ЧАСТНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ КОЛЛЕДЖ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»

ЛЕКЦИЯ 4. ТЕМА 3. ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

Электродинамика — раздел физики, изучающий взаимодействие электрических зарядов и токов посредством электромагнитного поля. В её основе лежат уравнения Максвелла, объединившие электрические и магнитные явления в единую теорию. Настоящая лекция посвящена преимущественно классической электростатике и стационарному электромагнетизму — фундаменту, на котором строится вся современная электротехника и электроника.

1. Электрические заряды

Электрический заряд — физическая величина, характеризующая способность тела участвовать в электромагнитном взаимодействии. Заряд дискретен: минимальным носителем положительного заряда является протон, отрицательного — электрон. Элементарный заряд:

$e = 1{,}602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$ Кл.

Единица заряда в СИ — кулон: 1 Кл равен заряду, проходящему через поперечное сечение проводника за 1 с при силе тока 1 А.

Ключевые свойства электрического заряда:

- заряды бывают двух знаков; одноимённые заряды отталкиваются, разноимённые притягиваются;
- заряд инвариантен: его величина не зависит от скорости движения носителя;
- заряд аддитивен — заряд системы равен сумме зарядов её частей.

Закон сохранения заряда

В любой изолированной (электрически замкнутой) системе алгебраическая сумма зарядов сохраняется:

$$\sum q_i = \text{const}.$$

Заряд не создаётся и не исчезает — он может лишь перераспределяться между телами или переходить из одной формы в другую (например, при рождении пары «электрон — позитрон» суммарный заряд остаётся нулевым). Закон сохранения заряда — фундаментальный закон природы, следствие калибровочной симметрии электромагнитного взаимодействия.

Закон Кулона

Сила взаимодействия двух точечных неподвижных зарядов в вакууме пропорциональна произведению модулей зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{|q_1 q_2|}{r^2}, \qquad \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \ \text{Н} \cdot \text{м}^2/\text{Кл}^2.$$

Здесь $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м — электрическая постоянная. Сила направлена вдоль прямой, соединяющей заряды; это центральная сила. В среде с диэлектрической проницаемостью ε сила взаимодействия ослабевает в ε раз. Закон Кулона подтверждён с высокой точностью; отклонения от квадратичной зависимости не обнаружены вплоть до масштабов порядка 10^{-17} м.

2. Электрическое поле

Напряжённость электрического поля

Взаимодействие зарядов осуществляется через электрическое поле — особую форму материи, посредством которой передаётся силовое воздействие между зарядами. Характеристика поля — напряжённость $\vec{E}$, равная силе, действующей со стороны поля на единичный положительный пробный заряд:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}.$$

Единица напряжённости — вольт на метр (В/м) или ньютон на кулон (Н/Кл). Напряжённость поля точечного заряда:

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{|q|}{\varepsilon r^2}.$$

Графически поле изображают силовыми линиями: они проводятся так, чтобы касательная в каждой точке совпадала с направлением $\vec{E}$, а густота линий была пропорциональна модулю напряжённости. Силовые линии начинаются на положительных зарядах (или в бесконечности) и заканчиваются на отрицательных; они никогда не пересекаются.

Принцип суперпозиции

Поле системы зарядов равно векторной сумме полей, создаваемых каждым зарядом в отдельности:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \cdots + \vec{E}_n.$$

Принцип суперпозиции — прямое следствие линейности уравнений Максвелла; он выполняется вплоть до полей порядка ядерных напряжённостей.

Теорема Гаусса

Поток вектора напряжённости через замкнутую поверхность пропорционален алгебраической сумме зарядов внутри неё:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q_{\text{внутр}}}{\varepsilon_0 \varepsilon}.$$

Теорема Гаусса — один из четырёх основных законов электромагнетизма; она позволяет находить поля симметричных распределений зарядов (сфера, цилиндр, плоскость).

3. Энергетические характеристики поля

ЧАСТНОЕ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ «СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ КОЛЛЕДЖ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ»

Работа сил электростатического поля

Работа сил электростатического поля по перемещению заряда не зависит от формы пути, а зависит только от начального и конечного положений заряда:

$$A = q(U_1 - U_2).$$

Отсюда следует, что электростатическое поле потенциально, а силы взаимодействия консервативны.

Потенциал

Потенциал φ — скалярная энергетическая характеристика поля: потенциальная энергия единичного положительного заряда в данной точке,

$$\varphi = \frac{W_p}{q}.$$

Разность потенциалов между точками:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{1\to 2}}{q}.$$

Единица измерения — вольт (В). Потенциал поля точечного заряда:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{q}{\varepsilon r}.$$

Эквипотенциальные поверхности

Эквипотенциальные поверхности — геометрическое место точек с одинаковым потенциалом. Для точечного заряда это концентрические сферы, для однородного поля — плоскости. Силовые линии всегда перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям: движение заряда вдоль такой поверхности не сопровождается работой поля. Эквипотенциальные поверхности не пересекаются.

Связь напряжённости и разности потенциалов

В однородном поле напряжённость связана с разностью потенциалов между двумя поверхностями, расположенными на расстоянии d:

$$E = \frac{U}{d}.$$

В общем случае напряжённость равна градиенту потенциала со знаком минус:

$$\vec{E} = -\nabla\varphi = -\left(\frac{\partial\varphi}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial\varphi}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial\varphi}{\partial z}\vec{k}\right).$$

Напряжённость направлена в сторону наискорейшего убывания потенциала; её модуль равен изменению потенциала на единицу длины.

4. Диэлектрики в электрическом поле

Поляризация

Диэлектрики — вещества, в которых свободные носители заряда практически отсутствуют. Под действием внешнего поля они поляризуются: суммарный дипольный момент единицы объёма становится отличным от нуля. Различают три механизма поляризации:

- **электронная (деформационная)** — смещение электронных оболочек атомов относительно ядер (характерна для неполярных диэлектриков: N_2, O_2, $\mathrm{CCl_4}$);
- **ориентационная** — поворот уже существующих дипольных молекул вдоль поля (полярные диэлектрики: H_2O, HCl);
- **ионная** — смещение ионов кристаллической решётки (например, в NaCl).

Мера поляризации — вектор поляризованности $\vec{P}$, связанный с напряжённостью соотношением $\vec{P} = \chi\varepsilon_0\vec{E}$, где χ — диэлектрическая восприимчивость. Результирующее поле в диэлектрике ослабляется:

$$\vec{E} = \frac{\vec{E}_0}{\varepsilon}.$$

Сегнетоэлектрики (например, титанат бария $\mathrm{BaTiO_3}$ — сегнетова соль и керамические титанаты) обладают спонтанной поляризацией и гистерезисом — петлёй гистерезиса в координатах $P(H)$; это основа керамических конденсаторов.

Проводники в электрическом поле

В проводниках есть свободные носители заряда (в металлах — электроны проводимости). В равновесии:

- напряжённость поля внутри проводника равна нулю;
- потенциал во всех точках проводника одинаков (проводник эквипотенциален);
- заряд распределён только по поверхности, причём плотность заряда максимальна на выступах и остриях (следствие теоремы Гаусса);
- вектор $\vec{E}$ у поверхности перпендикулярен поверхности: $E = \sigma/(\varepsilon_0\varepsilon)$.

Явление перераспределения свободных зарядов во внешнем поле называется электростатической индукцией. Внутри замкнутой проводящей оболочки поле отсутствует — на этом принципе основана электростатическая защита (клетка Фарадея).

5. Конденсаторы

Конденсатор — система двух проводников (обкладок), разделённых диэлектриком, обладающая ёмкостью $C = q/U$. Ёмкость плоского конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d},$$

где S — площадь обкладок, d — расстояние между ними. Ёмкость измеряется в фарадах: 1 Ф — ёмкость конденсатора, при сообщении которому заряда 1 Кл напряжение изменяется на 1 В. На практике используют микрофарады (мкФ) и пикофарады (пФ).

Соединения конденсаторов

Соединение	Формула
Последовательное	$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots$
Параллельное	$C = C_1 + C_2 + \dots$

При последовательном соединении заряды всех конденсаторов одинаковы, а напряжение делится; при параллельном — одинаково напряжение, а заряды складываются. Батареи конденсаторов собираются из комбинаций этих двух типов.

Энергия заряженного конденсатора

Энергия заряженного конденсатора:

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{qU}{2}.$$

Энергия локализована в электрическом поле между обкладками. Объёмная плотность энергии электрического поля:

$$w = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2}.$$

Этот результат — важнейший аргумент в пользу материальности поля: энергия связана не с зарядами, а с самим полем, заполняющим пространство.

6. Законы постоянного тока

Условия существования тока

Электрический ток — упорядоченное движение заряженных частиц. Для его возникновения и поддержания необходимы:

1. наличие свободных носителей заряда;
2. наличие электрического поля, обеспечивающего их направленное движение (разность потенциалов).

За направление тока условно принято движение положительных зарядов. За время t через сечение проводника проходит заряд $q = It$.

Сила и плотность тока

Сила тока — заряд, проходящий через поперечное сечение проводника в единицу времени:

$$I = \frac{q}{t}.$$

Плотность тока — сила тока на единицу площади сечения:

$$j = \frac{I}{S} = qnv,$$

где n — концентрация носителей, v — скорость их упорядоченного движения. Скорость дрейфа электронов в металле невелика (порядка 10^{-4} м/с при типичных токах), однако электромагнитное поле распространяется в цепи со скоростью света — поэтому лампы загораются практически мгновенно.

Закон Ома для участка цепи

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

Сопротивление проводника зависит от материала, длины и площади сечения:

$$R = \rho\frac{l}{S},$$

где ρ — удельное сопротивление материала. Наименьшим удельным сопротивлением обладают серебро ($1{,}6 \cdot 10^{-8}$ Ом·м) и медь ($1{,}7 \cdot 10^{-8}$ Ом·м).

Зависимость сопротивления от температуры

Опыт показывает, что для металлов в умеренном интервале температур сопротивление растёт линейно:

$$R = R_0(1 + \alpha t),$$

где α — температурный коэффициент сопротивления. Причина — усиление тепловых колебаний решётки, рассеивающих электроны. У полупроводников сопротивление с ростом температуры, напротив, быстро падает из-за роста концентрации свободных носителей. Вблизи абсолютного нуля у ряда металлов и сплавов наблюдается сверхпроводимость — резкое падение сопротивления до нуля.

ЭДС и закон Ома для полной цепи

Сторонние силы — силы неэлектростатической природы (химические, магнитные), совершающие работу по разделению зарядов внутри источника. Электродвижущая сила:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{стор}}}{q}.$$

Закон Ома для полной цепи:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r},$$

где r — внутреннее сопротивление источника, R — внешнее сопротивление цепи. Напряжение на внешнем участке $U = \mathcal{E} - Ir$; при разомкнутой цепи оно равно ЭДС. При коротком замыкании ($R \to 0$) ток максимален: $I_{\text{кз}} = \mathcal{E}/r$.

Соединения проводников

Соединение	Ток	Напряжение	Общий параметр
Последовательное	одинаков	делится	$R = R_1 + R_2 + \dots$
Параллельное	делится	одинаково	$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$

При последовательном соединении источники в батарею ЭДС складываются алгебраически; внутренние сопротивления — арифметически. При параллельном соединении одинаковых источников батарея даёт ту же ЭДС, но с меньшим внутренним сопротивлением и большей отдачей тока.

Закон Джоуля — Ленца. Работа и мощность тока

Количество теплоты, выделяемое током в проводнике:

$$Q = I^2 R t = \frac{U^2 t}{R} = IUt.$$

Мощность тока на участке цепи $P = UI$, во внешней цепи $P = I^2 R = \mathcal{E} I - I^2 r$. Максимальная полезная мощность достигается при согласовании нагрузки: $R = r$, при этом КПД источника равен 50%. Тепловое действие тока используется в лампах накаливания, нагревательных приборах, плавких предохранителях и электрической дуге; нежелательное тепловыделение учитывают при расчёте сечений проводов и охлаждения электроники.

7. Электрический ток в полупроводниках

Собственная проводимость

Полупроводники (кремний, германий) занимают промежуточное положение между металлами и диэлектриками по удельному сопротивлению (10^{-5}–10^{8} Ом·м). Их зонная структура характеризуется небольшой шириной запрещённой зоны: у кремния $E_g \approx 1{,}12$ эВ, у германия $E_g \approx 0{,}67$ эВ.

Собственная проводимость возникает за счёт одновременного рождения пар «электрон проводимости — дырка» при тепловом возбуждении или поглощении фотона. Концентрация носителей экспоненциально растёт с температурой, поэтому сопротивление полупроводника при нагревании резко уменьшается — свойство, используемое в термисторах и болометрах.
Примесная проводимость создаётся введением донорных (пятивалентные: фосфор, мышьяк — преобладают электроны, проводимость n-типа) или акцепторных (трёхвалентные: бор, индий — преобладают дырки, проводимость p-типа) примесей.

Полупроводниковые приборы

Основа электроники — p-n-переход: область контакта полупроводников с разными типами проводимости. В нём формируется запирающий слой, обладающий односторонней проводимостью. На этом эффекте построены:

- **диоды** — выпрямление переменного тока и защита цепей;
- **транзисторы** (биполярные и полевые) — усиление и коммутация сигналов, элементная база всех современных микросхем;
- **фоторезисторы и фотодиоды** — преобразование света в электрический сигнал (у фотодиодов — фотогальванический эффект);
- **светодиоды** — инжекционная люминесценция: излучение фотонов при рекомбинации носителей в переходе.

8. Магнитное поле

Вектор магнитной индукции

Магнитное поле создаётся движущимися зарядами (токами) и магнитными моментами частиц. Его количественная характеристика — вектор магнитной индукции $\vec{B}$, направление которого задаётся северным полюсом свободной магнитной стрелки, а модуль — через максимальный момент сил, действующих на рамку с током:

$$M = p_m B \sin\alpha,$$

где p_m — магнитный момент рамки. Единица измерения — тесла (Тл). Линии магнитной индукции замкнуты (в отличие от силовых линий электрического поля); это отражает отсутствие магнитных зарядов и подтверждено теоремой Гаусса для магнитного поля: $\oint \vec{B}\, d\vec{S} = 0$.

Закон Био — Савара — Лапласа определяет индукцию поля элемента тока; для длинного прямого проводника:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}, \qquad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ \text{Гн/м}.$$

Действие поля на проводник с током. Закон Ампера

На проводник с током в магнитном поле действует сила Ампера:

$$\vec{F} = I\,\vec{l} \times \vec{B}, \qquad F = BIl\sin\alpha,$$

где l — длина проводника, α — угол между проводником и вектором $\vec{B}$. Направление силы определяется правилом левой руки: линии индукции входят в ладонь, четыре вытянутых пальца — по току, отогнутый большой палец — по силе.

Взаимодействие параллельных токов: проводники с сонаправленными токами притягиваются, с противоположно направленными — отталкиваются. На этом эффекте основано определение ампера в СИ.

Магнитный поток и работа сил поля

Магнитный поток через поверхность площадью S:

$$\Phi = BS\cos\alpha.$$

Единица измерения — вебер (Вб). Работа сил магнитного поля при перемещении проводника с током:

$$A = I\,\Delta\Phi.$$

Сила Лоренца

На движущийся заряд в магнитном поле действует сила Лоренца:

$$\vec{F} = q\,\vec{v} \times \vec{B}, \qquad F = |q| v B \sin\alpha.$$

Сила Лоренца перпендикулярна скорости, поэтому работы не совершает — она лишь изменяет направление движения частицы. В однородном поле перпендикулярно линиям индукции частица движется по окружности радиуса

$$R = \frac{mv}{|q|B},$$

с циклотронной частотой $\omega = |q|B/m$, не зависящей от скорости.

Определение удельного заряда

Отношение заряда частицы к её массе $\lambda = q/m$ называют удельным зарядом. Измеряя радиус окружности при известной скорости частицы, её находят по формуле $\lambda = v/(RB)$. Метод лежит в основе масс-спектрометрии. Экспериментальное доказательство существования положительно заряженных частиц с массой электрона — позитронов — принадлежит К. Андерсону (1932 г.); его открытие подтвердило симметрию частиц и античастиц, предсказанную теоретически Дираком.

Ускорители заряженных частиц

Ускорители сообщают заряженным частицам высокие энергии с помощью электрических полей, а магнитные поля используются для удержания частиц на заданной траектории. Основные типы:

- **линейные ускорители** — частицы разгоняются по прямой последовательностью ускоряющих электродов;
- **циклотрон и синхротрон** — спиральное или кольцевое движение в магнитном поле с периодическим ускорением; синхротронная технология позволяет удерживать пучок на кольце фиксированного радиуса;
- **коллайдеры** (например, Большой адронный коллайдер в ЦЕРН — энергия пучков до 6,5 ТэВ на пучок) — встречные пучки, при столкновении которых энергия реакции максимальна.

Ускорители — главный инструмент экспериментальной физики высоких энергий, а также основа прикладных технологий: от радиационной терапии до генерации синхротронного излучения для структурной биологии и материаловедения.

9. Электромагнитная индукция

Основной закон

Закон электромагнитной индукции Фарадея (1831 г.): при изменении магнитного потока через замкнутый контур в нём возникает ЭДС индукции

$$\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}, \qquad \mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \text{ (для конечных изменений)}.$$

Знак минус отражает правило Ленца: индукционный ток направлен так, чтобы своим магнитным полем противодействовать изменению потока. Явление лежит в основе электрогенераторов, трансформаторов, металлоискателей и индукционных плит. В контуре из N витков ЭДС возрастает в N раз: $\mathcal{E} = -N\,d\Phi/dt$.

Вихревое электрическое поле

Изменяющееся магнитное поле порождает вихревое электрическое поле, силовые линии которого замкнуты и не связаны с зарядами. Это поле — не электростатическое: оно приводит в движение заряды и в отсутствие проводников. Математически:

$$\oint \vec{E}\,d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}.$$

Токи Фуко — вихревые токи в массивных проводниках — используются в индукционном нагреве и электромагнитном торможении, но в сердечниках трансформаторов их подавляют наборами из изолированных пластин.

Самоиндукция

При изменении тока в цепи меняется и создаваемый им магнитный поток, что порождает ЭДС самоиндукции:

$$\mathcal{E}_s = -L\frac{dI}{dt}.$$

Коэффициент самоиндукции (индуктивность) L зависит от геометрии цепи и магнитных свойств среды; для соленоида $L = \mu_0\mu n^2 V$. Индуктивность измеряется в генри. Правило Ленца применительно к самоиндукции: ток обладает «инерцией» — цепь препятствует мгновенному изменению тока, что проявляется в искрах при размыкании цепей с большой индуктивностью.

Энергия магнитного поля

Энергия, запасаемая в контуре с током:

$$W = \frac{LI^2}{2}.$$

Энергия локализована в магнитном поле; объёмная плотность энергии:

$$w = \frac{B^2}{2\mu_0\mu}.$$

Совокупная плотность энергии электромагнитного поля:

$$w = \frac{\varepsilon_0\varepsilon E^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu_0\mu}.$$

10. Обобщение: система уравнений Максвелла

Все рассмотренные явления охватываются системой уравнений Максвелла в интегральной форме:

$$\oint \vec{E}\, d\vec{S} = \frac{q}{\varepsilon_0\varepsilon}; \qquad \oint \vec{B}\, d\vec{S} = 0;$$

$$\oint \vec{E}\, d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}; \qquad \oint \vec{H}\, d\vec{l} = I + \frac{d\Phi_D}{dt}.$$

Первое уравнение — теорема Гаусса; второе выражает отсутствие магнитных зарядов; третье — закон электромагнитной индукции; четвёртое — теорема о циркуляции с учётом тока смещения. Из системы следует, что электромагнитное поле распространяется в вакууме со скоростью $c = 1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0} \approx 3 \cdot 10^8$ м/с — свет есть электромагнитная волна.

Заключение

Электродинамика прошла путь от опытов Кулона и Фарадея до единой теории Максвелла и релятивистской инвариантности, показавшей, что электрические и магнитные поля — проявления единого электромагнитного взаимодействия в разных системах отсчёта. Практическое значение этого раздела трудно переоценить: генерация и передача электроэнергии, вся электронная индустрия, связь, медицинская диагностика и ускорительная техника построены на законах, сформулированных в настоящей лекции.