Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Радиофизический факультет

УТВЕРЖДЕНО:
Декан
А. Г. Коротаев

Оценочные материалы по дисциплине

Электродинамика

по направлению подготовки

03.03.03 Радиофизика

Направленность (профиль) подготовки:
Радиофизика, электроника и информационные системы

Форма обучения
Очная

Квалификация
Бакалавр

Год приема
2024

СОГЛАСОВАНО:
Руководитель ОП
М.Л. Громов

Председатель УМК
А.П. Коханенко

Томск – 2025

1. Компетенции и индикаторы их достижения, проверяемые данными оценочными материалами

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

ОПК-1 Способен применять базовые знания в области физики и радиофизики и использовать их в профессиональной деятельности, в том числе в сфере педагогической деятельности;.

ПК-2 Способен проводить математическое моделированию процессов в приборах и устройствах радиофизики и электроники, владеть современными отечественными и зарубежными пакетами программ при решении при решении профессиональных задач..

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИОПК 1.1 Обладает базовыми знаниями в области математики и физики, необходимыми для освоения специальных дисциплин.

ИОПК 1.2 Обладает базовыми знаниями в области радиофизики, необходимыми для профессиональной деятельности.

ИОПК 1.3 Применяет базовые знания в области физики и радиофизики при осуществлении профессиональной деятельности.

ИПК 2.1 Понимает принцип действия и модели разрабатываемого радиоэлектронного прибора или устройства.

ИПК 2.2 Применяет в профессиональной деятельности различные численные методы, в том числе реализованные в готовых библиотеках при решении конкретных радиофизических задач.

ИПК 2.3 Владеет современными пакетами программ при решении задач в области радиофизики и радиоэлектроники.

2. Оценочные материалы текущего контроля и критерии оценивания

Элементы текущего контроля:

– Задачи

Контрольные Задачи для практических занятий (ИОПК-1.1, ИОПК-1.2, ИОПК-1.3, ИПК 2.1, ИПК 2.2, ИПК 2.3)

1. Стационарная электродинамика

Задача 1

Используя принцип суперпозиции, вычислить пространственное распределение скалярного потенциала и вектора напряженности электрического поля для элементарного диполя Герца.

Ответ: $$\varphi(r,\theta)=\frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r-d\cos\theta}-\frac{1}{r+d\cos\theta}\right),$$

$$E_r(r,\theta)=\frac{p}{2\pi\varepsilon_0 r^3}\cos\theta,\quad E_\theta(r,\theta)=\frac{p}{4\pi\varepsilon_0 r^3}\sin\theta,\quad p=qd.$$

Задача 2

Бесконечно длинный диэлектрический цилиндр радиуса a с проницаемостью ε_a помещен в поперечное однородное электрическое поле $\vec{\mathbf{E}}_0$. Рассчитать пространственное распределение скалярного потенциала вне цилиндра. Указание: в цилиндрической системе координат использовать граничные условия

$$E_\theta(r=-a,\theta)=E_\theta(r=+a,\theta),\quad \varepsilon E_r(r=-a,\theta)=E_r(r=+a,\theta),\quad \vec{E}(r=\infty,\theta)=\vec{E}_0,$$

и метод разделения переменных.

О т в е т: $\varphi(r,\theta) = E_0\left(\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon+1}\frac{a^2}{r} - r\right)\cos\theta$.

Задача 3

Бесконечно длинный металлический цилиндр радиуса *a* помещен в поперечное однородное электрическое поле $\vec{E}_0$. Рассчитать пространственное распределение скалярного потенциала и вектора напряженности электрического поля вне цилиндра. Указание: в цилиндрической системе координат использовать граничные условия

$$E_\theta(r=a,\theta)=0,\ \vec{\mathbf{E}}(r=\infty,\theta)=\vec{\mathbf{E}}_0,$$

и метод разделения переменных.

О т в е т: $\varphi(r,\theta) = \mathbf{E}_0\left(a^2/r - r\right)\cos\theta$,

$E_r(r,\theta) = \mathbf{E}_0\left(a^2/r^2+1\right)\cos\theta$, $E_\theta(r,\theta) = \mathbf{E}_0\left(-a^2/r^2+1\right)\sin\theta$.

Задача 4

Имеется металлическая заземленная сфера радиуса *a*. Вблизи неё на расстоянии *R* находится точечный заряд *q*. Найти величину *Q* и положение *r* индуцированного заряда. Указание: использовать метод зеркальных изображений, полагая сферу совпадающей с одной из эквипотенциальных поверхностей.

О т в е т: $r = \frac{a^2}{R},\quad Q = -q\frac{a}{R}$.

Задача 5

Металлический шар радиуса *a* помещен в однородное электрическое поле $\vec{E}_0$. Рассчитать пространственное распределение скалярного потенциала и вектора напряженности электрического поля вне шара. Указание: в сферической системе координат использовать граничные условия

$$E_\theta(r=a,\theta)=0,\ \vec{\mathbf{E}}(r=\infty,\theta)=\vec{\mathbf{E}}_0,$$

и метод разделения переменных.

О т в е т: $\varphi(r,\theta) = E_0\left(a^3/r^2 - r\right)\cos\theta$,

$E_r(r,\theta) = E_0\left(2a^3/r^3+1\right)\cos\theta$, $E_\theta(r,\theta) = E_0\left(-a^3/r^3+1\right)\sin\theta$.

Задача 6

Используя решение предыдущей задачи, найти индуцированный на шаре дипольный момент, индуцированный заряд и эффективный размер эквивалентного диполя.

О т в е т: $p = 4\pi\varepsilon_0 a^3 E_0$, $q = 3\pi\varepsilon_0 a^2 E_0$, $d = 2/3\cdot(2a)$.

Задача 7

Скалярный потенциал φ(*x*,*y*) двумерного электростатического поля является гармонической функцией, удовлетворяет уравнению Лапласа

$$\Delta\varphi = 0.$$

Можно ли определить комплексный потенциал – аналитическую функцию $W(z)$ комплексной переменной $z = x + iy$ так, чтобы её вещественная часть $\mathrm{Re}\{W(z)\}$ совпадала бы с функцией $\varphi(x,y)$?

Р е ш е н и е. Да, поскольку вследствие условий дифференцируемости Коши – Римана вещественная и мнимая части, а значит, и сама аналитическая функция удовлетворяют уравнению Лапласа. Положим, что

$$\mathrm{Re}\{W(z)\} \equiv U(x,y) = -\varphi(x,y).$$

Для полного определения комплексного потенциала достаточно найти функцию

$$V(x,y) \equiv \mathrm{Im}\{W(z)\}.$$

Сделать это можно, удовлетворив условиям дифференцируемости Коши – Римана:

$$\frac{\partial V}{\partial y} = \frac{\partial U}{\partial x} = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad \frac{\partial V}{\partial x} = -\frac{\partial U}{\partial y} = \frac{\partial \varphi}{\partial y}.$$

Если решить эти уравнения относительно функции $V(x,y)$, то комплексный потенциал записывается как $W = U + iV$.

Достоинством определения соответствующего комплексного потенциала является возможность использовать простейшие потенциалы для нахождения сложных потенциалов путем применения теории конформных преобразований.

Задача 8

Как с помощью комплексного потенциала найти напряженность соответствующего электрического поля?

Р е ш е н и е. С учетом того, что

$$\vec{E} = -\nabla\varphi,$$

путем простого дифференцирования и использования условий Коши – Римана можно записать

$$\frac{dW}{dz} = E_x - i\,E_y,$$

или

$$E_x = \mathrm{Re}\left(\frac{dW}{dz}\right), \quad E_y = -\mathrm{Im}\left(\frac{dW}{dz}\right).$$

Задача 9

Найти комплексный потенциал для поля над бесконечно протяженной плоскостью, имеющей поверхностную плотность заряда σ.

Р е ш е н и е. Будем считать заряженную плоскость совпадающей с плоскостью $y = 0$. Из третьего уравнения Максвелла в интегральной форме можно записать

$$\vec{E} = E_y\vec{e}_y, \quad E_y = \sigma/2\varepsilon_0.$$

Соответствующий этому потенциал равен

$$\varphi(x,y) = -y\sigma/2\varepsilon_0, \quad \text{или} \quad U(x,y) = y\sigma/2\varepsilon_0.$$

Использование условий Коши – Римана дает $V(x,y) = -x\sigma/2\varepsilon_0$. В итоге имеем

$$W = U + iV = -iz\sigma/2\varepsilon_0.$$

Задача 10

С помощью комплексного потенциала заряженной плоскости найти соответствующий потенциал внутри находящегося под разностью потенциалов φ_0 плоского конденсатора толщиной d. Указание: воспользоваться решением предыдущей задачи и принципом суперпозиции.
О т в е т: $W = i\varphi_0 z/d$.

Задача 11

С помощью конформного преобразования найти комплексный потенциал бесконечного коаксиального конденсатора, находящегося под разностью потенциалов φ_0.
О т в е т: $W = \varphi_0 \ln(z/a)/\ln(b/a)$, где a и b – радиусы внутреннего и внешнего цилиндров конденсатора.

Задача 12

Металлический шар радиусом a окружён концентрической тонкой металлической оболочкой радиусом b. Пространство между этими электродами заполнено однородной слабо проводящей средой с удельным сопротивлением ρ. Найти сопротивление межэлектродного промежутка.
Р е ш е н и е. Выделим мысленно тонкий сферический слой между радиусами a и $r + dr$. Линии тока во всех точках этого слоя идут перпендикулярно ему, поэтому такой слой можно рассматривать как цилиндрический проводник длиной dr с площадью поперечного сечения $4\pi r^2$. Воспользовавшись формулой для сопротивления цилиндрического проводника, запишем

$$dR = \rho \frac{dr}{4\pi r^2}.$$

Проинтегрировав это выражение по r от a до b, получим

$$R = \frac{\rho}{4\pi}\left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b}\right).$$

Задача 13

Два металлических шарика одинакового радиуса a находятся в однородной слабо проводящей среде с удельным сопротивлением ρ. Найти сопротивление среды между шариками при условии, что расстояние между шариками значительно больше их размеров.
Р е ш е н и е. Мысленно зарядим шарики $+q$ и $-q$. Поскольку шарики находятся далеко друг от друга, электрическое поле вблизи поверхности каждого из них определяется практически только зарядом прилегающего шарика, причём его заряд можно считать распределённым равномерно по поверхности. Окружив шарик с положительным зарядом концентрической сферой, непосредственно прилегающей к его поверхности, запишем выражение для тока, протекающего через эту сферу:

$$I = 4\pi a^2 j,$$

где j – плотность тока. Воспользовавшись законом Ома $E = q/4\pi\varepsilon_0 a^2$ и формулой $E = q/4\pi\varepsilon_0 a^2$, получим

$$I = q / \varepsilon_0 \rho.$$

Далее найдём разность потенциалов между шариками:

$$U = \varphi_+ - \varphi_- \approx 2q / 4\pi\varepsilon_0 a^2.$$

Искомое сопротивление

$$R = U / I = \rho / 2\pi a.$$

Этот результат справедлив, независимо от диэлектрической проницаемости среды.

Задача 14

Два проводника произвольной формы находятся в безграничной однородной слабо проводящей среде с удельным сопротивлением ρ и диэлектрической проницаемостью ε. Найти значения произведения *RC* для данной системы, где *R* – сопротивление среды между проводниками, *C* – взаимная ёмкость проводников при наличии среды.
Р е ш е н и е. Зарядим мысленно проводники зарядами +*q* и –*q*. Так как среда между ними слабо проводящая, то поверхности проводников являются эквипотенциальными и конфигурация поля такая же, как и при отсутствии среды.
Окружим, например, положительно заряженный проводник замкнутой поверхностью *S*, непосредственно прилегающей к поверхности проводника, и вычислим отдельно *R* и *C*:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{U}{\oint j_n dS} = \frac{U}{\sigma \oint E_n dS},$$

$$C = \frac{q}{U} = \frac{\oint D_n dS}{U} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 \oint E_n dS}{U},$$

где интегралы взяты по данной поверхности *S*. При вычислении *R* был использован закон Ома, а при вычислении *C* – теорема Гаусса. Произведение полученных выражений дает

$$RC = \varepsilon_0 \varepsilon / \sigma = \varepsilon_0 \varepsilon \rho.$$

Задача 15

Зазор между обкладками плоского конденсатора заполнен последовательно двумя диэлектрическими слоями 1 и 2 толщиной l_1 и l_2 проницаемостями ε_1 и ε_2 и удельными сопротивлениями ρ_1 и ρ_2. Конденсатор находится под постоянным напряжением *U*, причём электрическое поле направлено от слоя 1 к слою 2. Найти поверхностную плотность сторонних зарядов на границе раздела диэлектрических слоёв.
Р е ш е н и е. Искомая поверхностная плотность зарядов

$$\sigma = D_{2n} - D_{1n} = \varepsilon_0 \varepsilon_2 E_2 - \varepsilon_0 \varepsilon_1 E_1.$$

Для определения E_1 и E_2 воспользуемся двумя условиями: из того факта, что $j_1 = j_2$ следует $E_1/\rho_1 = E_2/\rho_2$ и, кроме того, $E_1 l_1 + E_2 l_2 = U$. Решив два последних уравнения, найдём E_1 и E_2. Их подстановка в (1) приводит к следующему результату:

$$\sigma = \frac{\varepsilon_2 \rho_2 - \varepsilon_1 \rho_1}{\rho_1 l_1 + \rho_2 l_2} \varepsilon_0 U.$$

Отсюда видно, что $\sigma = 0$ при $\varepsilon_2 \rho_2 = \varepsilon_1 \rho_1$.

Задача 16

Виток с током может рассматриваться как магнитный диполь. Найти поле стационарного элементарного магнитного диполя радиуса *a* с током *I*. Указание: использовать векторный потенциал.
О т в е т:

$$H_r(r,\theta) = \frac{p_m}{2\pi\varepsilon_0 r^3}\cos\theta, \quad H_\theta(r,\theta) = \frac{p_m}{4\pi\varepsilon_0 r^3}\sin\theta, \quad p_m = \mu_0 \pi a^2 I.$$

2. Теория излучения

Задача 17

Магнитная составляющая поля излучения движущегося с ускорением $\vec{a}$ заряда q определяется соотношением

$$\vec{\mathbf{H}} = \frac{q}{4\pi c|\vec{\mathbf{r}}|}\left[\vec{a}\,\vec{\mathbf{e}}\right], \quad \text{где} \quad \vec{\mathbf{e}} = \frac{\vec{\mathbf{r}}}{|\vec{\mathbf{r}}|}.$$

Найти полную мощность излучения. Указание: использовать вектор Пойнтинга.

О т в е т: $J = \frac{\mu_0}{6\pi c}\left(qa\right)^2$.

Задача 18

В предложенной Бором модели атома водорода электрон движется вокруг ядра по круговой орбите радиусом $R = 0{,}53 \cdot 10^{-10}$ м. С какой скоростью J электрон излучает энергию и за какое время в этих условиях будет испущена энергия в $W = 7$ эВ, что составляет примерно половину энергии связи электрона?

О т в е т: $J = \frac{\mu_0}{6\pi c}\left(q\frac{q^2}{4\pi\varepsilon_0 R^2 m}\right)^2 = 4{,}61 \cdot 10^{-8}\ \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = 2{,}88 \cdot 10^{11}\ \frac{\text{эВ}}{\text{с}}$,

$\Delta t = 2{,}43 \cdot 10^{-2}$ нс, где q и m – заряд и масса электрона.

Задача 19

Падающий на Землю солнечный свет обеспечивает мощность притока энергии на единицу площади, равную П = 1,35 кВт/м^2. Чему равно среднеквадратичное значение напряженности электрического поля?

О т в е т: $\bar{E} = \sqrt{\Pi Z_0} = 713\ \text{В/м}$.

Задача 20

Свет от яркой лампы мощностью $P = 100$ Вт фокусируется на отражающей лопасти радиометра. С какой силой свет давит на лопасть?

О т в е т: $F = \frac{2P}{c} = 6{,}67 \cdot 10^{-7}\ H$.

Задача 21

Частица массой m и зарядом q влетает в магнитное поле B со скоростью V. Найти мощность излучения частицы.

О т в е т: $J = \frac{\mu_0}{6\pi c}\left(q\frac{qVB}{m}\right)^2$.

Задача 22

Заряд Q движется с ускорением $\vec{a}$. Найти силу, с которой поле излучения этого заряда действует на покоящийся в начальный момент другой заряд q.

Р е ш е н и е. Напряженность поля излучения находится как

$$\vec{E} = \frac{\mu_0 Q}{4\pi r}\left[\left[\vec{a}\,\vec{e}\right]\vec{e}\right], \quad \text{где} \quad \vec{\mathbf{e}} = \frac{\vec{\mathbf{r}}}{|\vec{\mathbf{r}}|}.$$

Искомая сила тогда равна

$$\vec{F} = q\vec{E} = \frac{\mu_0 qQ}{4\pi r}\left[\left[\vec{a}\,\vec{e}\right]\vec{e}\right].$$

Задача 23

Заряд Q равномерно распределен по кольцу радиуса R, которое движется по оси с ускорением $\vec{a}$. Найти силу, с которой поле излучения этого заряда действует на покоящийся в начальный момент другой заряд q, расположенный на оси на расстоянии d от кольца. Указание: использовать решение предыдущей задачи, проинтегрировав силу от каждого участка кольца.

Ответ: $$F = \frac{\mu_0 qQaR}{(2\pi R)4\pi\left(d^2+R^2\right)^{3/2}}.$$

Задача 24

По бесконечно протяженной проводящей плоскости течет переменный ток с поверхностной плотностью $j(t)$. Найти создаваемое электромагнитное поле.
Решение. Из одномерности задачи очевидно, что все компоненты электромагнитного поля могут зависеть только от времени t и от расстояния точки наблюдения x до плоскости с током. При этом электрическое и магнитное поля имеют только по одной отличной от нуля компоненте

$$\vec{E} = \left(0, E_y, 0\right) \text{ и } \vec{H} = \left(0, 0, H_z\right).$$

Поскольку все компоненты поля должны удовлетворять волновым уравнениям, то можно сразу записать

$$E_y = E_y\left(t - \frac{x}{c}\right), \quad H_z = H_z\left(t - \frac{x}{c}\right).$$

Из граничного условия при $x = 0$ можно записать

$$H_z\left(t - \frac{x}{c}\right)\Big|_{x=0} = \frac{1}{2}j(t), \text{ т.е. } H_z(x,t) = \frac{1}{2}j\left(t - \frac{x}{c}\right).$$

Подстановка этого решения во второе уравнение Максвелла дает дифференциальное уравнение

$$\vec{H} = \frac{q}{4\pi c r}\left[\vec{a}\,\vec{e}\right],$$

а его решение – $$E_y(x,t) = \frac{\mu_0 c}{2}j\left(t - \frac{x}{c}\right) = Z_0 H_z.$$

Полученные компоненты полей $\vec{E}$ и $\vec{H}$ представляют собой запись плоской электромагнитной волны в общем виде.

Задача 25

Частица с зарядом q движется со скоростью V, упруго отражается от некоторой плоскости. Определить длинноволновую часть спектра излучения в момент удара.
Решение.
В первом приближении скорость частицы в момент удара меняется скачком на величину $2V$, т.е. скорость изменяется во времени по закону

$$\frac{dx}{dt} = -V\,\mathrm{sgn}(t).$$

Этому соответствует ускорение $a = \dfrac{d^2x}{dt^2} = -2V\delta(t)$, и поле излучения $\vec{E}$ вида

$$\vec{E}(\vec{r},t) = \frac{q\mu_0}{2\pi|\vec{r}|}\left[\vec{e}\left[\vec{e}\vec{V}\right]\right]\delta(t), \quad \vec{e} = \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|}.$$

Искомый спектр поля излучения имеет вид

$$\vec{E}(\vec{r},\omega) = \int_{-\infty}^{\infty}\vec{E}(\vec{r},t)\exp(i\omega t)dt = \frac{q\mu_0}{2\pi|\vec{r}|}\left[\vec{e}\left[\vec{e}\vec{V}\right]\right].$$

Энергия излучения в единицу телесного угла в единичном интервале частот описывается выражением

$$\frac{dJ(\omega)}{d\Omega} = \left(\frac{q\mu_0\vec{\mathbf{V}}}{2\pi}\right)^2\frac{1}{Z_0}\sin^2\theta.$$

Здесь θ – угол, соответствующий направлению излучения. Видно, что максимум излучения лежит в отражающей плоскости. После интегрирования по полусфере имеем

$$J(\omega) = \frac{2}{3}\frac{q^2\vec{\mathbf{V}}^2}{\pi c^3\varepsilon_0}.$$

Задача 26

Как, измерив комплексный вектор напряженности плоской электромагнитной волны эллиптической поляризации, найти направление её распространения?

Р е ш е н и е. Направление распространения эллиптически поляризованной волны всегда ортогонально направлению вектора напряженности электрического поля $\vec{E}$. Комплексный вектор $\vec{E}$ состоит из вещественных векторов квадратур поля $\vec{C} = \mathrm{Re}(\vec{E})$ и $\vec{S} = \mathrm{Im}(\vec{E})$, которые для эллиптически поляризованной волны не параллельны и лежат в плоскости эллипса поляризации. Векторное произведение

$$\vec{N} = \vec{C}\times\vec{S}$$

совпадает с направлением нормали к эллипсу поляризации, а значит – и с направлением распространения волны. Единичный вектор направления распространения волны определяется далее путем перенормировки

$$\vec{e} = \vec{N}\big/\left|\vec{N}\right|.$$

Задача 27

Монохроматическая плоская электромагнитная волна с частотой ω распространяется в среде с комплексным показателем преломления $n = n' + in''$. Найти фазовую скорость распространения волны $v_ф$ и коэффициент её затухания α. Указание: использовать представление комплексного волнового числа $k = n\omega/c$ для плоской волны

$$E = E_0\exp\left(ik\vec{e}\vec{r}\right).$$

О т в е т: $v_ф = c/n'$, $\alpha = \omega n''/c$.

3. Теория относительности

Задача 28

Большая пластинка из однородного диэлектрика с проницаемостью ε движется с постоянной нерелятивистской скоростью $\vec{V}$ в однородном магнитном поле $\vec{B}$. Найти поляризованость $\vec{P}$ диэлектрика и поверхностную плотность σ связанных зарядов.

Р е ш е н и е. В системе отсчёта, связанной с пластинкой, будет наблюдаться кроме магнитного поля и электрическое, обозначим его $\vec{E}_0'$. Согласно формулам преобразования полей,

$$\vec{E}_0' = \left[\vec{V}\vec{B}\right].$$

Поляризованость диэлектрика

$$\vec{P} = \chi\varepsilon_0\vec{E}_0' = \varepsilon_0\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}\left[\vec{V}\vec{B}\right].$$

Поверхностная плотность связанных зарядов

$$|\sigma| = P = \varepsilon_0\frac{\varepsilon-1}{\varepsilon}VB,$$

причём знаки зарядов на разных сторонах пластины будут разные.

Задача 29

Большая металлическая пластинка движется с постоянной нерелятивистской скоростью V ортогонально однородному магнитному полю B. Найти поверхностную плотность зарядов, возникающую на плоскостях пластинки из-за её движения.
Р е ш е н и е. Перейдём в систему отсчёта, связанную с пластинкой. Согласно формулам преобразования полей, в этой системе отсчёта будет наблюдаться постоянное однородное электрическое поле

$$\vec{E}' = \left[\vec{V}\vec{B}\right].$$

Под действием этого внешнего поля произойдёт смещение зарядов так, что на одной поверхности пластинки выступят положительные заряды, а на противоположной поверхности – отрицательные. Поверхностная плотность этих зарядов будет такой, чтобы создаваемое ими поле внутри пластинки полностью компенсировало внешнее поле $\vec{E}'$, ибо при равновесии результирующее электрическое поле внутри пластинки должно быть равно нулю. Имея в виду граничные условия, можно найти поверхностную плотность зарядов:

$$\sigma = \varepsilon_0\left|\vec{E}'\right| = \varepsilon_0\left|\vec{V}\right|\left|\vec{B}\right|.$$

Задача 30

Нерелятивистский точечный заряд q движется с постоянной скоростью V**.** Найти с помощью формул преобразования полей магнитное поле B этого заряда в точке, положение которой относительно заряда определяется радиус-вектором $\vec{r}$.

О т в е т: $\vec{B} = \dfrac{\mu_0 q}{4\pi r^3}\left[\vec{V}\vec{r}\right]$ **.**

Задача 31

Имеется незаряженный длинный прямой провод с током I. Найти заряд на единицу длины этого провода в системе отсчёта, движущейся поступательно с нерелятивистской скоростью V вдоль проводника в направлении тока I.

О т в е т: $\sigma = -\dfrac{VI}{c^2}$.

Происхождение этого заряда связано с различным лоренцевым сокращением, которое испытывают «цепочки» положительных и отрицательных зарядов (ведь их скорости разные!).

Задача 32

В К-системе отсчёта имеется узкий пучок протонов, движущихся с релятивистской скоростью V. На некотором расстоянии от пучка напряжённость электрического поля равна E. Найти индукцию B' магнитного поля на том же расстоянии от пучка в К'-системе отсчёта, перемещающейся со скоростью V_0 относительно К-системы в направлении движения протонов.

О т в е т: $B' = \dfrac{E\,|V - V_0\,|}{c^2\sqrt{1-(V_0\,/\,c)^2}}$.

Задача 33

Показать, что в случае любых двумерных электрических и магнитных полей, пересекающихся ортогонально, всегда можно перейти к такой движущейся системе координат, в которой либо электрическое, либо магнитное поле будет исключено. Как это зависит от того, что меньше $\vec{E}$ или $Z_0\vec{H}$?

Задача 34

С использованием релятивистских инвариантов показать, что плоская волна остается плоской во всех системах координат.

Задача 35

Волновой 4-вектор плоской волны в одной из инерциальных систем отсчета записывается как

$$\mathbf{K} = \left(\vec{e}_x\,\omega/c\,,\vec{e}_y\,\omega/c\,,\vec{e}_z\,\omega/c\,,i\,\omega/c\right).$$

Используя матрицу преобразования Лоренца, записать формулу для эффекта Доплера, возникающего в системе движущейся вдоль оси Ox с релятивистской скоростью V. Исчезает ли эффект Доплера при поперечном движении?

Ответ: $\omega' = \omega\left(1-\vec{e}_x\,V/c\right)\Big/\sqrt{1-\left(V/c\right)^2}$

3. Оценочные материалы итогового контроля (промежуточной аттестации) и критерии оценивания

Промежуточная аттестация проводится в форме экзамена (ИОПК-1.1, ИОПК-1.2, ИОПК-1.3, ИПК 2.1, ИПК 2.2, ИПК 2.3):

Экзаменационные билеты

Билет № 1

1. Уравнения Максвелла и законы: сохранения заряда, Фарадея.
2. Четырех-вектор скорости.

Билет № 2

1. Уравнения Максвелла и законы: Гаусса, Био-Савара-Лапласа.
2. Движение заряда в постоянном электрическом поле.

Билет № 3

1. Уравнения Максвелла и первый закон Кирхгофа.
2. Поляризация электромагнитных волн.

Билет № 4

1. Уравнения Максвелла и второй закон Кирхгофа.

2. Эквивалентные источники электромагнитного поля. Принцип Гюйгенса-Френеля-Кирхгофа.

Билет № 5

1. Граничные условия для электромагнитного поля.
2. Излучение элемента Гюйгенса.

Билет № 6

1. Теорема Пойнтинга и закон сохранения энергии.
2. Движение заряда в однородных скрещенных полях.

Билет № 7

1. Два примера использования теоремы Пойнтинга.
2. Постулаты Эйнштейна и матрица преобразования Лоренца. Четырех-векторы и тензоры.

Билет № 8

1. Теорема единственности решения уравнений Максвелла.
2. Четырех-векторы потенциала и тока. Основные уравнения.

Билет № 9

1. Скалярный и векторный потенциалы.
2. Дрейф заряда в поперечно неоднородном магнитном поле.

Билет № 3

1. Вектор Герца.
2. Релятивистское преобразование компонент электромагнитного поля.

Билет № 10

1. Решение однородного волнового уравнения.
2. Импульс и давление электромагнитного поля.

Билет № 11

1. Решение неоднородного волнового уравнения в запаздывающих потенциалах.
2. Тензоры электромагнитного поля.

Билет № 12

1. Дифференциальный закон Био-Савара-Лапласа.
2. Электромагнитное поле произвольно движущегося заряда.

Билет № 13

1. Поле элементарного электрического диполя.
2. Преобразование компонент электромагнитного поля.

Билет № 14

1. Поле элементарного магнитного диполя.
2. Релятивистский эффект Доплера.

Билет № 15

1. Электромагнитное поле колеблющегося диполя.
2. Релятивистское преобразование четырех-вектора потенциала и четырех-вектора тока.

Билет № 16

1. Вектор Пойнтинга для поля излучения колеблющегося диполя.
2. Движение заряда в постоянном магнитном поле.

Билет № 17

1. Уравнения электродинамики в комплексном представлении.
2. Релятивистская инвариантность уравнений электродинамики.

Билет № 18

1. Вектор Пойнтинга и теорема Пойнтинга в комплексном представлении.
2. Лемма Лоренца и теорема взаимности.

Билет № 19

1. Поле элементарного электрического вибратора в комплексном представлении.

2. Диэлектрическая проницаемость облака заряженных частиц.

Билет № 20

1. Анализ структуры электромагнитного поля элементарного электрического вибратора.
2. Потенциалы Льенара-Вихерта.

Билет № 21

1. Излучение элементарного магнитного вибратора.
2. Четырех-вектор ускорения.

4. Оценочные материалы для проверки остаточных знаний (сформированности компетенций)

Вопросы для оценки остаточных знаний:

1. Записать уравнения Максвелла в различных формах.
2. Волновое уравнение.
3. Уравнение Гельмгольца.
4. Граничные условия для электромагнитного поля.
5. Сферическая волна.
6. Плоская волна, что это такое?
7. Вектор Пойнтинга: смысл, размерность.
8. Что такое циклотронный радиус?
9. Физический смысл активной части вектора Пойнтинга.
10. Что такое элемент Гюйгенса?
11. Комплексная диэлектрическая проницаемость.
12. Что такое линейно поляризованная волна?
13. Что значит право- поляризованная волна?
14. Постулаты Эйнштейна.
15. Преобразование Лоренца.
16. Волновое сопротивление среды.
17. Эффект Доплера.
18. Принцип перестановочной двойственности.
19. Условие излучения электромагнитного поля заряженной частицей.
20. Формулировка теоремы взаимности.
21. Что такое дипольный момент?
22. Давление электромагнитного поля.
23. Импульс электромагнитного поля.
24. Скалярный и векторный потенциалы.
25. Чем отличается квазистатическое поле и поле излучения?
26. Излучает ли равномерно движущийся заряд?
27. Как движется заряженная частица в скрещенных полях?
28. Вектор Герца.
29. Теорема Пойнтинга.
30. Реактивная составляющая вектора Пойнтинга – что означает?
31. Что такое «четырех вектор» (потенциала, скорости, ускорения, тока)?
32. Что такое комплексная проводимость?
33. Что такое ток проводимости, сторонний и ток смещения?
34. Поле излучения – что это такое?
35. Диаграмма направленности элементарного вибратора.
36. Калибровка Лоренца.
37. Потенциалы Льенара-Вихерта – отличие от запаздывающих потенциалов.

38. Можно ли за счет выбора подходящей инерциальной системы координат избавиться от электрического (магнитного) поля?
39. Как долго может двигаться заряженная частица в магнитном поле?
40. Почему в модели Бора атомы не исчезают?
41. С чем связан поперечный эффект Доплера?
42. Диаграмма направленности излучения ускоренно движущейся заряженной частицы.

Информация о разработчиках

Суханов Дмитрий Яковлевич, доктор физ.-мат. наук, кафедра радиофизики, профессор.