

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Факультет «Радиоэлектроника и лазерная техника(РЛ)»

Кафедра «Радиоэлектронные системы и устройства(РЛ1)»

Домашняя задание №1

по дисциплине

«Электродинамика и распространение радиоволн»

Вариант № 12

Выполнил ст. группы РЛ-41

Филимонов С.В.

Преподаватель Русов Ю.С.

Оценка в баллах _____

Москва, 2022

Задание №1

ГОСТ 18238-72

1. **Линия передачи сверхвысоких частот (Линия передачи)** - Устройство, ограничивающее область распространения электромагнитных колебаний и направляющее поток сверхвысокочастотной электромагнитной энергии в заданном направлении.
2. **Открытая линия передачи** - Линия передачи, поперечное сечение которой не имеет замкнутого проводящего контура, охватывающего область распространения электромагнитной энергии.
3. **Гибридная волна** - Электромагнитная волна, векторы электрического и магнитного полей которой имеют отличные от нуля поперечные и продольные составляющие.
4. **Критическая частота** - Наименьшая частота, при которой возможно распространение данного типа волны в линии передачи
5. **Вносимое ослабление** - десятикратного значение десятичного или половина натурального логарифма отношения мощности падающей волны на выходе при выключении из тракта некоторой его части к мощности падающей волны на том же выходе при включении этой части

ГОСТ 24375-80

1. **Радиосвязь** - электросвязь, осуществляемая посредством радиоволн.
2. **Космическая радиосвязь** - радиосвязь, в которой используется одна или несколько космических радиостанций или один или несколько отражающих спутников, или другие космические объект.
3. **Активная ретрансляция радиосигнала** - ретрансляция радиосигнала, включающая его приём, преобразование, усиление и излучение.

4. **Пассивная ретрансляция радиосигнала** - ретрансляция радиосигнала путём отражения или преломления, или рассеяния радиоволн в устройствах, телах или искусственных средах с целью изменения направления распространения радиоволн.
5. **Область тени** - зона на земной поверхности, окружающая передающую антенну и лежащая за пределами расстояния прямой видимости.

Задание №2

Условие.

Положительный заряд q равномерно распределён по объёму шара радиуса a . Определить напряжённость электрического поля, электрическую индукцию и скалярный потенциал внутри и вне шара. Диэлектрическая проницаемость материала ϵ_1 , окружающей среды ϵ_2 . Построить зависимости $E(r)$, $D(r)$, $\phi(r)$, указать характерные особенности графиков и причину их появления. Провести проверку граничных условий на границе раздела сред. Исходные данные: $a[\text{мм}] = 0,029$; $q[\text{Кл}] = 0,6$; $\epsilon_a = \epsilon_0 \epsilon_r$; $\epsilon_{r1} = 3,2$; $\epsilon_{r2} = 1$.

Решение.

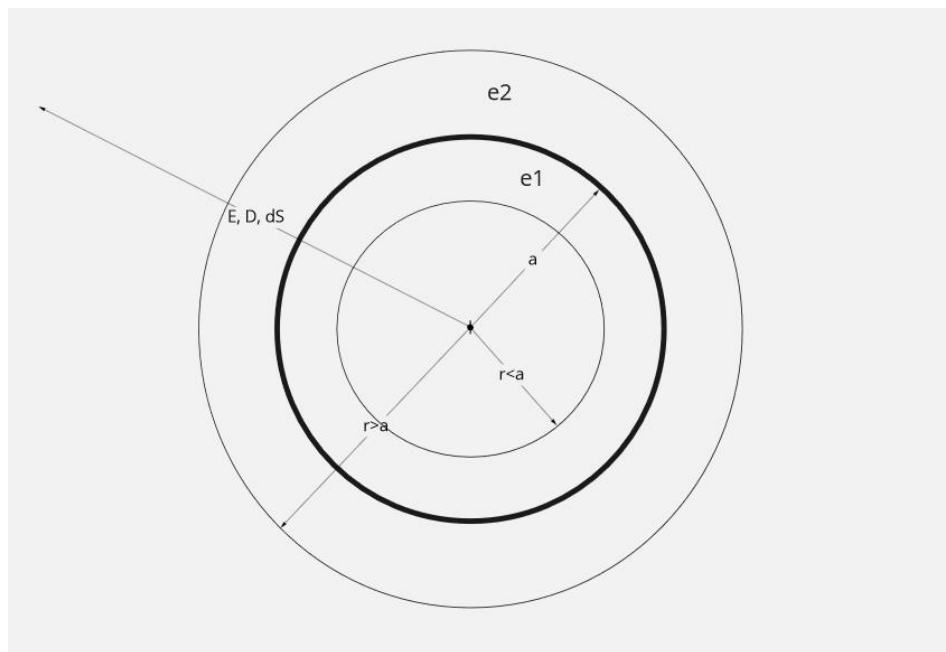


Рисунок 1 - Шар с зарядом q .

Для начала введём новую переменную R - радиус шара, так чтобы $R = a$. Так как у нас есть две разные среды, то для начала обозначим k в зависимости от r ,

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_2\epsilon_0} \text{ при } r > R, k = \frac{1}{4\pi\epsilon_1\epsilon_0} \text{ при } r < R.$$

$$k = 8,9918 \cdot 10^9 \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \text{ при } r > R, k = 2,8099 \cdot 10^9 \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \text{ при } r < R.$$

Дальше в решении будем учитывать просто k , который при построении графиков надо будет учесть, по зависимости, которая обозначена выше. Найдём для начала напряжённость электрического поля и скалярный потенциал внутри и вне шара. Применим теорему Гаусса. Выберем в качестве замкнутой шар радиуса $r > R$ (рис.). Очевидно, что напряжённость на поверхности этого шара будет одинакова по величине и направлена по радиусу. Тогда поток напряжённости через него будет

$$E4\pi r^2.$$

Согласно теореме Гаусса

$$E4\pi r^2 = 4\pi kq,$$

откуда следует

$$E(r) = k \frac{q}{r^2}.$$

Чтобы найти напряжённость электрического поля внутри шара, выберем в качестве замкнутой поверхности сферу радиуса $r < R$ с центром в центре шара. Из симметрии ясно, что напряжённость поля направлена по радиусу и одинакова по величине на всей поверхности сферы. Из теоремы Гаусса следует

$$E(r)4\pi r^2 = 4\pi kq(r),$$

где $q(r)$ – заряд внутри выбранной поверхности. Введём плотность заряда шара ρ . Тогда

$$q(r) = \rho \frac{4}{3}\pi r^3 \text{ и } E(r) = k \frac{q(r)}{r^2} = \frac{4}{3}k\rho\pi r.$$

Плотность заряда равна полному заряду, делённому на объём шара

$$\rho = \frac{3q}{4\pi R^3}.$$

Для напряжённости поля внутри шара получим

$$E = k \frac{q}{R^3} r.$$

И так подведём итог по напряжённость электрического поля внутри и вне шара

$$E = k \frac{q}{r^2} \text{ при } r > R, E = k \frac{q}{R^3} r \text{ при } r < R.$$

$$E = 8,9918 \cdot 10^9 \cdot \frac{0,6}{r^2} \frac{B}{м} \text{ при } r > R, E = 2,8099 \cdot 10^9 \cdot \frac{0,6}{0,029^3} r \frac{B}{м} \text{ при } r < R.$$

$$E = \frac{5,29508 \cdot 10^9}{r^2} \frac{B}{м} \text{ при } r > R, E = 6,912 \cdot 10^{13} \cdot r \frac{B}{м} \text{ при } r < R.$$

Теперь найдём электрическую индукцию

$$D = \varepsilon_0 E + P = \varepsilon_0 E + \kappa \varepsilon_0 E = \varepsilon_0 (1 + \kappa) E = \varepsilon_0 \varepsilon E$$

Тогда

$$D = \varepsilon_0 E \text{ при } r > R, D = \varepsilon_0 \varepsilon E \text{ при } r < R.$$

$$D = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot E \frac{Кл}{м^2} \text{ при } r > R, D = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3,2 \cdot E \frac{Кл}{м^2} \text{ при } r < R.$$

$$D = 4,686 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{1}{r^2} \frac{Кл}{м^2} \text{ при } r > R, D = 1,9574 \cdot 10^3 \cdot r \frac{Кл}{м^2} \text{ при } r < R.$$

Проверим граничные условия для векторов D

$$D_{n(1)} - D_{n(2)} = \kappa,$$

$$D_{n(1)} = D_{n(2)}, \text{ значит } \kappa = 0.$$

Проверим

$$D_{n(R)} = 8,85 \cdot 10^{12} \cdot 8,9918 \cdot 10^9 \cdot \frac{0,6}{0,029^2} \approx 56,77 \frac{Кл}{м^2},$$

$$D_{n(R)} = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3,2 \cdot 2,8099 \cdot 10^9 \cdot \frac{0,6}{0,029^2} \approx 56,77 \frac{Кл}{м^2}.$$

$$D_{n(1)} = D_{n(2)},$$

Значит выполняются граничные условия для тангенсальных составляющих. Осталось определить только потенциал внутри и вне шара. Потенциал и напряжённость связаны следующим соотношением

$$E = - \operatorname{grad} \varphi.$$

В сферической системе координат составляющие

$$E_\theta \text{ и } E_\varphi \text{ равны нулю, тогда } E = E_r = -\frac{\partial}{\partial r} \varphi \Rightarrow \int \partial \varphi = \int E_r \partial r.$$

Тогда для начала найдём потенциал вне шара при $r > R$ выразится в виде

$$\varphi(r) = - \int E = k \frac{q}{r^2} \partial r = k \frac{q}{r} + C_1,$$

Определим C_1

$$r \Rightarrow \infty, \varphi \Rightarrow 0, \text{ тогда } kq \frac{1}{\infty} = 0 \Rightarrow C_1 = 0.$$

Теперь найдём потенциал внутри шара $r < R$

$$\varphi(r) = - \int k \frac{qr}{R^3} \partial r = - k \frac{qr^2}{R^3} + C_2,$$

Определим C_2 , но для начала уточним k_1 и k_2

$$k_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_2\epsilon_0} \text{ при } r > R, k_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_1\epsilon_0} \text{ при } r < R.$$

$$r \Rightarrow R, \text{ тогда } - k_1 \frac{qR^2}{R^3} + C_2 = - k_1 \frac{q}{R} + C_2 = k_2 \frac{q}{R} \Rightarrow C_1 = \frac{q}{R} (k_2 + k_1).$$

$$C_1 = \frac{0,6}{0,029} (2,8099 + 8,9918) \cdot 10^9 = 1,279 \cdot 10^{11}.$$

И так подведём итог по потенциалу внутри и вне шара

$$\varphi(r) = k \frac{q}{r} \text{ при } r > R, \varphi(r) = - k \frac{qr^2}{R^3} + 1,279 \cdot 10^{11} \text{ при } r \leq R.$$

$$\varphi(r) = 8,9918 \cdot 10^9 \cdot \frac{0,6}{r} \text{ В при } r > R, \varphi(r) = -2,8099 \cdot 10^9 \cdot \frac{0,6 \cdot r^2}{0,029^3} + 1,279 \cdot 10^{11} \text{ В при } r \leq R.$$

$$\varphi(r) = \frac{54 \cdot 10^{10}}{r} \text{ В при } r > R, \varphi(r) = -6,912 \cdot 10^{13} \cdot r^2 + 1,279 \cdot 10^{11} \text{ В при } r \leq R.$$

Построим графики для полученных функций:

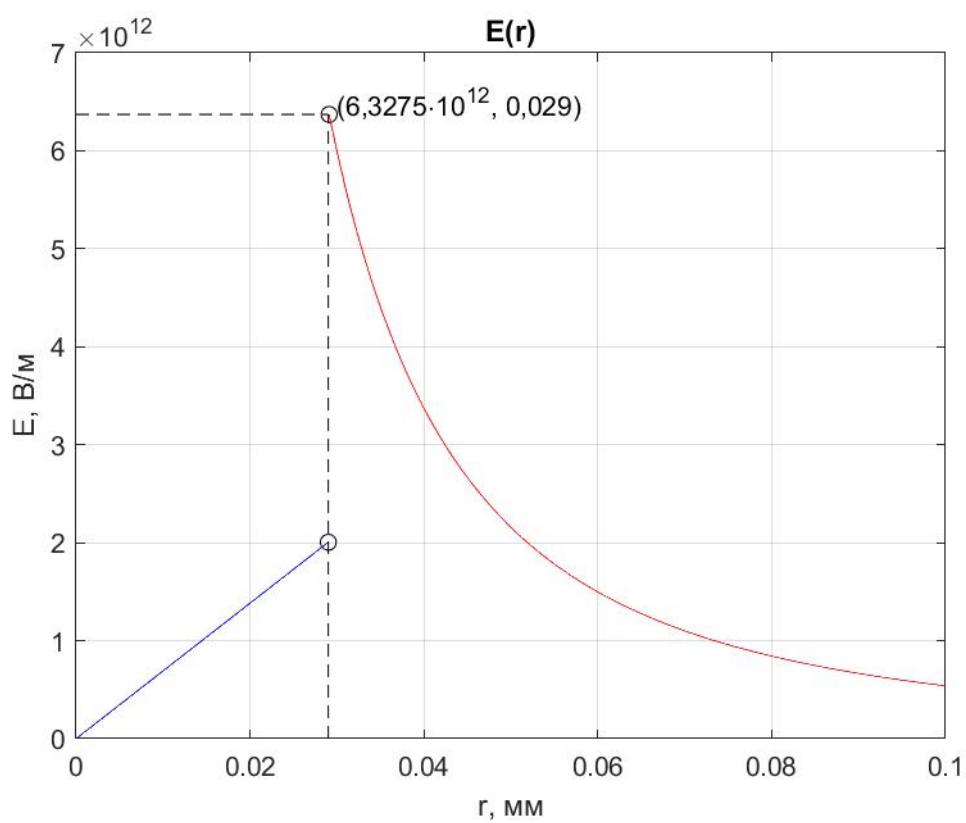


Рисунок 2 - Напряжённости $E(r)$.

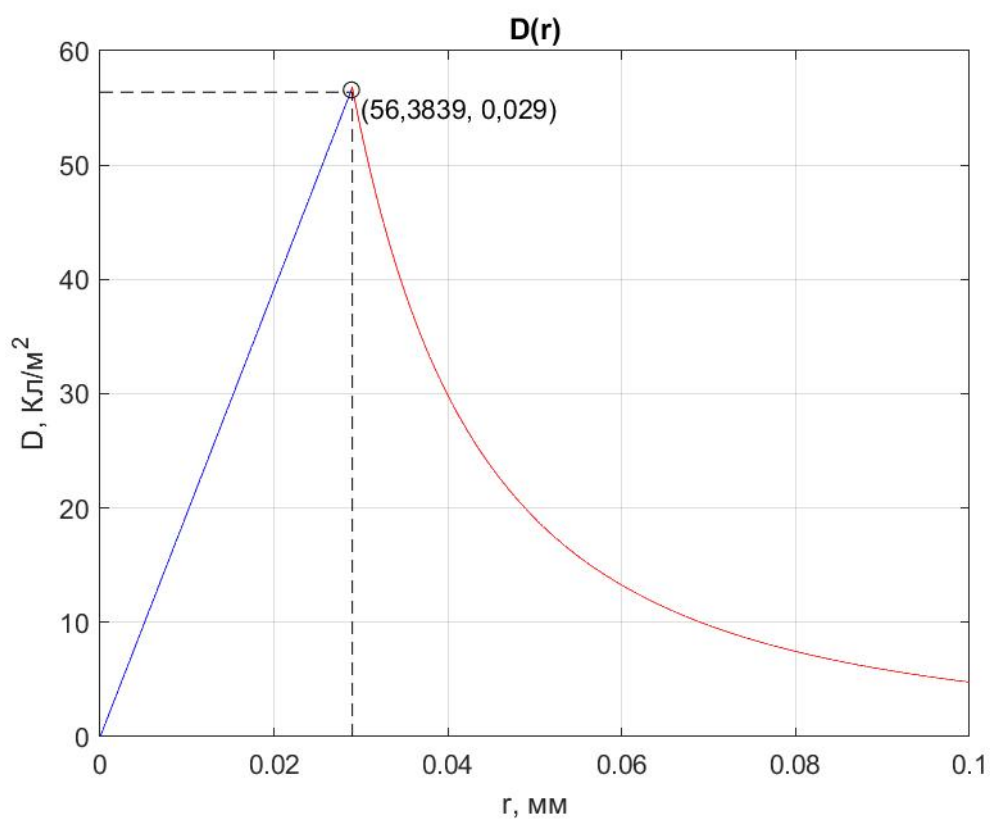


Рисунок 3 - Электрическая индукция $D(r)$.

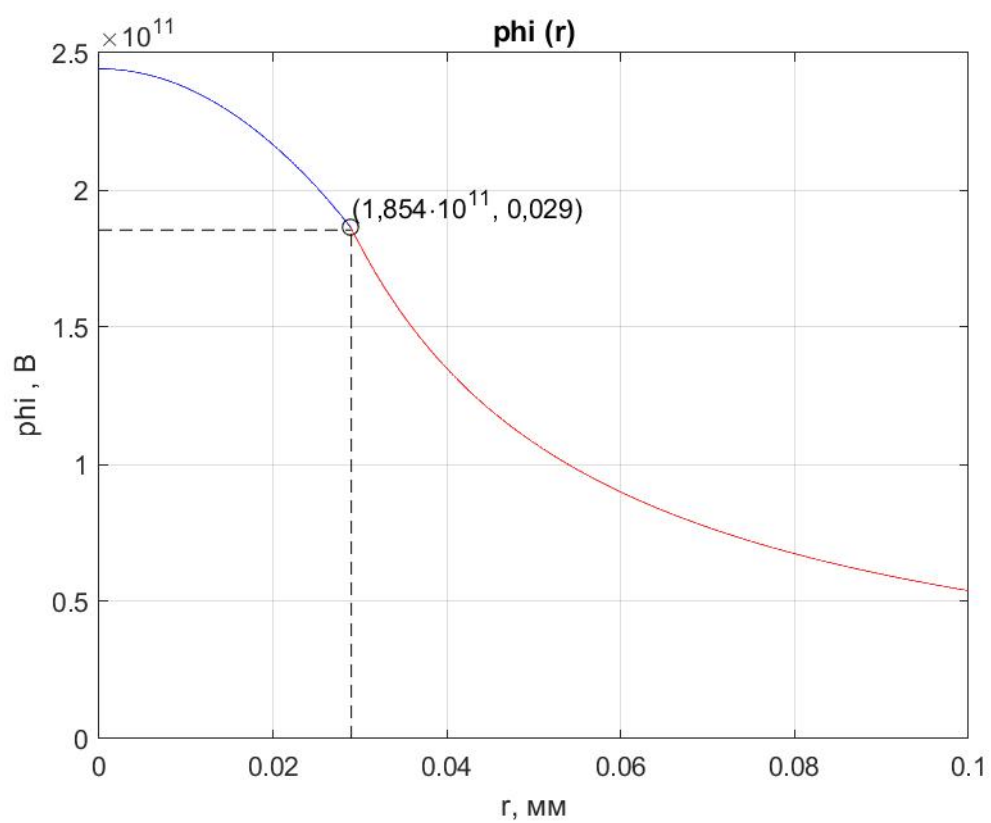


Рисунок 4 - Скалярный потенциал $\phi(r)$.

Задание № 3

Условие.

По бесконечно длинному цилиндрическому проводнику радиуса a протекает постоянный ток I , равномерно распределенный по площади поперечного сечения. Построить зависимости напряжённости и индукции магнитного поля $H(r)$ и $B(r)$, создаваемого этим током в однородной среде с $\mu_r = 1$. Исходные данные: $I[A] = 0,1 \cdot N + M$, $a[мм] = 2 + 0,1 \cdot N$.

Решение.

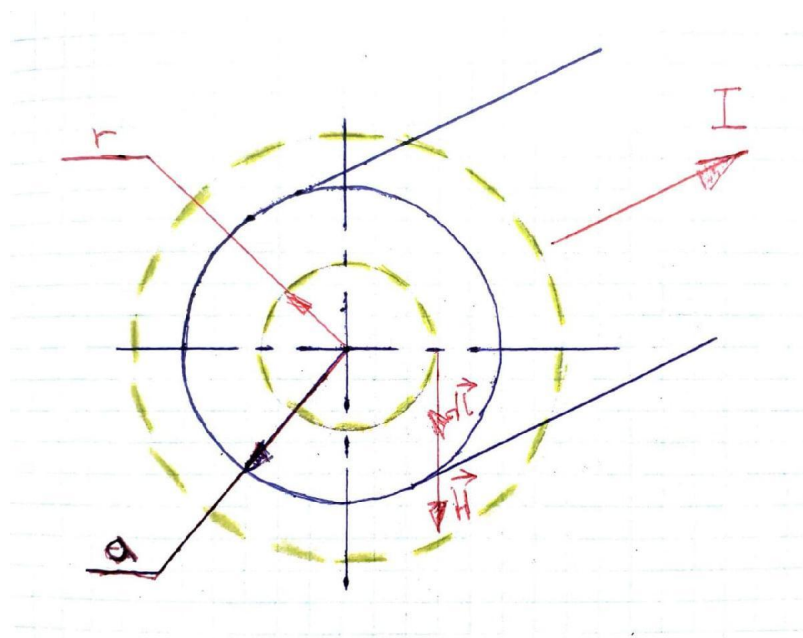


Рисунок 5 - Проводник.

Для начала введём новую переменную R - радиус проводника, так чтобы $R = a$. Учтём первое уравнение Максвелла

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S \left(\vec{j} + \frac{\partial}{\partial t} \vec{D} \right) d\vec{S},$$

Пусть по бесконечно длинному цилиндрическому проводу радиуса R протекает постоянный ток I . Возьмём окружность за контур L т.к. она обладает осевой симметрией (поле по модулю будет одинаковым). А так же центр совпадает с центром поперечного сечения в результате

$$H = const.$$

Так как \vec{H} направлен по касательной, то при выборе такого контура вектор \vec{H} и $d\vec{l}$ параллельны. Тогда из первого уравнения Максвелла следует,

$$\text{что } \vec{H} d\vec{l} = H dl \text{ и } \oint_L \vec{H} d\vec{l} = \oint_L H dl, \text{ тогда}$$

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \oint_L H dl = H(r) \oint_L dl = H(r) 2\pi r,$$

где $H(r)$ - не зависит от L . И так теперь мы имеем два случая:

$$\frac{\partial}{\partial t} D = 0$$

так как ток постоянный и поле соответственно тоже постоянно.

$$\int_S \vec{J} d\vec{S} = J dS, \text{ т. к. } \vec{J} \parallel d\vec{S}$$

то плотность тока считается постоянной, так как ток постоянный и распределен равномерно, то ток протекает перпендикулярно поперечному сечению провода. Тогда

$$J = \frac{I}{S(a)} = \frac{I}{\pi a^2}.$$

Для случая $1 \leq r \leq a$, тогда

$$\int_S \vec{J} d\vec{S} = J \int_S dS \frac{I}{\pi a^2} \Rightarrow \pi r^2 = \frac{I}{a^2} r^2,$$

тогда из первого уравнения Максвелла следует, что

$$H(r) 2\pi r = \frac{I}{a^2} r^2 \Rightarrow H(r) = \frac{I r}{2\pi a^2},$$

а так же, так как

$$\vec{B} = \mu(r) \vec{H},$$

то

$$B(r) = \frac{Ir\mu(r)}{2\pi a^2}.$$

Тогда для случая $2r \geq a$, будет

$$\int_S \vec{J} d\vec{S} = I,$$

тогда

$$H(r)2\pi r = I \implies H(r) = \frac{I}{2\pi r},$$

а так же, так как

$$\vec{B} = \mu(r)\vec{H}, \text{ то}$$

$$B(r) = \frac{I\mu(r)}{2\pi r}.$$

Проверим граничные условия для векторов \vec{H}

$$H_{\tau(1)} - H_{\tau(2)} = J_{\text{пов}},$$

$$H_{\tau(1)} = H_{\tau(2)}, \text{ при } J_{\text{пов}} = 0.$$

Проверим

$$H_{\tau(R)} = \frac{6,2}{2\pi \cdot 3,2 \cdot 10^{-3}} \approx 310 \frac{\text{А}}{\text{м}},$$

$$H_{\tau(R)} = \frac{6,2}{2\pi \cdot 3,2 \cdot 10^{-3}} \approx 310 \frac{\text{А}}{\text{м}}.$$

$$H_{\tau(1)} = H_{\tau(2)},$$

Значит выполняются граничные условия для тангенциальных составляющих. Итак подведём итог:

$$H = \frac{I}{2\pi r} \text{ при } r > R, H = \frac{Ir}{2\pi a^2} \text{ при } r < R,$$

$$H = \frac{6,2}{2\pi r} \frac{\text{А}}{\text{м}} \text{ при } r > R, H = \frac{6,2 \cdot r}{2\pi \cdot 3,2^2 \cdot 10^{-6}} \frac{\text{А}}{\text{м}} \text{ при } r < R.$$

$$H = 0,9867 \cdot r \frac{\text{А}}{\text{м}} \text{ при } r > R, H = 96363 \cdot r \frac{\text{А}}{\text{м}} \text{ при } r < R.$$

И

$$B = \frac{I\mu(r)}{2\pi r} \text{ при } r > R, B = \frac{Ir\mu(r)}{2\pi a^2} \text{ при } r < R,$$

отмети, что

$$\mu(r) = \mu_r \cdot \mu_0, \text{ где } \mu_r = 1,$$

по условию, тогда

$$B = \frac{I\mu_0}{2\pi \cdot r} \text{ при } r > R, B = \frac{I\mu_0 \cdot r}{2\pi a^2} \text{ при } r < R,$$

$$B = \frac{6,2 \cdot \mu_0}{2\pi \cdot r} \text{ Тл при } r > R, B = \frac{6,2 \cdot r \cdot \mu_0}{2\pi \cdot 3,2^2 \cdot 10^{-6}} \text{ Тл при } r < R.$$

$$B = 1,23 \cdot 10^{-6} \cdot r \text{ Тл при } r > R, B = 0,12 \cdot r \text{ Тл при } r < R.$$

Построим графики для полученных функций:

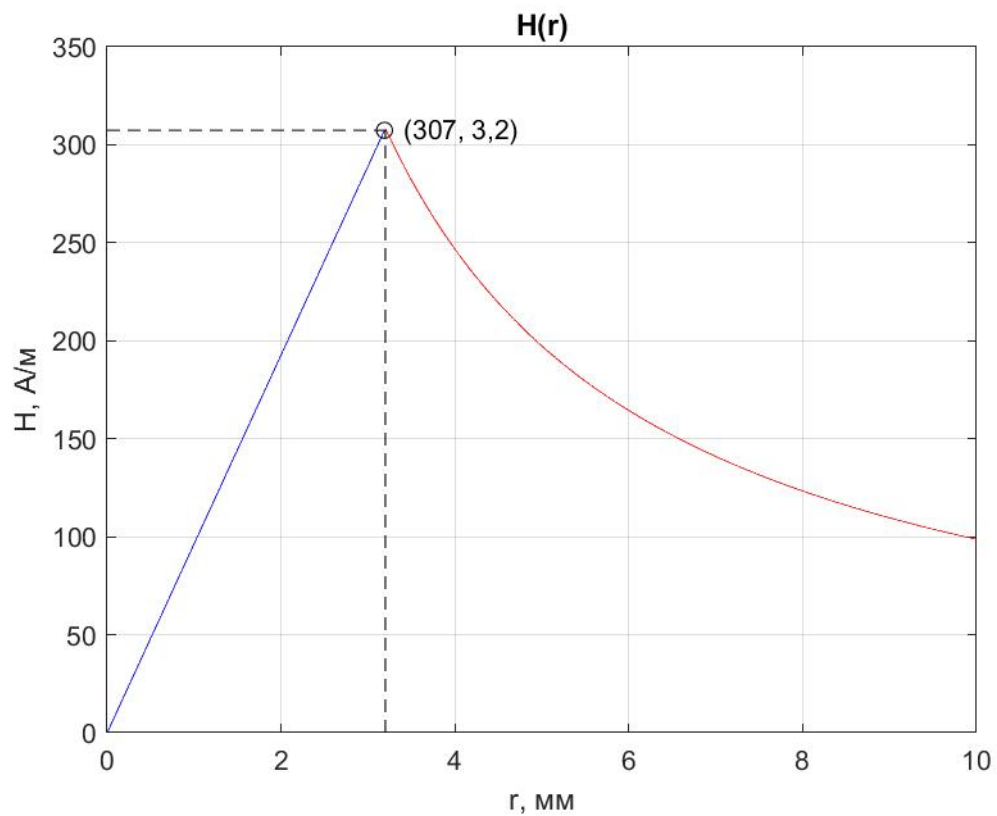


Рисунок 6 - Напряжённость магнитного поля $H(r)$.

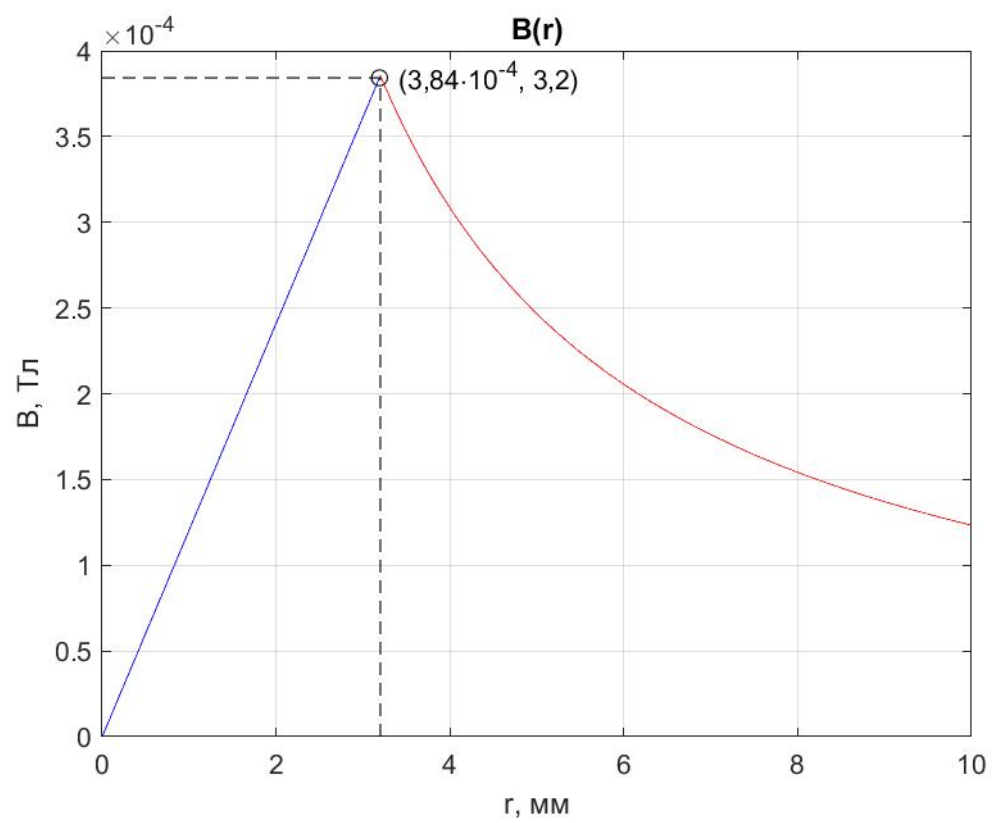


Рисунок 7 - Индукция магнитного поля $B(r)$.

Задание № 4

Условие.

Плоская монохроматическая линейно поляризованная электромагнитная волна распространяется в неограниченном пространстве без потерь. Диэлектрическая проницаемость среды – ϵ_a , магнитная проницаемость среды – μ_a , амплитуда напряжённости электрического поля – E_m , частота – f . Записать выражения для мгновенных значений напряжённостей электрического и магнитного полей плоской электромагнитной волны. Определить основные параметры волны. Исходные данные: $\epsilon_a = \epsilon_0 \epsilon_r$; $\epsilon_r = 2 + N/10$; $\mu_a = \mu_0 \mu_r$; $\mu_r = 1 + N/10$; $E_m [\text{В/м}] = 50 + N$; $f [\text{Гц}] = (M + N/20) \cdot 10^9$.

Решение.

Для начала совместим одну из осей координат с вектором E , а направление распространения волны с осью z . Тогда, рассмотрим плоскую электромагнитную волну с линейной поляризацией, которая распространяется в бесконечной и однородной среде. В этом случае для плоской электромагнитной волны имеем:

$$\vec{E}(t, z) = E_m \cos(\omega t - \beta z) \vec{x}_0,$$

где мы можем определить

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 5,6 \cdot 10^9 = 3,52 \cdot 10^{10} \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Где f - это частота в Герцах. Определим другой коэффициент

$$\vec{k} = \beta - i\alpha,$$

так как среда без потерь, то

$$\alpha = 0 \frac{1}{\text{м}}.$$

Тогда

$$k = \omega \sqrt{\varepsilon_a \mu_a} = \beta = 3,52 \cdot 10^{10} \cdot \sqrt{2,832 \cdot 10^{-11} \cdot 2,75 \cdot 10^{-6}} = 310,51 \frac{1}{\text{м}}.$$

Подведём итог по вектору E:

$$\vec{E}(t, z) = 62 \cdot \cos(3,52 \cdot 10^{10} \cdot t - 310,51 \cdot z) \vec{x}_0 \frac{B}{\text{м}}.$$

Найдём теперь напряжённость магнитного поля

$$\vec{H}(t, z) = H_m \cos(\omega t - \beta z) \vec{y}_0.$$

В уравнении

$$H_m = \frac{E_m}{Z_c},$$

где Z_c - это коэффициент пропорциональности между составляющими электрического и магнитного поля равен характеристическому (волновому) сопротивлению среды

$$Z_c = \frac{\omega \mu_a}{k} = \frac{\omega \mu_a}{\omega \sqrt{\varepsilon_a \mu_a}} = \sqrt{\frac{\mu_0 \mu}{\varepsilon_0 \varepsilon}} = \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}} = \sqrt{\frac{2,832 \cdot 10^{-11}}{2,75 \cdot 10^{-6}}} = 311,616 \text{ Ом}.$$

Откуда

$$H_m = \frac{62}{311,616} = 0,199 \frac{A}{\text{м}}.$$

Подведём итог по вектору H:

$$\vec{H}(t, z) = 0,199 \cdot \cos(3,52 \cdot 10^{10} \cdot t - 310,51 \cdot z) \vec{y}_0 \frac{A}{\text{м}}.$$

Найдём другие характеристики волны: период, длину волны и фазовой скоростью. Период находится из формулы

$$T = \frac{1}{\nu} = \frac{1}{5,6 \cdot 10^9} = 1,8 \cdot 10^{-10} \text{ с}.$$

Длина волны следует из

$$k = \omega \sqrt{\varepsilon_a \mu_a} = \frac{2\pi}{\lambda} \implies \lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi}{310,51} = 0,02 \text{ м},$$

Рассмотрим основные характеристики плоской электромагнитной волны на примере составляющей электрического поля волны:

$$\vec{E}(z, t) = E_m \cos(\omega t - kz),$$

в нем

$$(\omega t - kz),$$

это есть фаза волны, которая зависит от времени t и от пространственной координаты z . Геометрическое место точек, в которых электромагнитное поле имеет одинаковую фазу, называется фазовым или волновым фронтом волны. Для плоской электромагнитной волны фронт волны представляет собой плоскость $z = \text{const}$. Скорость перемещения фазового фронта называется фазовой скоростью V_ϕ волны. Определим V_ϕ плоской электромагнитной волны, для чего зафиксируем фазу поля и продифференцировав её по времени, получим

$$\omega - k \frac{d}{dt} z = 0.$$

Тогда отсюда можно получить

$$V_\phi = \frac{d}{dt} z = \frac{\omega}{k} = \frac{\omega}{\omega \sqrt{\epsilon_a \mu_a}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \sqrt{\mu \epsilon}} = \frac{c}{\sqrt{\mu \epsilon}},$$

где

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}},$$

это скорость света. Найдём V_ϕ

$$V_\phi = \frac{3 \cdot 10^8}{\sqrt{3,2 \cdot 2,2}} = 1,13 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Задание № 5

Условие.

В диэлектрике с параметрами ϵ_a , μ_a , вдоль оси z распространяется электромагнитная волна, имеющая линейную поляризацию по x и частоту f . Напряжённость электрического поля в точке $z = 0$ в момент времени $t = 0$ равна E_m . Записать выражения для мгновенных значений напряжённостей электрического и магнитного полей и определить расстояние, на котором амплитуда напряжённости электрического поля уменьшится в S раз относительно начального значения. Исходные данные: $\epsilon_a = \epsilon_0 \epsilon_r$; $\epsilon_r = (3+N)/2$; $\mu_a = \mu_0 \mu_r$; $\mu_r = M+N/2$; $E_m[\text{В/м}] = M+0,05 \cdot N$; $f [\text{МГц}] = N/10$; $S = M \cdot 10^2$, $\sigma [\text{См/м}] = N \cdot 10^{-3}$.

Решение.

Рассмотрим плоскую электромагнитную волну с линейной поляризацией, которая распространяется в среде с потерями. В этом случае для плоской электромагнитной волны имеем:

$$\vec{E}(t, z) = E_m \cos(\omega t - \beta z),$$

где мы можем определить

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 12 \cdot 10^5 = 7,5398 \cdot 10^6 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Где f - это частота в Герцах. Определим другой коэффициент

$$\tilde{\epsilon}_a = \epsilon'_a - i\epsilon''_a = \epsilon_a - i\frac{\sigma}{\omega},$$

$$\tilde{\mu}_a = \mu'_a - i\mu''_a = \mu_a,$$

По условию. Тогда

$$k = \omega \sqrt{\tilde{\epsilon}_a \tilde{\mu}_a} = \omega \sqrt{\mu_a \left(\epsilon_a - i\frac{\sigma}{\omega} \right)},$$

$$k = 7,5398 \cdot 10^6 \cdot \sqrt{1,375 \cdot 10^{-5} \cdot \left(6,6375 \cdot 10^{-11} - i\frac{0,012}{7,5398 \cdot 10^6} \right)} = 0,8053 - 0,7724i \frac{1}{\text{м}}.$$

Так как

$$\dot{k} = \beta - i\alpha,$$

То тогда из это следует, что

$$\beta = \operatorname{Re}(\dot{k}) = 0,8053 \frac{1}{\text{м}} \text{ и } \alpha = \operatorname{Im}(\dot{k}) = 0,7724 \frac{1}{\text{м}}.$$

Выведем вектор E

$$\dot{E} = E_m e^{i(\omega t - \dot{k}z)} = E_m e^{-\alpha z} e^{i(\omega t - \beta z)} \implies$$

$$\vec{E}(t, z) = E_m e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z) \vec{x}_0,$$

Подведём итог по вектору E:

$$\vec{E}(t, z) = 5,6 \cdot e^{-0,7724 \cdot z} \cdot \cos(7,5398 \cdot 10^6 \cdot t - 0,8053 \cdot z) \vec{x}_0 \frac{B}{\text{м}}.$$

Найдём теперь напряжённость магнитного поля

$$\dot{H} = \dot{H}_m e^{i(\omega t - \dot{k}z)} \vec{y}_0 = |H_m| e^{-\alpha z} e^{i(-\varphi)} e^{i(\omega t - \beta z)} \vec{y}_0 = |H_m| e^{-\alpha z} e^{i(\omega t - \beta z - \varphi)} \vec{y}_0,$$

Отсюда получаем

$$\vec{H}(t, z) = \operatorname{Re}(\dot{H}) = |H_m| e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z - \varphi) \vec{y}_0.$$

В уравнении

$$\dot{H}_m = \frac{E_m}{Z_c},$$

где Z_c - это коэффициент пропорциональности между составляющими электрического и магнитного поля равен характеристическому (волновому) сопротивлению среды

$$Z_c = \sqrt{\frac{\tilde{\mu}_a}{\tilde{\epsilon}_a}} = \sqrt{\frac{\mu_a}{\epsilon_a - i \frac{\sigma}{\omega}}},$$

$$\dot{Z}_c = \sqrt{\frac{1,375 \cdot 10^{-5}}{6,6375 \cdot 10^{-11} - i \frac{0,012}{7,5398 \cdot 10^6}}} = 67,05 + 64,31i \text{ Ом.}$$

Откуда

$$\dot{H}_m = \frac{5,6}{67,05 + 64,31i} = 0,0435 - 0,0417i \frac{\text{А}}{\text{м}}.$$

Разложим

$$\dot{H}_m = |H_m| e^{i\varphi},$$

где

$$|H_m| = \sqrt{\text{Re}(\dot{H}_m)^2 + \text{Im}(\dot{H}_m)^2} = \sqrt{0,0435^2 + 0,0417^2} = 0,0603 \frac{\text{А}}{\text{м}},$$

и

$$\varphi = \arctg\left(\frac{\text{Im}(\dot{H}_m)}{\text{Re}(\dot{H}_m)}\right) = \arctg\left(\frac{-0,0417}{0,0435}\right) = -0,76 \frac{\text{рад}}{c}.$$

$$\vec{H}(t, z) = |H_m| e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z - \varphi).$$

Подведём итог по вектору H:

$$\vec{H}(t, z) = 0,0603 \cdot e^{-0,7724 \cdot z} \cdot \cos(7,5398 \cdot 10^6 \cdot t - 0,8053 \cdot z - 0,76) \frac{\text{А}}{\text{м}}.$$

Найдём расстояние, на котором амплитуда напряжённости электрического поля уменьшится в S раз относительно начального значения

$$E_m(z) = E_m e^{-\alpha z} = \frac{E_m}{S} \Rightarrow e^{-\alpha z} = \frac{1}{S} \Rightarrow e^{\alpha z} = S \Rightarrow \ln(e^{\alpha z}) = \alpha z = \ln(S) \Rightarrow$$

$$z = \frac{\ln(S)}{\alpha} = \frac{\ln(510)}{0,7724} = 8,0713 \text{ м.}$$