

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики

Физический факультет

Теоретический минимум курса физики по разделу «Электромагнетизм»

- А.Кудлис
 - А.В.Смирнов
 - Н.Н.Хвастунов
 - В.И.Шоев
 - А.А.Зинчик
 - М.П.Коробков
-

ИТМО

28 ноября 2025 г.

Основные величины и единицы СИ

Константы и справочные величины

Элементарный заряд e (знак пишут явно: $+e$, $-e$)	Кл
Электрическая постоянная ε_0	Ф/м
Магнитная постоянная μ_0	Гн/м
Скорость света в вакууме c	м/с
Коэффициент в законе Кулона $k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$	Н·м ² /Кл ²

Заряд и ток

Электрический заряд q, Q	Кл
Линейная плотность заряда λ	Кл/м
Поверхностная плотность заряда σ	Кл/м ²
Объемная плотность заряда ρ	Кл/м ³
Сила тока I	А
Плотность тока \vec{j}	А/м ²
Поверхностная плотность тока \vec{K}	А/м
Постоянная Холла R_H	м ³ /Кл

Поля и потенциалы

Электрическое поле \vec{E}	В/м (Н/Кл)
Электрическая индукция \vec{D}	Кл/м ²
Потенциал электрического поля φ	В
Магнитная индукция \vec{B}	Тл
Напряженность магнитного поля \vec{H}	А/м
Векторный потенциал \vec{A}	Вб/м (Тл·м)
Магнитный поток Φ	Вб
Потокосцепление $\Psi = N\Phi$	Вб
Вектор Пойнтинга \vec{S}	Вт/м ²
Плотность энергии ЭМ-поля u (или w)	Дж/м ³

Материальные параметры

Диэлектрическая проницаемость ε	Ф/м
Относительная диэлектрическая проницаемость ε_r	1
Магнитная проницаемость μ	Гн/м
Относительная магнитная проницаемость μ_r	1
Поляризация \vec{P}	Кл/м ²
Намагниченность \vec{M}	А/м
Удельное сопротивление $\rho_{уд}$	Ом·м
Удельная проводимость (проводимость) σ	См/м
Подвижность носителей μ_{mob}	м ² /(В·с)

Элементы и цепи

Напряжение (разность потенциалов) U (или V)	В
Электродвижущая сила, ЭДС \mathcal{E}	В
Активное сопротивление R	Ом

Реактивное сопротивление X	Ом
Импеданс Z	Ом
Проводимость G	См
Емкость C	Ф
Индуктивность L	Гн
Взаимная индуктивность M	Гн
Постоянная времени цепи $\tau = RC$ или L/R	с

Магнитные величины

Магнитный момент \vec{p}_m	А·м ²
Магнитный поток через контур Φ	Вб

Колебания и волны в цепях

Частота ν	Гц
Циклическая (угловая) частота ω	рад/с
Фаза колебаний φ	рад
Сдвиг фаз $\Delta\varphi$	рад
Добротность контура Q	1

Движение заряженных частиц в полях

Циклотронная (ларморовская) частота $\omega_c = \frac{qB}{m}$	рад/с
Ларморовский радиус $r_L = \frac{mv_{\perp}}{ q B}$	м
Гиромагнитное отношение $\gamma = \frac{ q }{2m}$ или $\frac{ q }{m}$	рад/(с·Тл), Кл/кг

Список вопросов теоретического минимума

При наличии в ответе формул для физических величин должны быть даны развернутые пояснения для всех входящих в них обозначений и переменных.

1. Электростатика вакуума

NB! 1. *Дайте определение электрического заряда и сформулируйте его фундаментальные свойства.*

Ответ: Электрический заряд — это физическая скалярная величина, характеризующая способность тел быть источником электромагнитных полей и участвовать в электромагнитном взаимодействии. Его фундаментальные свойства: дискретность ($q = \pm Ze$, где e — элементарный заряд, Z — целое число), существование двух типов (положительный и отрицательный), инвариантность (не зависит от выбора системы отсчета), закон сохранения и аддитивность.

NB! 2. *Сформулируйте закон Кулона для точечных зарядов в вакууме и поясните все величины, входящие в его математическую запись.*

Ответ: Закон Кулона: $\vec{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{|\vec{r}_{12}|^3} \vec{r}_{12}$, где \vec{F}_{12} — сила, действующая на заряд q_2 со стороны q_1 ; q_1, q_2 — величины точечных зарядов; \vec{r}_{12} — радиус-вектор, направленный от q_1 к q_2 ; k — коэффициент пропорциональности равный в СИ $\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$; ϵ_0 — электрическая постоянная.

NB! 3. *Что называется напряженностью электростатического поля и как она определяется через силовое взаимодействие?*

Ответ: Напряженность электростатического поля $\vec{E}(\vec{r})$ — это силовая характеристика поля, определяемая как сила, действующая на неподвижный пробный точечный заряд q' , помещенный в данную точку поля, отнесенная к величине этого заряда: $\vec{E}(\vec{r}) = \frac{\vec{F}(\vec{r})}{q'}$. Пробный заряд должен быть достаточно мал, чтобы не исказить исследуемое поле.

NB! 4. *Запишите выражение для напряженности электростатического поля точечного заряда и поясните физический смысл всех величин, входящих в формулу.*

Ответ: Напряженность поля точечного заряда: $\vec{E} = k \frac{q}{r^2} \cdot \frac{\vec{r}}{r}$, где q — величина точечного заряда, создающего поле; \vec{r} — радиус-вектор, проведенный от заряда в точку наблюдения; r — модуль радиус-вектора; $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ — постоянная.

NB! 5. *Сформулируйте принцип суперпозиции для электростатических полей и запишите его математическое выражение для системы точечных зарядов.*

Ответ: Принцип суперпозиции: напряженность результирующего электростатического поля, создаваемого системой зарядов, равна векторной сумме напряженностей полей, создаваемых каждым зарядом в отдельности: $\vec{E}(\vec{r}) = \sum \vec{E}_i(\vec{r})$. Для системы точечных зарядов: $\vec{E} = k \sum \frac{q_i}{r_i^2} \cdot \frac{\vec{r}_i}{r_i}$, где \vec{r}_i — радиус-вектор от i -го заряда к точке наблюдения.

- NB!** 6. Дайте определение потока вектора напряженности электростатического поля через элементарную площадку и произвольную поверхность.

Ответ: Поток $d\Phi$ вектора \vec{E} через элементарную площадку $d\vec{S}$ определяется как скалярное произведение: $d\Phi = \vec{E} \cdot d\vec{S} = E_n dS$, где E_n — проекция \vec{E} на нормаль к площадке. Поток через произвольную поверхность S : $\Phi = \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S}$.

- NB!** 7. Сформулируйте теорему Гаусса для электростатического поля в вакууме в интегральной форме и поясните все величины, входящие в ее запись.

Ответ: Теорема Гаусса: поток вектора напряженности электростатического поля через любую замкнутую поверхность пропорционален алгебраической сумме зарядов, находящихся внутри этой поверхности: $\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q_{\text{внутр}}}{\varepsilon_0}$, где $q_{\text{внутр}} = \sum q_i$ — алгебраическая сумма зарядов внутри S , ε_0 — электрическая постоянная.

- NB!** 8. Запишите теорему Гаусса для электростатического поля в дифференциальной форме и поясните физический смысл этого уравнения.

Ответ: Теорема Гаусса в дифференциальной форме: $\text{div } \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$, где ρ — объемная плотность заряда в данной точке. Физический смысл: источники вектора \vec{E} (места, где силовые линии начинаются или заканчиваются) связаны с наличием в пространстве электрических зарядов. В декартовых координатах: $\text{div } \vec{E} = \frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z}$.

- NB!** 9. Сформулируйте теорему о циркуляции вектора напряженности электростатического поля и объясните, какое фундаментальное свойство поля из нее следует.

Ответ: Теорема о циркуляции: циркуляция вектора \vec{E} по любому замкнутому контуру в электростатическом поле равна нулю: $\oint \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = 0$. Из этого следует, что электростатическое поле является потенциальным (консервативным) — работа сил поля по перемещению заряда не зависит от формы пути, а зависит только от начального и конечного положения.

- NB!** 10. Дайте определение потенциала электростатического поля и поясните его физический смысл.

Ответ: Потенциал $\varphi(\vec{r})$ — это энергетическая характеристика поля, численно равная потенциальной энергии W , которой обладал бы единичный положительный точечный заряд, помещенный в данную точку поля: $\varphi(\vec{r}) = \frac{W(\vec{r})}{q}$. Физический смысл: работа по перемещению единичного точечного положительного заряда из бесконечности (или из места, где потенциал был положен равным нулю) в данную точку. Измеряется в вольтах (В).

- NB!** 11. Запишите выражение для потенциала поля точечного заряда и системы точечных зарядов.

Ответ: Потенциал поля точечного заряда: $\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{q}{r}$. Потенциал системы точечных зарядов: $\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \sum_i \frac{q_i}{r_i}$, где r_i — расстояние от заряда q_i до точки наблюдения. Принцип суперпозиции для потенциалов — алгебраический.

NB! 12. Как связана работа сил электростатического поля по перемещению заряда с разностью потенциалов?

Ответ: Работа $A_{1 \rightarrow 2}$ сил поля по перемещению точечного заряда q из точки 1 в точку 2 равна произведению заряда на разность потенциалов между этими точками: $A_{1 \rightarrow 2} = q(\varphi_1 - \varphi_2)$. Работа не зависит от формы траектории, что подтверждает потенциальный характер поля.

NB! 13. Как связаны между собой напряженность электростатического поля и его потенциал? Запишите соответствующую формулу.

Ответ: Напряженность поля равна взятой с обратным знаком градиенту потенциала: $\vec{E} = -\text{grad } \varphi = -\nabla \varphi$. В декартовой системе координат: $\vec{E} = -\left(\vec{i}\frac{\partial \varphi}{\partial x} + \vec{j}\frac{\partial \varphi}{\partial y} + \vec{k}\frac{\partial \varphi}{\partial z}\right)$. Эта связь показывает, что вектор \vec{E} направлен в сторону наибольшего убывания потенциала.

NB! 14. Что называется электрическим диполем? Дайте определение дипольного момента.

Ответ: Электрический диполь — система из двух равных по величине и противоположных по знаку точечных зарядов ($-q$ и $+q$), расстояние ℓ между которыми мало по сравнению с расстоянием до точек наблюдения. Вектор $\vec{p} = q\vec{\ell}$ называется электрическим дипольным моментом, где вектор $\vec{\ell}$ направлен от отрицательного заряда к положительному.

NB! 15. Запишите выражение для потенциала поля диполя на большом расстоянии от него и поясните смысл всех величин. Укажите каково его принципиальное отличие от потенциала точечного заряда.

Ответ: Потенциал поля диполя: $\varphi(r, \theta) = k \frac{p \cos \theta}{r^2} = k \frac{\vec{p} \cdot \vec{r}}{r^3}$, где p — модуль дипольного момента; r — расстояние от центра диполя до точки наблюдения; θ — угол между векторами \vec{p} и \vec{r} ; $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$. Потенциал убывает с расстоянием как $1/r^2$, в отличие от $1/r$ для точечного заряда.

NB! 16. Чему равна потенциальная энергия диполя во внешнем однородном электростатическом поле?

Ответ: Потенциальная энергия диполя во внешнем однородном поле:

$$W = -\vec{p} \cdot \vec{E} = -pE \cos \alpha,$$

где α — угол между векторами \vec{p} и \vec{E} . Энергия минимальна ($W_{\min} = -pE$) при $\vec{p} \uparrow \uparrow \vec{E}$ (устойчивое равновесие) и максимальна ($W_{\max} = pE$) при $\vec{p} \uparrow \downarrow \vec{E}$ (неустойчивое равновесие).

NB! 17. Чему равен момент сил, действующих на диполь в однородном электростатическом поле?

Ответ: Момент сил, действующих на диполь в однородном поле: $\vec{M} = [\vec{p} \times \vec{E}]$. Модуль момента $M = pE \sin \alpha$, где α — угол между \vec{p} и \vec{E} . Момент стремится развернуть диполь по направлению поля ($\vec{p} \uparrow \uparrow \vec{E}$).

2. Проводники в электрическом поле

NB! 18. *Запишите уравнение Пуассона для электростатического потенциала и поясните физический смысл всех величин, входящих в это уравнение.*

Ответ: Уравнение Пуассона для электростатического потенциала имеет вид:

$$\Delta\varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon_0},$$

где:

- Δ — оператор Лапласа ($\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ в декартовых координатах),
- φ — электростатический потенциал,
- ρ — объёмная плотность свободных зарядов в данной точке пространства,
- ε_0 — электрическая постоянная.

Физический смысл уравнения: оно связывает пространственное распределение потенциала электростатического поля с распределением зарядов, являющихся его источниками.

19. *Сформулируйте уравнение Лапласа и укажите, в каких областях пространства оно справедливо.*

Ответ: Уравнение Лапласа имеет вид $\Delta\varphi = 0$. Оно справедливо в областях пространства, где объёмная плотность заряда ρ равна нулю, то есть в отсутствие свободных электрических зарядов.

NB! 20. *Чему равна напряженность электростатического поля вблизи поверхности заряженного проводника и как она направлена?*

Ответ: Напряженность поля вблизи поверхности заряженного проводника равна $E_n = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$ и направлена перпендикулярно поверхности проводника, где $\sigma = \frac{dq}{dS}$ — поверхностная плотность заряда (количество заряда на единицу площади). Тангенциальная составляющая поля равна нулю.

NB! 21. *Почему электростатическое поле внутри проводника в состоянии равновесия равно нулю?*

Ответ: В проводнике есть свободные заряды. Под действием внешнего поля они перемещаются до тех пор, пока создаваемое ими индуцированное поле $\vec{E}_{\text{инд}}$ не компенсирует внешнее поле $\vec{E}_{\text{вн}}$ внутри проводника. В состоянии равновесия $\vec{E}_{\text{вн}} + \vec{E}_{\text{инд}} = 0$, поэтому результирующее поле внутри проводника равно нулю.

NB! 22. *В чём состоит идея метода изображений для расчёта электростатических полей?*

Ответ: Если есть некоторая проводящая поверхность (плоскость, сфера, цилиндр), то вместо решения уравнения Лапласа с граничными условиями можно, убрав проводник, разместить в пространстве фиктивные «заряды-изображения», подобрав их величину и положение так, чтобы поверхность проводника оставалась эквипотенциальной и решать задачу о нахождении суперпозиции полей реальных и фиктивных зарядов.

3. Электрическое поле в диэлектриках

23. Что такое диэлектрики?

Ответ: Диэлектрики (изоляторы) — это вещества, которые практически не проводят электрический ток, так как в них отсутствуют свободные заряды, способные перемещаться на макроскопические расстояния.

24. Каковы основные механизмы поляризации диэлектриков?

Ответ: Основные механизмы поляризации диэлектриков:

- **Электронная поляризация** — в неполярных молекулах под действием поля происходит смещение положительных и отрицательных зарядов, что приводит к появлению индуцированного дипольного момента.
- **Ориентационная поляризация** — в полярных молекулах, обладающих собственным дипольным моментом, внешнее поле вызывает преимущественную ориентацию диполей по полю.
- **Ионная поляризация** — в ионных кристаллах внешнее поле вызывает смещение подрешеток положительных и отрицательных ионов.

NB! 25. Дайте определение вектора поляризованности \vec{P} и поясните его физический смысл.

Ответ: Вектор поляризованности \vec{P} определяется как дипольный момент единицы объема диэлектрика: $\vec{P} = \frac{1}{\Delta V} \sum_i \vec{p}_i$, где ΔV — физически бесконечно малый объем, \vec{p}_i — дипольные моменты отдельных молекул.

Физический смысл: \vec{P} характеризует степень и направление упорядоченности дипольных моментов в данной точке диэлектрика. Единица измерения в СИ: Кл/м².

26. Запишите линейную связь между вектором поляризованности \vec{P} и напряженностью электрического поля \vec{E} для изотропного диэлектрика и поясните все величины.

Ответ: Для изотропного диэлектрика в не слишком сильных полях выполняется линейная связь: $\vec{P} = \chi \epsilon_0 \vec{E}$, где:

- χ — диэлектрическая восприимчивость (безразмерная величина, $\chi > 0$)
- ϵ_0 — электрическая постоянная
- \vec{E} — напряженность электрического поля

27. Чему равна поверхностная плотность поляризационных зарядов на границе диэлектрика и как она связана с вектором поляризованности?

Ответ: Поверхностная плотность поляризационных зарядов на границе диэлектрика равна проекции вектора поляризованности на нормаль к поверхности: $\sigma_{\text{pol}} = P_n = (\vec{P}, \vec{n})$, где \vec{n} — единичный вектор нормали к поверхности, направленный наружу.

28. Сформулируйте теорему Гаусса для вектора поляризованности \vec{P} в интегральной и дифференциальной формах.

Ответ: Теорема Гаусса для \vec{P} :

3. Электрическое поле в диэлектриках

- **Интегральная форма:** $\oint_S \vec{P} d\vec{S} = -q'$, где q' — суммарный связанный заряд внутри поверхности S
- **Дифференциальная форма:** $\operatorname{div} \vec{P} = -\rho'$, где ρ' — объемная плотность связанных зарядов

NB! 29. *Что такое вектор электрического смещения \vec{D} и как он определяется через напряженность поля и поляризованность?*

Ответ: Вектор электрического смещения (электрической индукции) определяется как: $\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$. Это вспомогательный вектор, который объединяет влияние свободных и связанных зарядов. Единица измерения в СИ: Кл/м².

NB! 30. *Сформулируйте теорему Гаусса для вектора \vec{D} и поясните ее преимущество при расчете полей в диэлектриках.*

Ответ: Теорема Гаусса для \vec{D} :

- **Интегральная форма:** $\oint_S \vec{D} d\vec{S} = q_{\text{внутр}}$, где $q_{\text{внутр}}$ — суммарный сторонний заряд внутри поверхности S
- **Дифференциальная форма:** $\operatorname{div} \vec{D} = \rho$, где ρ — объемная плотность свободных зарядов

Преимущество: поток \vec{D} определяется только сторонними зарядами, что упрощает расчет полей в диэлектриках.

NB! 31. *Как связаны между собой векторы \vec{D} и \vec{E} в однородном изотропном диэлектрике?*

Ответ: В однородном изотропном диэлектрике векторы \vec{D} и \vec{E} связаны соотношением: $\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}$, где ε — диэлектрическая проницаемость среды ($\varepsilon = 1 + \alpha$, $\varepsilon > 1$).

NB! 32. *Каковы граничные условия для тангенциальной составляющей вектора \vec{E} на поверхности раздела двух диэлектриков?*

Ответ: Тангенциальная составляющая вектора \vec{E} непрерывна на границе раздела двух диэлектриков: $E_{1\tau} = E_{2\tau}$.

NB! 33. *Каковы граничные условия для нормальной составляющей вектора \vec{D} на поверхности раздела двух диэлектриков при отсутствии свободных зарядов?*

Ответ: При отсутствии свободных зарядов на границе раздела ($\sigma = 0$) нормальная составляющая вектора \vec{D} непрерывна: $D_{1n} = D_{2n}$.

NB! 34. *Как связаны тангенциальные составляющие вектора \vec{D} на границе раздела двух диэлектриков?*

Ответ: Тангенциальные составляющие вектора \vec{D} на границе раздела связаны соотношением: $\frac{D_{1\tau}}{D_{2\tau}} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$, то есть они испытывают скачок, пропорциональный отношению диэлектрических проницаемостей.

NB! 35. Как связаны нормальные составляющие вектора \vec{E} на границе раздела двух диэлектриков?

Ответ: Нормальные составляющие вектора \vec{E} на границе раздела связаны соотношением: $\frac{E_{1n}}{E_{2n}} = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$, то есть они испытывают скачок, обратно пропорциональный отношению диэлектрических проницаемостей, что напрямую связано с непрерывностью нормальной составляющей вектора электрического смещения.

4. Ёлектроёмкость. Ёнергия и силы в электрическом поле

NB! 36. Дайте определение электроёмкости уединённого проводника и укажите единицы её измерения в СИ.

Ответ: Ёлектроёмкость уединённого проводника определяется как отношение заряда проводника к его потенциалу: $C = \frac{q}{\varphi}$, где:

- C — электроёмкость
- q — заряд проводника
- φ — потенциал проводника

Ёдиница измерения в СИ — фарад (Ф), где $1 \text{ Ф} = 1 \text{ Кл/В}$.

37. Что называется конденсатором и как определяется его электроёмкость?

Ответ: Конденсатор — система из двух проводников (обкладок), расположенных близко друг к другу. Ёго электроёмкость определяется как отношение заряда на обкладке к разности потенциалов между обкладками: $C = \frac{q}{\varphi_1 - \varphi_2}$, где:

- q — заряд на положительной обкладке
- $\varphi_1 - \varphi_2$ — разность потенциалов между обкладками

38. Чему равна электроёмкость батареи конденсаторов при их параллельном соединении?

Ответ: При параллельном соединении конденсаторов электроёмкость батареи равна сумме ёмкостей отдельных конденсаторов: $C_{\text{пара}} = \sum C_i$, где C_i — ёмкость i -го конденсатора.

39. Как вычисляется электроёмкость батареи конденсаторов при их последовательном соединении?

Ответ: При последовательном соединении конденсаторов величина, обратная ёмкости батареи, равна сумме величин, обратных ёмкостям отдельных конденсаторов: $\frac{1}{C_{\text{посл}}} = \sum \frac{1}{C_i}$, где C_i — ёмкость i -го конденсатора.

NB! 40. Запишите формулу для электроёмкости плоского конденсатора, дав пояснения всем входящим в нее величинам

Ответ: Ёмкость плоского конденсатора: $C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}$, где:

- ε_0 — электрическая постоянная
- ε — диэлектрическая проницаемость среды между обкладками
- S — площадь одной обкладки
- d — расстояние между обкладками

41. Чему равна энергия взаимодействия двух точечных зарядов в вакууме?

Ответ: Ёнергия взаимодействия двух точечных зарядов: в вакууме $W = \frac{q_1 q_2}{4\pi \varepsilon_0 r_{12}}$, где:

4. Емкость. Энергия и силы в электрическом поле

- q_1, q_2 — величины точечных зарядов
- r_{12} — расстояние между зарядами
- ε_0 — электрическая постоянная

NB! 42. *Запишите выражение для энергии системы из n точечных зарядов.*

Ответ: Энергия системы точечных зарядов:

$$W = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n q_k \varphi_k = \frac{1}{2} \sum_{i=1, k \neq i}^n \frac{q_k q_i}{4\pi \varepsilon_0 r_{ki}},$$

где:

- q_k — заряд k -го точечного заряда
- φ_k — потенциал в точке расположения k -го заряда, создаваемый всеми остальными зарядами системы
- q_k, q_i — величины точечных зарядов
- r_{ki} — расстояние между k -м и i -м зарядами
- ε_0 — электрическая постоянная

NB! 43. *Что называется плотностью энергии электрического поля и как она выражается через напряжённость поля и величину электрического смещения?*

Ответ: Плотность энергии электрического поля — это энергия, заключённая в единице

объёма поля: $w = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon E^2}{2} = \frac{\vec{E} \cdot \vec{D}}{2}$, где:

- \vec{E} — вектор напряжённости электрического поля
- \vec{D} — вектор электрического смещения
- ε_0 — электрическая постоянная
- ε — диэлектрическая проницаемость среды

44. *Что такое собственная энергия зарядов и как она вычисляется?*

Ответ: Собственная энергия заряда — это энергия поля, создаваемого этим зарядом:

$W_{\text{соб}} = \int \frac{\varepsilon_0 E^2}{2} dV$, где E — напряжённость поля, создаваемого данным зарядом, dV — элементарный объём. Собственная энергия всегда положительна.

45. *Что такое взаимная энергия системы зарядов и как она связана с энергией взаимодействия?*

Ответ: Взаимная энергия системы зарядов — это энергия взаимодействия между зарядами: $W_{\text{вз}} = \int \varepsilon_0 \vec{E}_1 \cdot \vec{E}_2 dV$, где \vec{E}_1 и \vec{E}_2 — поля, создаваемые разными зарядами. Она может быть как положительной, так и отрицательной.

NB! 46. *Чему равна энергия заряженного конденсатора?*

Ответ: Энергия заряженного конденсатора: $W = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2}$, где:

- q — заряд конденсатора
- C — ёмкость конденсатора
- U — напряжение между обкладками

5. Постоянный электрический ток

NB! 47. *Дайте определение силы электрического тока и укажите единицу её измерения в СИ.*

Ответ: Сила электрического тока I определяется как величина заряда, переносимого через рассматриваемую поверхность в единицу времени: $I = \frac{dq}{dt}$, где:

- dq — заряд, переносимый через поверхность за время dt

Единица измерения в СИ — ампер (А), где $1 \text{ А} = 1 \text{ Кл/с}$.

NB! 48. *Что называется плотностью электрического тока и как она связана с силой тока?*

Ответ: Плотность электрического тока \vec{j} — это векторная величина, численно равная силе тока через единичную площадку, перпендикулярную направлению движения носителей: $\vec{j} = \frac{dI}{dS_{\perp}} \hat{n}$, где \hat{n} — вектор единичной нормали к площадке dS_{\perp} .

Связь с силой тока: $I = \iint_S \vec{j} \cdot d\vec{S}$, где интегрирование ведётся по всей поверхности S .

49. *Запишите уравнение непрерывности для электрического тока в интегральной форме и поясните его физический смысл.*

Ответ: Уравнение непрерывности в интегральной форме: $\iint_S \vec{j} \cdot d\vec{S} = -\frac{dq}{dt}$, где:

- \vec{j} — вектор плотности тока
- q — заряд внутри объёма, ограниченного поверхностью S

Физический смысл: убыль заряда в объёме за единицу времени равна потоку вектора плотности тока через поверхность, ограничивающую этот объём.

NB! 50. *Запишите уравнение непрерывности для электрического тока в дифференциальной форме и поясните его физический смысл.*

Ответ: Уравнение непрерывности в дифференциальной форме имеет вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{j} = 0,$$

где

- \vec{j} — вектор плотности тока
- ρ — объемная плотность свободных зарядов

Физический смысл: уравнение непрерывности является локальной формулировкой закона сохранения электрического заряда.

NB! 51. *Сформулируйте закон Ома для однородного участка цепи и укажите единицы измерения всех величин.*

Ответ: Закон Ома для однородного участка цепи: $I = \frac{U}{R}$, где:

5. Постоянный электрический ток

- I — сила тока (А)
- $U = \varphi_1 - \varphi_2$ — напряжение на участке (В)
- R — электрическое сопротивление (Ом)

52. *Запишите формулу для сопротивления однородного цилиндрического проводника и поясните все входящие в неё величины.*

Ответ: Сопротивление однородного цилиндрического проводника: $R = \rho \frac{\ell}{S}$, где:

- ρ — удельное сопротивление материала (Ом·м)
- ℓ — длина проводника (м)
- S — площадь поперечного сечения (м²)

NB! 53. *Как записывается закон Ома в локальной (дифференциальной) форме для однородной линейной изотропной среды?*

Ответ: Закон Ома в локальной форме: $\vec{j} = \sigma \vec{E}$, где:

- \vec{j} — вектор плотности тока
- $\sigma = \frac{1}{\rho}$ — удельная электропроводность среды (См/м)
- \vec{E} — вектор напряжённости электрического поля

NB! 54. *Что такое сторонние силы и какова их роль в поддержании постоянного тока?*

Ответ: Сторонние силы — это силы не электростатического происхождения, которые обеспечивают движение зарядов против сил электрического поля. Они необходимы для поддержания постоянного тока, так как только кулоновские силы привели бы к выравниванию потенциалов и прекращению тока.

NB! 55. *Каков физический смысл электродвижущей силы (ЭДС)?*

Ответ: Электродвижущая сила (ЭДС) — это работа сторонних сил по перемещению единичного положительного заряда: $\mathcal{E} = \int \vec{E}' \cdot d\vec{\ell}$, где \vec{E}' — напряжённость поля сторонних сил. ЭДС характеризует способность источника тока создавать и поддерживать разность потенциалов.

56. *Запишите обобщённый закон Ома для неоднородного (содержащего источники ЭДС) участка цепи в интегральной форме.*

Ответ: Обобщённый закон Ома для неоднородного участка цепи:

$$I \cdot R = (\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}_{1-2},$$

где:

- I — сила тока
- R — суммарное электрическое сопротивление участка
- $\varphi_1 - \varphi_2$ — разность потенциалов (падение напряжения) на рассматриваемом участке
- \mathcal{E}_{1-2} — алгебраическая сумма ЭДС всех источников на участке

ЭДС считается положительной, если она повышает потенциал в направлении обхода, т.е. внутри источника направление от «-» к «+» совпадает с направлением тока. В обратном случае ЭДС считается отрицательной.

NB! 57. *Сформулируйте закон Джоуля-Ленца для однородного участка цепи и укажите единицы измерения всех величин.*

Ответ: Закон Джоуля-Ленца: $\frac{dW}{dt} = I^2 R$, где:

- $\frac{dW}{dt}$ — тепловая мощность (Вт)
- I — сила тока (А)
- R — сопротивление (Ом)

NB! 58. *Как записывается закон Джоуля-Ленца в локальной (дифференциальной) форме?*

Ответ: Закон Джоуля-Ленца в локальной форме: $\frac{dw}{dt} = j^2 \rho$, где:

- $\frac{dw}{dt}$ — удельная тепловая мощность (Вт/м³)
- j — плотность тока (А/м²)
- ρ — удельное сопротивление (Ом·м)

59. *Сформулируйте первое правило Кирхгофа и поясните его физический смысл.*

Ответ: Первое правило Кирхгофа: алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле, равна нулю: $\sum I_i = 0$. Физический смысл: правило выражает закон сохранения заряда — в узле не может происходить накопление заряда, поэтому сумма втекающих токов равна сумме вытекающих.

60. *Сформулируйте второе правило Кирхгофа и поясните его физический смысл.*

Ответ: Второе правило Кирхгофа: в произвольном замкнутом контуре алгебраическая сумма ЭДС равна алгебраической сумме падений напряжений: $\sum \mathcal{E}_i = \sum I_k R_k$. При применении второго правила Кирхгофа:

- Токи, направление которых совпадает с выбранным направлением обхода контура, берутся со знаком «+», противоположные — со знаком «-»
- ЭДС, которые при обходе контура проходятся от «-» к «+», берутся со знаком «+», в противоположном случае — со знаком «-»

Физический смысл: правило выражает закон сохранения энергии — работа сторонних сил равна сумме работ электрического поля на всех участках контура.

6. Магнитостатика вакуума

61. *Что такое принцип суперпозиции для магнитного поля? Как он записывается математически? При каких условиях выполняется принцип суперпозиции?*

Ответ: Принцип суперпозиции для магнитного поля утверждает, что магнитное поле, создаваемое несколькими движущимися зарядами или токами, равно векторной сумме магнитных полей, создаваемых каждым зарядом или током в отдельности:

$$\vec{B}(\vec{r}) = \sum_i \vec{B}_i(\vec{r})$$

- $\vec{B}(\vec{r})$ — результирующий вектор магнитной индукции в точке \vec{r} ,
- $\vec{B}_i(\vec{r})$ — вектор магнитной индукции в точке \vec{r} , создаваемый i -м источником (током или зарядом).

Этот принцип позволяет рассчитывать поле сложных систем источников в вакууме или линейных средах, в которых величина магнитной индукции прямо пропорциональна силе тока. В нелинейных средах (нпр. ферромагнетиках) принцип суперпозиции не выполняется.

NB! 62. *Дайте определение силы Лоренца и запишите её полную формулу. Поясните физический смысл всех входящих в неё величин.*

Ответ: Сила Лоренца — это полная электромагнитная сила, действующая на точечную заряженную частицу. Её формула имеет вид: $\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v}, \vec{B}]$

- \vec{F} — сила Лоренца,
- q — величина электрического заряда частицы,
- \vec{E} — вектор напряжённости электрического поля,
- \vec{v} — вектор скорости заряженной частицы,
- \vec{B} — вектор магнитной индукции.

NB! 63. *Сформулируйте закон Био-Савара-Лапласа для элемента тока $Id\vec{\ell}$ и поясните смысл всех физических величин, входящих в формулу.*

Ответ: Закон Био-Савара-Лапласа определяет магнитную индукцию $d\vec{B}$, создаваемую элементом тока $Id\vec{\ell}$: $d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I[d\vec{\ell}, \vec{r}]}{r^3}$

- $d\vec{B}$ — вектор элементарной магнитной индукции,
- μ_0 — магнитная постоянная ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м),
- I — сила тока в проводнике,
- $d\vec{\ell}$ — вектор элемента длины проводника, направленный по току,
- \vec{r} — радиус-вектор, проведённый от элемента тока к точке наблюдения,
- r — модуль радиус-вектора \vec{r} .

64. Чему равен и как направлен вектор магнитной индукции поля бесконечно длинного прямого проводника с током в вакууме на расстоянии R от него? Запишите формулу и поясните величины.

Ответ: Модуль вектора магнитной индукции поля бесконечно длинного проводника с током I на расстоянии R от него определяется формулой: $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}$

- B — величина магнитной индукции,
- μ_0 — магнитная постоянная,
- I — сила тока в проводнике,
- R — расстояние от точки наблюдения до оси проводника.

Вектор магнитной индукции \vec{B} направлен по касательной к окружности в плоскости, перпендикулярной проводнику, с центром на оси провода. Если мысленно ввинчивать правый винт вдоль направления тока, то направление вращения винта укажет направление вектора \vec{B} .

- NB!** 65. Сформулируйте теорему Гаусса для магнитного поля в интегральной форме и запишите соответствующее математическое выражение.

Ответ: Теорема Гаусса для магнитного поля утверждает, что поток вектора магнитной индукции \vec{B} через любую замкнутую поверхность S равен нулю: $\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$

- \vec{B} — вектор магнитной индукции,
- $d\vec{S}$ — вектор элемента площади замкнутой поверхности, направленный по внешней нормали.

Это следствие того, что линии магнитной индукции замкнуты и не имеют ни начала, ни конца.

- NB!** 66. Запишите теорему Гаусса для магнитного поля в дифференциальной форме и поясните физический смысл этого уравнения.

Ответ: Теорема Гаусса для магнитного поля в дифференциальной форме имеет вид: $\operatorname{div} \vec{B} = 0$

- $\operatorname{div} \vec{B}$ — дивергенция вектора магнитной индукции, которая в декартовых координатах записывается как $\frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z}$.

Это уравнение означает, что в природе отсутствуют магнитные заряды (источники или стоки силовых линий), и линии магнитной индукции всегда замкнуты.

- NB!** 67. Сформулируйте теорему о циркуляции для магнитной индукции в вакууме и запишите её математическое выражение для контура, охватывающего несколько токов.

Ответ: Теорема о циркуляции для магнитной индукции гласит: циркуляция вектора \vec{B} по произвольному замкнутому контуру Γ равна алгебраической сумме сил токов, охватываемых этим контуром, умноженной на магнитную постоянную μ_0 :

$$\oint_{\Gamma} \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 \sum_k I_k$$

6. Магнитостатика вакуума

- \vec{B} — вектор магнитной индукции,
- $d\vec{\ell}$ — элемент длины контура,
- μ_0 — магнитная постоянная,
- $\sum_k I_k$ — алгебраическая сумма токов, охватываемых контуром. Токи считаются положительными, если их направление образует с направлением обхода контура правовинтовую систему.

7. Силы Ампера и Лоренца. Движение заряженных частиц в магнитном поле

NB! 68. *Запишите её формулу для элементарной работы по перемещению проводника с током в магнитном поле. Поясните смысл всех используемых обозначений.*

Ответ: Элементарная работа по перемещению проводника с током в магнитном поле равна произведению силы тока на изменение магнитного потока, заметаемого проводником: $dA = Id\Phi$

- dA — элементарная работа,
- I — сила тока в проводнике,
- $d\Phi$ — изменение магнитного потока через контур (или для одиночного движущегося проводника — через площадку, заметаемую им при движении).

69. *Запишите выражение для момента сил Ампера, действующего на плоский контур с током в однородном магнитном поле. Поясните смысл всех величин.*

Ответ: Момент сил Ампера, действующий на плоский контур с током в однородном магнитном поле, равен: $\vec{M} = [\vec{p}_m, \vec{B}]$

- \vec{M} — вектор момента сил,
- \vec{p}_m — вектор магнитного момента контура ($\vec{p}_m = I\vec{S}$),
- \vec{B} — вектор магнитной индукции,
- I — сила тока в контуре,
- \vec{S} — вектор площади контура, направленный по правилу правого винта относительно направления тока.

NB! 70. *Дайте определение магнитного момента контура с током. Запишите его формулу для плоского контура и поясните все обозначения.*

Ответ: Магнитный момент контура с током — это векторная физическая величина, характеризующая магнитные свойства контура. Для плоского контура: $\vec{p}_m = I\vec{S}$

- \vec{p}_m — вектор магнитного момента,
- I — сила тока в контуре,
- \vec{S} — вектор площади контура, направленный по правилу правого винта относительно направления тока.

Для не плоского контура магнитный момент вычисляется как $\vec{p}_m = I \int d\vec{S}$.

71. *Чему равна потенциальная энергия магнитного диполя в однородном магнитном поле? Запишите формулу и поясните все обозначения.*

Ответ: Потенциальная энергия магнитного диполя в однородном магнитном поле равна: $W = -(\vec{p}_m \cdot \vec{B})$

- W — потенциальная энергия магнитного диполя,

7. Силы Ампера и Лоренца. Движение заряженных частиц в магнитном поле

- \vec{p}_m — вектор магнитного момента диполя,
- \vec{B} — вектор магнитной индукции.

Знак «минус» показывает, что энергия минимальна, когда магнитный момент параллелен вектору магнитной индукции.

NB! 72. *Запишите формулу для ларморовского радиуса движения заряженной частицы в однородном магнитном поле и поясните все обозначения.*

Ответ: Ларморовский радиус движения заряженной частицы в однородном магнитном поле вычисляется по формуле: $R_L = \frac{mv}{qB}$

- R_L — ларморовский радиус (радиус окружности),
- m — масса частицы,
- v — скорость частицы (перпендикулярная \vec{B}),
- q — заряд частицы,
- B — модуль вектора магнитной индукции.

NB! 73. *Чему равен период обращения заряженной частицы в однородном магнитном поле? Запишите формулу и поясните все обозначения.*

Ответ: Период обращения заряженной частицы в однородном магнитном поле равен: $T = \frac{2\pi m}{qB}$

- T — период обращения,
- m — масса частицы,
- q — заряд частицы,
- B — модуль вектора магнитной индукции.

Период не зависит от скорости частицы (при $v \ll c$).

NB! 74. *Дайте определение циклотронной частоты. Запишите её формулу и поясните физический смысл.*

Ответ: Циклотронная частота — это частота обращения заряженной частицы в однородном магнитном поле: $\omega_c = \frac{qB}{m}$

- ω_c — циклотронная частота,
- q — заряд частицы,
- B — модуль вектора магнитной индукции,
- m — масса частицы.

Циклотронная частота не зависит от скорости частицы (при $v \ll c$) и определяется только её удельным зарядом и величиной магнитного поля.

8. Магнитное поле в веществе

NB! 75. *Дайте определение магнетика и перечислите три основных типа магнетиков по характеру их взаимодействия с магнитным полем.*

Ответ: Магнетики — это вещества, которые тем или иным образом взаимодействуют с магнитным полем, ослабляя или усиливая его. Существует три основных типа магнетиков:

- Парамагнетики — слабо втягиваются в область более сильного поля (алюминий, платина, жидкий кислород).
- Диамагнетики — слабо выталкиваются из области сильного поля (медь, висмут, вода).
- Ферромагнетики — сильно втягиваются в область сильного поля, эффект в тысячи раз сильнее, чем у парамагнетиков (железо, кобальт, никель).

76. *В чём состоит гипотеза молекулярных токов Ампера? Из каких составляющих складывается полный магнитный момент атома?*

Ответ: Согласно гипотезе Ампера, магнитные свойства вещества обусловлены микроскопическими круговыми токами (молекулярными токами), циркулирующими внутри атомов или молекул. Полный магнитный момент атома складывается из:

- Орбитальных магнитных моментов электронов, обусловленных их движением вокруг ядра.
- Собственных (спиновых) магнитных моментов электронов.
- Магнитного момента ядра, которым обычно пренебрегают из-за его малости.

77. *Дайте определение намагниченности вещества.*

Ответ: Намагниченность \vec{M} — это векторная величина, равная магнитному моменту единицы объема вещества: $\vec{M} = \frac{\sum \vec{p}_m}{\Delta V} = n \langle \vec{p}_m \rangle$

- \vec{M} — вектор намагниченности,
- $\sum \vec{p}_m$ — сумма магнитных моментов молекул в объёме ΔV ,
- ΔV — физически бесконечно малый объём,
- n — концентрация молекул,
- $\langle \vec{p}_m \rangle$ — среднее значение магнитного момента одной молекулы.

78. *Что такое токи намагничивания? Как они возникают в однородном и неоднородном магнетиках?*

Ответ: Токи намагничивания I' — это макроскопические токи, эквивалентные по своему действию сумме упорядоченных молекулярных токов в намагниченном веществе.

- В однородном магнетике молекулярные токи компенсируются в объёме, и остаётся только поверхностный ток намагничивания.
- В неоднородном магнетике компенсации молекулярных токов в объёме не происходит, и возникает объёмный ток намагничивания.

NB! 79. Сформулируйте теорему о циркуляции для вектора намагниченности. Запишите её математическое выражение.

Ответ: Циркуляция вектора намагниченности \vec{M} по произвольному замкнутому контуру Γ равна алгебраической сумме молекулярных токов I' , пронизывающих поверхность, ограниченную этим контуром: $\oint_{\Gamma} \vec{M} \cdot d\vec{\ell} = I'$

- \vec{M} - вектор намагниченности
- $d\vec{\ell}$ — элемент длины контура
- I' — суммарный молекулярный ток, охватываемый контуром.

NB! 80. Дайте определение напряжённости магнитного поля \vec{H} . Запишите формулу, связывающую её с магнитной индукцией \vec{B} и намагниченностью \vec{M} .

Ответ: Напряжённость магнитного поля \vec{H} — это вспомогательный вектор, определяемый соотношением: $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M}$

- \vec{H} — вектор напряжённости магнитного поля,
- \vec{B} — вектор магнитной индукции,
- μ_0 — магнитная постоянная,
- \vec{M} — вектор намагниченности.

Единица измерения \vec{H} — ампер на метр (А/м).

NB! 81. Сформулируйте теорему о циркуляции для вектора \vec{H} и запишите её в интегральной и дифференциальной формах.

Ответ: Теорема о циркуляции для вектора \vec{H} гласит: циркуляция \vec{H} по произвольному замкнутому контуру равна алгебраической сумме токов проводимости, охватываемых этим контуром.

- Интегральная форма: $\oint_{\Gamma} \vec{H} d\vec{\ell} = \sum I$
- Дифференциальная форма: $[\nabla, \vec{H}] = \vec{j}$, где \vec{j} — плотность тока проводимости.

NB! 82. Что такое магнитная восприимчивость χ и магнитная проницаемость μ ? Как они связаны между собой и с векторами \vec{M} , \vec{H} и \vec{B} ?

Ответ:

- Магнитная восприимчивость χ — коэффициент пропорциональности между намагниченностью и напряжённостью поля: $\vec{M} = \chi \vec{H}$
- Магнитная проницаемость μ характеризует способность вещества приобретать намагниченность: $\mu = 1 + \chi$
- Связь между \vec{B} и \vec{H} : $\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}$

83. Каковы граничные условия для нормальных составляющих векторов \vec{B} и \vec{H} на границе раздела двух магнетиков?

Ответ: На границе раздела двух магнетиков с проницаемостями μ_1 и μ_2 при отсутствии токов проводимости:

- Нормальная составляющая \vec{B} непрерывна: $B_{1n} = B_{2n}$
- Нормальная составляющая \vec{H} терпит скачок: $\mu_1 H_{1n} = \mu_2 H_{2n}$

84. *Каковы граничные условия для тангенциальных составляющих векторов \vec{B} и \vec{H} на границе раздела двух магнетиков?*

Ответ: На границе раздела двух магнетиков с проницаемостями μ_1 и μ_2 при отсутствии токов проводимости:

- Тангенциальная составляющая \vec{H} непрерывна: $H_{1\tau} = H_{2\tau}$
- Тангенциальная составляющая \vec{B} терпит скачок: $\frac{B_{1\tau}}{\mu_1} = \frac{B_{2\tau}}{\mu_2}$

9. Электромагнитная индукция

NB! 85. *Сформулируйте закон электромагнитной индукции Фарадея и запишите его математическое выражение для мгновенного значения ЭДС индукции.*

Ответ: Закон электромагнитной индукции Фарадея: при изменении полного магнитного потока через контур в нём возникает электродвижущая сила индукции. Мгновенное значение ЭДС индукции равно: $\mathcal{E}_i = -\frac{d\Phi}{dt}$

- \mathcal{E}_i — электродвижущая сила индукции,
- Φ — полный магнитный поток через контур,
- t — время.

Знак "минус" отражает правило Ленца.

NB! 86. *Что такое правило Ленца и как оно связано со знаком в законе электромагнитной индукции?*

Ответ: Правило Ленца: индукционный ток всегда направлен так, чтобы препятствовать причине, его вызвавшей. Математически это выражается знаком "минус" в законе Фарадея:

- Если магнитный поток увеличивается ($d\Phi > 0$), то ЭДС индукции отрицательна
- Если магнитный поток уменьшается ($d\Phi < 0$), то ЭДС индукции положительна

NB! 87. *Дайте определение индуктивности контура. Запишите формулу, связывающую индуктивность с собственным магнитным потоком, и поясните все обозначения.*

Ответ: Индуктивность контура L — это коэффициент пропорциональности между собственным магнитным потоком контура и силой тока в нём: $\Phi_{\text{собств}} = L \cdot I$

- $\Phi_{\text{собств}}$ — собственный магнитный поток контура,
- L — индуктивность контура,
- I — сила тока в контуре.

Единица измерения индуктивности — генри (Гн).

88. *Запишите формулу для расчёта индуктивности длинного соленоида и поясните все входящие в неё величины.*

Ответ: Индуктивность длинного соленоида вычисляется по формуле: $L = \mu_0 n^2 S \ell = \mu_0 n^2 V$

- L — индуктивность соленоида,
- μ_0 — магнитная постоянная,
- n — линейная плотность намотки витков ($n = N/\ell$),
- S — площадь поперечного сечения соленоида,
- ℓ — длина соленоида,
- V — объём соленоида.

89. *Запишите дифференциальное уравнение и его решение для тока в цепи с индуктивностью и активным сопротивлением после подключения источника постоянной ЭДС при нулевых начальных условиях.*

Ответ: Уравнение для цепи с индуктивностью L и сопротивлением R после замыкания:
 $\mathcal{E} = IR + L \frac{dI}{dt}$. Решение этого уравнения при начальном условии $I(0) = 0$:

$$I(t) = \frac{\mathcal{E}}{R} (1 - e^{-t/\tau})$$

где $\tau = \frac{L}{R}$ — постоянная времени цепи. Физический смысл: за время τ ток в цепи достигает примерно 63% от своего установившегося значения.

90. *Чему равна энергия магнитного поля катушки с током? Запишите три эквивалентные формулы для её вычисления.*

Ответ: Энергия магнитного поля катушки с током:

$$\bullet W_M = \frac{LI^2}{2} = \frac{I\Phi}{2} = \frac{\Phi^2}{2L}$$

где L — индуктивность, I — сила тока, Φ — собственный магнитный поток.

91. *Запишите формулу для объёмной плотности энергии магнитного поля и поясните все входящие в неё величины.*

Ответ: Объёмная плотность энергии магнитного поля: $w_B = \frac{BH}{2} = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}$

- w_B — объёмная плотность энергии магнитного поля,
- B — магнитная индукция,
- H — напряжённость магнитного поля,
- μ — магнитная проницаемость среды,
- μ_0 — магнитная постоянная.

- ВВ!** 92. *Что такое вихревое электрическое поле? Чем оно принципиально отличается от электростатического поля?*

Ответ: Вихревое электрическое поле — это электрическое поле, возникающее при изменении магнитного поля во времени. Его особенности:

- Силовые линии замкнуты (поле вихревое)
- Источником является переменное магнитное поле, а не электрические заряды
- Работа по замкнутому контуру не равна нулю (не является потенциальным)

93. *Запишите закон электромагнитной индукции в интегральной форме через циркуляцию вихревого электрического поля.*

Ответ: Закон электромагнитной индукции в интегральной форме: $\oint_{\Gamma} \vec{E} d\vec{\ell} = -\frac{d\Phi}{dt}$

- \vec{E} — напряжённость вихревого электрического поля,
- Γ — замкнутый контур,

- Φ — магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром.

NB! 94. *Запишите закон электромагнитной индукции в дифференциальной форме и поясните его физический смысл.*

Ответ: Закон электромагнитной индукции в дифференциальной форме: $\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$

- $\text{rot } \vec{E}$ — ротор напряжённости электрического поля,
- $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ — производная магнитной индукции по времени.

Физический смысл: переменное магнитное поле создаёт вихревое электрическое поле.

NB! 95. *Чему равна ЭДС самоиндукции? Запишите формулу и поясните физический смысл.*

Ответ: ЭДС самоиндукции — это ЭДС индукции, возникающая в контуре при изменении собственного магнитного потока: $\mathcal{E}_s = -L \frac{dI}{dt}$

- \mathcal{E}_s — ЭДС самоиндукции,
- L — индуктивность контура,
- $\frac{dI}{dt}$ — скорость изменения тока в контуре.

Знак «минус» отражает правило Ленца.

10. Электромагнитные колебания

№! 96. *Запишите дифференциальное уравнение для свободных колебаний в последовательном RLC-контуре и поясните физический смысл всех входящих в него параметров.*

Ответ: Дифференциальное уравнение для свободных колебаний в последовательном RLC-контуре имеет вид: $\frac{d^2q}{dt^2} + 2\gamma \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0$

- q — заряд конденсатора,
- $\gamma = \frac{R}{2L}$ — коэффициент затухания,
- $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ — собственная частота контура,
- R — сопротивление,
- L — индуктивность,
- C — ёмкость.

№! 97. *Запишите формулу Томсона для периода свободных незатухающих электромагнитных колебаний и поясните все входящие в неё величины.*

Ответ: Формула Томсона для периода свободных незатухающих колебаний: $T = 2\pi\sqrt{LC}$

- T — период колебаний,
- L — индуктивность катушки,
- C — ёмкость конденсатора.

Период зависит только от параметров контура L и C и не зависит от начальных условий.

98. *Чему равны средние значения электрической и магнитной энергий в колебательном контуре при свободных незатухающих колебаниях?*

Ответ: При свободных незатухающих колебаниях средние значения энергий равны:

$$\langle W_e \rangle = \langle W_m \rangle = \frac{q_m^2}{4C}.$$

- W_e — электрическая энергия в конденсаторе,
- W_m — магнитная энергия в катушке,
- q_m — амплитуда колебаний заряда,
- C — ёмкость конденсатора.

99. *Дайте определение добротности колебательного LCR-контура и запишите три эквивалентные формулы для её вычисления.*

Ответ: Добротность Q - параметр колебательной системы, характеризующий, во сколько раз запасы энергии в системе больше, чем потери энергии за время изменения фазы на 1 радиан.

- $Q = \frac{\omega_0}{2\gamma}$, где ω_0 - собственная частота колебаний контура, γ - коэффициент затухания

- $Q = \pi N$, где N — число колебаний за время затухания
- $Q = \frac{\pi}{\lambda}$, где λ — логарифмический декремент затухания

Чем выше добротность, тем медленнее затухают колебания и острее резонанс.

NB! 100. *Что такое резонанс в колебательном контуре? При какой частоте вынуждающей силы наблюдается резонанс?*

Ответ: Резонанс — явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при приближении частоты вынуждающей силы к собственной частоте контура. Резонансная частота: $\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\gamma^2}$ При малом затухании ($\gamma \ll \omega_0$): $\omega_{\text{рез}} \approx \omega_0$

- $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ — собственная частота контура
- $\gamma = \frac{R}{2L}$ — коэффициент затухания

101. *Запишите выражение для амплитуды вынужденных колебаний заряда и поясните зависимость амплитуды от частоты вынуждающей силы.*

Ответ: Амплитуда вынужденных колебаний заряда: $q_m = \frac{\mathcal{E}_0/L}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\gamma^2\omega^2}}$

- \mathcal{E}_0 — амплитуда внешней ЭДС,
- L — индуктивность контура
- ω_0 — собственная частота контура,
- ω — частота вынуждающей силы,
- γ — коэффициент затухания.

Максимальная амплитуда достигается при резонансной частоте $\omega = \omega_{\text{рез}}$.

102. *Что такое ширина резонансной кривой и как она связана с добротностью контура?*

Ответ: Ширина резонансной кривой $\Delta\omega$ — это разность частот, при которых амплитуда колебаний уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с максимальной: $\Delta\omega = 2\gamma = \frac{\omega_0}{Q}$

- γ — коэффициент затухания,
- ω_0 — собственная частота контура,
- Q — добротность контура.

Чем выше добротность, тем уже резонансная кривая.

NB! 103. *Дайте определение импеданса последовательного RLC-контура. Запишите выражение для комплексного импеданса и его модуля.*

Ответ: Импеданс (комплексное сопротивление) последовательного RLC-контура: $Z = R + i\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$

- R — активное сопротивление,
- ωL — индуктивное сопротивление,

- $\frac{1}{\omega C}$ — ёмкостное сопротивление.

Модуль импеданса (полное сопротивление): $|Z| = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$

104. *Сформулируйте правила Кирхгофа для цепей переменного тока в комплексной форме.*

Ответ: Правила Кирхгофа для цепей переменного тока в комплексной форме:

- Первое правило: $\sum I_k = 0$ (алгебраическая сумма комплексных токов в узле равна нулю)
- Второе правило: $\sum I_k Z_k = \sum \mathcal{E}_k$ (сумма падений напряжений на элементах контура равна сумме ЭДС)

где $Z_k = R_k + i\omega L_k - \frac{i}{\omega C_k}$ — импеданс k -го элемента.

105. *Чему равна активная мощность в цепи переменного тока? Запишите формулу через действующие значения тока и напряжения.*

Ответ: Активная мощность в цепи переменного тока: $\langle P \rangle = \mathcal{E}_{\text{эфф}} I_{\text{эфф}} \cos \phi$

- $\mathcal{E}_{\text{эфф}} = \frac{\mathcal{E}_0}{\sqrt{2}}$ — действующее значение ЭДС,
- $I_{\text{эфф}} = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$ — действующее значение тока,
- $\cos \phi$ — коэффициент мощности,
- ϕ — сдвиг фаз между током и напряжением.

Активная мощность определяет среднюю скорость потребления энергии.

106. *Что такое реактивная мощность и какой физический смысл она имеет?*

Ответ: Реактивная мощность: $Q = \mathcal{E}_{\text{эфф}} I_{\text{эфф}} \sin \phi$

- $\mathcal{E}_{\text{эфф}}$ — действующее значение ЭДС,
- $I_{\text{эфф}}$ — действующее значение тока,
- ϕ — сдвиг фаз между током и напряжением.

Реактивная мощность характеризует энергию, которая периодически перекачивается между источником и реактивными элементами (катушкой и конденсатором) без превращения в другие формы энергии.

107. *Каковы фазовые соотношения между током и напряжением на резисторе, катушке индуктивности и конденсаторе?*

Ответ: Фазовые соотношения в цепи переменного тока:

- На резисторе: ток и напряжение совпадают по фазе ($\phi = 0$)
- На катушке: ток отстаёт от напряжения на $\pi/2$ ($\phi = \pi/2$)
- На конденсаторе: ток опережает напряжение на $\pi/2$ ($\phi = -\pi/2$)

11. Уравнения Максвелла. Электромагнитные волны

NB! 108. Запишите выражение для плотности полного тока и поясните физический смысл всех входящих в него слагаемых.

Ответ: Плотность полного тока равна сумме плотности тока проводимости и плотности тока смещения: $\vec{j}_{\text{полн}} = \vec{j}_{\text{пров}} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$. Здесь $\vec{j}_{\text{пров}}$ — плотность тока проводимости, обусловленного движением свободных зарядов, а $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ — плотность тока смещения, связанного с изменением во времени электрического поля.

NB! 109. Запишите уравнения Максвелла в интегральной форме для циркуляций полей \vec{E} и \vec{H} . Дайте краткую физическую интерпретацию каждого уравнения.

Ответ:

- $\oint \vec{E} d\vec{l} = - \int \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}$ — закон электромагнитной индукции Фарадея: изменяющееся магнитное поле порождает вихревое электрическое поле.
- $\oint \vec{H} d\vec{l} = \int \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}$ — обобщённый закон Ампера-Максвелла: циркуляция магнитного поля по контуру равна полному току (току проводимости и току смещения) через поверхность, ограниченную этим контуром.

NB! 110. Запишите уравнения Максвелла в интегральной форме для потоков полей \vec{D} и \vec{B} . Дайте краткую физическую интерпретацию каждого уравнения.

Ответ:

- $\oint \vec{D} d\vec{S} = \int \rho dV$ — теорема Гаусса для электрического поля: поток электрической индукции через замкнутую поверхность равен стороннему заряду внутри неё.
- $\oint \vec{B} d\vec{S} = 0$ — теорема Гаусса для магнитного поля: поток магнитной индукции через любую замкнутую поверхность равен нулю (отсутствие магнитных зарядов).

NB! 111. Запишите систему уравнений Максвелла в дифференциальной форме.

Ответ:

- $\text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
- $\text{div } \vec{D} = \rho$
- $\text{rot } \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$
- $\text{div } \vec{B} = 0$

где

- \vec{E}, \vec{H} — напряженности электрического и магнитного полей, соответственно
- \vec{D}, \vec{B} — индукция электрического и магнитного полей, соответственно
- ρ — плотность свободных зарядов
- \vec{j} — плотность тока проводимости

NB! 112. Запишите материальные уравнения, связывающие векторы \vec{D} и \vec{E} , \vec{B} и \vec{H} , \vec{j} и \vec{E} для линейных изотропных сред.

Ответ:

- $\vec{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \vec{E}$, где ε — относительная диэлектрическая проницаемость, ε_0 — электрическая постоянная.
- $\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}$, где μ — относительная магнитная проницаемость, μ_0 — магнитная постоянная.
- $\vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{E}_{\text{стор}})$, где σ — удельная электропроводность, $\vec{E}_{\text{стор}}$ — напряжённость стороннего поля.

NB! 113. Запишите волновое уравнение для вектора напряжённости электрического поля \vec{E} в вакууме.

Ответ:

$$\Delta \vec{E} - \varepsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0.$$

- \vec{E} — напряжённость электрического поля,
- Δ — оператор Лапласа ($\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ в декартовых координатах),
- ε_0, μ_0 — электрическая и магнитная постоянные, соответственно

NB! 114. Чему равна фазовая скорость электромагнитной волны в вакууме и в однородной изотропной среде? Запишите формулы и поясните входящие в неё постоянные.

Ответ: Фазовая скорость электромагнитной волны в вакууме равна $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$, где ε_0 — электрическая постоянная ($\approx 8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м), μ_0 — магнитная постоянная ($\approx 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м). Эта скорость является фундаментальной физической постоянной и равна скорости света. Фазовая скорость электромагнитной волны в среде равна $v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon \mu}}$, где c — скорость света в вакууме, ε — диэлектрическая проницаемость среды, μ — магнитная проницаемость среды.

NB! 115. Дайте определение вектора Пойнтинга. Запишите формулу, связывающую его с векторами \vec{E} и \vec{H} .

Ответ: Вектор Пойнтинга \vec{S} — это вектор плотности потока энергии электромагнитного поля. Он определяется как векторное произведение векторов напряжённости электрического и магнитного полей: $\vec{S} = [\vec{E} \times \vec{H}]$. Его направление указывает направление переноса энергии, а модуль равен энергии, переносимой волной за единицу времени через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения.

NB! 116. Чему равна интенсивность I плоской монохроматической электромагнитной волны, если известна амплитуда E_m напряжённости её электрического поля?

Ответ: Интенсивность I плоской монохроматической электромагнитной волны равна среднему по времени значению модуля вектора Пойнтинга: $I = \langle S \rangle = \sqrt{\frac{\varepsilon \varepsilon_0}{\mu \mu_0}} \cdot \frac{E_m^2}{2}$. Интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды электрического поля волны.

117. Чему равен импульс единицы объема электромагнитной волны?

Ответ: Импульс единицы объема электромагнитной волны равен $\vec{p}_1 = \frac{\vec{S}}{c^2} = \frac{[\vec{E}, \vec{H}]}{c^2}$, где \vec{S} — вектор Пойнтинга, c — скорость света в вакууме. Этот импульс связан с плотностью энергии $w_{\text{эм}}$ соотношением $\vec{p}_1 = \frac{w_{\text{эм}} \vec{v}_{\text{эм}}}{c^2}$, где $\vec{v}_{\text{эм}}$ — скорость переноса энергии (фазовая скорость).

118. Как зависит мощность излучения заряда, совершающего гармонические колебания, от частоты этих колебаний ω ?

Ответ: Мощность излучения P пропорциональна средней по времени величине вектора Пойнтинга, которая, в свою очередь, пропорциональна ω^4 : $P \propto \langle S \rangle \propto \omega^4$. Следовательно, потери на излучение резко возрастают с увеличением частоты колебаний заряда.

119. Что такое «волновая зона» при излучении электромагнитных волн ускоренным зарядом?

Ответ: Волновая зона — это область пространства, удалённая от излучающего заряда на расстояние r , значительно превышающее длину волны излучения λ ($r \gg \lambda$). В этой зоне преобладают составляющие электромагнитного поля, убывающие обратно пропорционально расстоянию ($\sim 1/r$), которые и представляют собой излучаемую электромагнитную волну. Электростатические и магнитостатические поля, убывающие быстрее ($\sim 1/r^2$), становятся пренебрежимо малы.