:

$$E_{\varepsilon} = \frac{U}{d(1 - \frac{d_1}{d}(1 - \frac{\varepsilon_{\varepsilon}}{\varepsilon_{\delta}}))} \quad E_{\delta} = \frac{U \cdot \frac{\varepsilon_{\varepsilon}}{\varepsilon_{\delta}}}{d(1 - \frac{d_1}{d}(1 - \frac{\varepsilon_{\varepsilon}}{\varepsilon_{\delta}}))} \quad (3.9)$$

Анализируя эти выражения можно увидеть, что поле в газовой прослойке всегда увеличено, а в диэлектрической - уменьшено. Емкость конденсатора в этом случае увеличена, но незначительно по сравнению с емкостью конденсатора без диэлектрика.

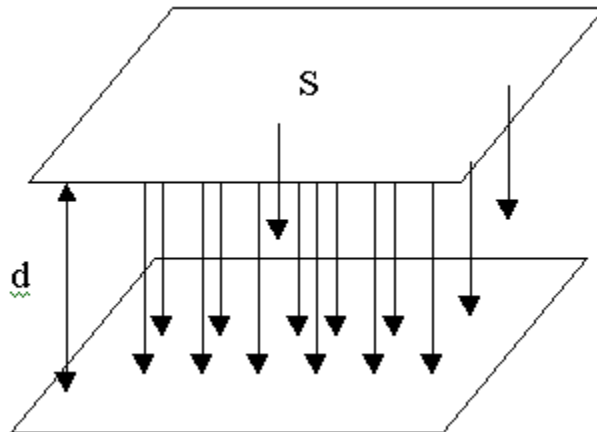
В случае, когда электрическое поле параллельно поверхности раздела, напряженности поля в материалах одинаковы. Этот случай можно реализовать, вводя в конденсатор диэлектрик, толщины, равной величине межэлектродного зазора в конденсаторе. Емкость, при этом, увеличивается существенно, пропорционально объемной доле диэлектрика .

Для понимания процессов в диэлектриках важно знать значения полей в случае различных электродов. Наиболее часто используются модельные представления электродных систем, к которым с той или иной степенью приближения можно свести многие реальные системы электродов. Это три типа полей:

- плоско- параллельное,
- радиально-цилиндрическое, или аксиальное
- радиально-сферическое.

Ниже приводятся описание этих полей и необходимые для расчета формулы.

**Плоско-параллельное поле.** Здесь эквипотенциальные поверхности (поверхности уровня) представляют собой параллельные плоскости, а линии индукции, совпадающие с направлением вектора напряженности поля (которая во всех точках поля одинакова), - перпендикулярны этим плоскостям.



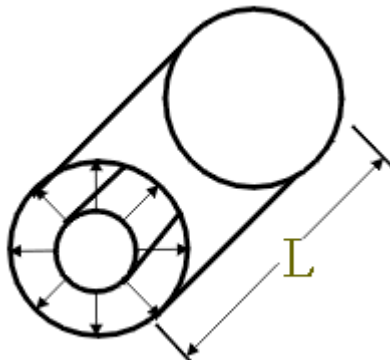
Значение ёмкости:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon \cdot \frac{S}{d} \quad (3.10)$$

**⚠** В плоско-параллельном поле напряженность  $E$  одинакова во всех точках. Поэтому:

$$U = E \times d \quad (3.11)$$

**Радиально-цилиндрическое поле.** Эквипотенциальными в этом поле являются коаксиальные (имеющие общую ось) цилиндрические поверхности, а линии поля располагаются в радиальном направлении. Распределение напряженности электрического поля:



$$E(r) = \frac{U}{r \cdot \ln(r_2 / r_1)}$$

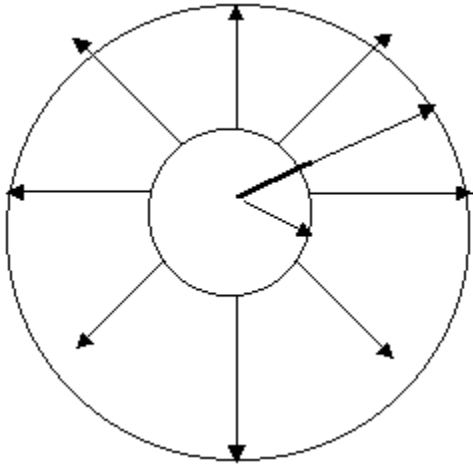
Значение емкости:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{2\pi \cdot l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (3.12)$$

$r_1$  - радиус внутреннего цилиндра,  $r_2$  - радиус внешнего цилиндра

**Радиально-сферическое поле.** В этом поле поверхности уровня - это сферы с общим центром, а линии индукции направлены по радиусам.

Распределение напряженности электрического поля:



$$E(r) = \frac{U \cdot r_2 \cdot r_1}{r^2 \cdot (r_2 - r_1)}$$

Значение емкости:

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon r_1 \quad (3.13)$$

Причем емкость шара по отношению к сфере бесконечного радиуса

$$r_2 = \infty \quad C = 4\pi\epsilon_0\epsilon r_1 \quad (3.14)$$

Ёмкость полушария в два раза меньше емкости шара.

### 3.2. Магнитная проницаемость.

[В начало лекции](#)

Аналогично рассмотрению диэлектрической проницаемости, связывающей электрическую индукцию с напряженностью электрического поля, магнитная проницаемость связывает магнитную индукцию  $\mathbf{B}$  с напряженностью магнитного поля  $\mathbf{H}$ .

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu \cdot \mathbf{H} \quad (3.15)$$

Здесь  $\mu_0$  - магнитная постоянная или магнитная проницаемость вакуума.  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м. Можно ввести понятие намагниченности  $\mu_0 \mathbf{M} = \mathbf{B} - \mu_0 \mathbf{H}$ . Этот фактор вносит в магнитную индукцию именно среда, т.е. намагниченность является характеристикой среды. Аналогично поляризации среды в электрическом поле намагниченность складывается из намагниченностей отдельных атомов, которые называются магнитными моментами

атомов  $M = \sum m_i$ . Намагниченность обычно пропорциональна напряженности магнитного поля

$$M = \chi_m \cdot H \quad (3.16)$$

где  $\chi_m$  - магнитная восприимчивость вещества. Значения  $\mu$  и  $\chi_m$  связаны  $\mu = \chi_m + 1$

$$\text{Энергия магнитного поля } W = B \cdot H / 2 = \mu_0 \cdot \mu \cdot H^2 / 2 = B^2 / 2 \mu_0 \mu$$

Магнитное поле имеет отличия от электрического поля. Электрическое поле создается зарядами, магнитное - токами. Силовые линии электрического поля начинаются на положительном заряде и, обязательно, заканчиваются на отрицательном заряде. Силовые линии магнитного поля замкнуты, они окружают линии тока. В электрическом поле заряд порождает индукцию поля.

$$D = q / 4\pi\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot r^2 \quad (3.17)$$

В магнитном поле ток порождает напряженность магнитного поля (закон Био-Савара).

$$H = I / 2\pi r. \quad (3.18)$$

Приведем еще выражение для напряженности поля и индукции в длинном соленоиде, которое специфично именно для магнитного поля.

$$H = n \cdot I, B = \mu_0 \cdot \mu \cdot n \cdot I \quad (3.19)$$

где  $n$  - число витков катушки на единицу длины.

В электрическом поле сила, действующая на заряд, пропорциональна напряженности поля (закон Кулона). В магнитном поле, сила действующая на заряд пропорциональна индукции. Еще одно принципиальное отличие состоит в том, что диэлектрическая проницаемость не может быть меньше 1, тогда как магнитная проницаемость может быть меньше 1 в некоторых материалах..

Различные материалы по разному ведут себя в магнитном поле и, соответственно имеют различную магнитную проницаемость.

 **Диамагнетики - вещества, имеющие магнитную проницаемость меньше 1.**


Подавляющее большинство веществ являются диамагнетиками. Диамагнетизм проявляется тогда, когда атомы и молекулы не имеют магнитного момента в отсутствии магнитного поля, а намагниченность создается только за счет действия магнитного поля на электроны молекул. При этом магнитная восприимчивость  $\chi_m < 0$ . По порядку величины значение восприимчивости составляет  $(-10^{-6})$ .

 **Парамагнетики - вещества, имеющие магнитную проницаемость больше 1.**


Эти вещества содержат атомы и электроны, имеющие собственный магнитный момент, который связан с орбитальным движением электронов или с собственным




моментом импульса электрона, т.н. спином. Парамагнетиками являются кислород, магний, натрий (NaCl - диамагнетик), кальций, титан, палладий.

 **Ферромагнетики** - вещества, имеющие магнитную проницаемость много больше чем 1, которая создается спонтанной намагниченностью доменов, хаотически ориентированных в пространстве.

Это железо, никель, кобальт и ряд более редких веществ. На основе этих элементов изготавливаются магнитные материалы.

 **Ферримагнетики** - вещества, имеющие магнитную проницаемость много больше чем 1, которая создается спонтанной намагниченностью кристаллических решеток, попарно антипараллельно ориентированных в пространстве. При этом суммарный магнитный момент не равен нулю.

 **Антиферромагнетики** - вещества, имеющие магнитную проницаемость немного больше чем 1, которая создается спонтанной намагниченностью кристаллических решеток, попарно антипараллельно ориентированных в пространстве и скомпенсировавших друг друга.

Примеры ферримагнетиков и антиферромагнетиков - ферриты, соединения типа  $Fe_2O_3$  с  $MeO$ , где  $Me$  - двухвалентный металл.