

Министерство образования Российской Федерации  
Тамбовский государственный технический университет  
Межрегиональный центр повышения квалификации

Кафедра  
электрооборудования

# Курсовая работа

На тему

«Теория электромагнитного поля. Длинные линии.»

Выполнил Дегтярев Л. И.  
Проверил Иванов В. М.

Тамбов 2013

## Содержание

Задание 2.1.....	3
Задание 2.2.....	5
Задание 2.3.....	10
Задание 2.4.....	12
Задание 2.5.....	21
Задание 2.6.....	22
Литература .....	23

### Задание 2.1

Дано  $U=10000$  В,  $Q=2.4 \cdot 10^{-5}$  Кл,  $R_1=0.182$  м,  $R_2=0.016$  м,  $d=0.18$  м,  $\varepsilon=2.6$ ,  $\mu=1$ ,  $L=500000$  м.

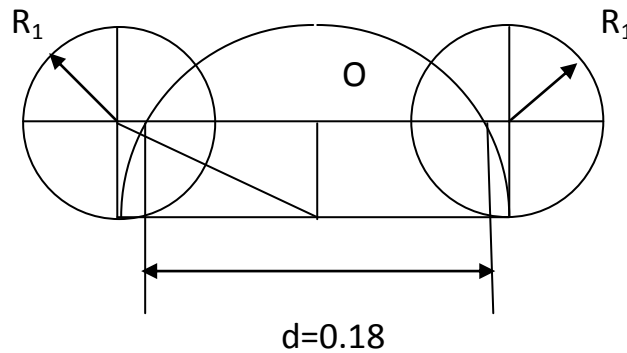
### Решение

Определим поверхностную плотность заряда:

$$q_B = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot L} = \frac{2.4 \cdot 10^{-5}}{8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 2 \cdot 3.14 \cdot 500000 \cdot 0.182} = 4.745 \frac{\text{Кл}}{\text{м}}$$

Определим емкость между проводами:

$$C = \frac{\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot L}{\ln \frac{d}{R_2}} = \frac{3.14 \cdot 2.6 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12}}{\ln \frac{0.18}{0.016}} = 1.5 \cdot 10^{-5} \text{ Ф.}$$



$$R = \sqrt{\frac{d^2}{4} + R_1^2} = 0.203 \text{ м.}$$

$$a_1 = b_1 = R_1 - R + \frac{d}{2} = 0.069 \text{ м.}$$

$$a_2 = b_2 = d - a_1 = d - b_1 = 0.111 \text{ м.}$$

$$U = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot L} \cdot \ln \left( \frac{a_2 \cdot b_2}{a_1 \cdot b_1} \right) = \frac{2.4 \cdot 10^{-5} \cdot \ln \left( \frac{111}{69} \right)}{3.14 \cdot 2.6 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 500000} = \frac{2.4 \cdot 10^{-5} \cdot 0.4754}{3.14 \cdot 2.6 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 500000} = 0.316 \text{ В.}$$

Индуктивность:

$$L = \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot \ln \frac{d}{R_2}}{\pi} = \frac{3.14 \cdot 1.26 \cdot 10^{-6} \cdot \ln \left( \frac{0.18}{0.016} \right)}{3.14} = 3.4 \cdot 10^{-6} \text{ Гн.}$$

Расстояние между проводами:

$$\Delta R = d + 2 \cdot R_1 - (a_1 + b_1) = d + 2 \cdot R_1 - 2 \cdot a_1 = 0.406 \text{ м.}$$

Наибольшая напряженность вблизи поверхности любого из проводов:

$$E_{\text{наиб}} = U \cdot \frac{\frac{1}{\Delta R} + \frac{1}{R_1}}{2 \cdot \ln \left( \frac{\Delta R}{R_1} \right)} = \frac{0.316 \cdot \left( \frac{1}{0.182} + \frac{1}{0.406} \right)}{2 \cdot \ln \left( \frac{0.406}{0.182} \right)} = 1.568 \frac{\text{В}}{\text{м.}}$$

$$E_{\text{наиб}} = \frac{Q \cdot \left( \frac{1}{a_2} + \frac{1}{d - a_2} \right)}{2 \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \pi \cdot L} = \frac{2.4 \cdot 10^{-5} \cdot \left( \frac{1}{0.069} + \frac{1}{0.111} \right)}{2 \cdot 2.6 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 3.14 \cdot 500000} = 296.43 \frac{\text{В}}{\text{м.}}$$

Получим некоторые данные для провода толщиной  $R_2=0.016$  м:

$$R = \sqrt{\frac{d^2}{4} + R_2^2} = \sqrt{0.09^2 + 0.016^2} = 0.0914 \text{ м}$$

$$a_1 = b_1 = R_1 - R + \frac{d}{2} = 0.09 + 0.016 - 0.09141 = 0.0019 \text{ м}$$

$$a_2 = b_2 = d - a_1 = d - b_1 = 0.18 - 0.0019 = 0.1781 \text{ м}$$

$$U = \frac{Q}{\pi \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot L} \cdot \ln\left(\frac{a_2}{a_1}\right) = \frac{2.4 \cdot 10^{-5} \cdot \ln\left(\frac{1781}{19}\right)}{3.14 \cdot 2.6 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 500000} = \frac{2.4 \cdot 10^{-5} \cdot 4.54}{3.14 \cdot 2.6 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 500000} = 3.016$$

В

Расстояние между проводами:

$$\Delta R = d + 2 \cdot R_2 - (a_1 + b_1) = d + 2 \cdot R_1 - 2 \cdot a_1 = 0.2101 \text{ м.}$$

Наибольшая напряженность вблизи поверхности любого из проводов:

$$E_{\text{наиб}} = U \cdot \frac{\frac{1}{\Delta R} + \frac{1}{R_2}}{2 \cdot \ln\left(\frac{\Delta R}{R_2}\right)} = \frac{0.316 \cdot \left(\frac{1}{0.016} + \frac{1}{0.2101}\right)}{2 \cdot \ln\left(\frac{0.2101}{0.016}\right)} = 39 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

$$E_{\text{наиб}} = \frac{Q \cdot \left(\frac{1}{a_2} + \frac{1}{d - a_2}\right)}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot L} = \frac{2.4 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{1}{0.1781} + \frac{1}{0.0019}\right)}{2 \cdot 2.6 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 3.14 \cdot 500000} = 28092.25 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

## Задание 2.2

Дано:  $U=10000$  В,  $Q=2.4 \cdot 10^{-6}$  Кл,  $R_1=0.182$  м,  $R_2=0.016$  м,  $d=0.18$  м,  $\varepsilon=2,6$ .

Определим зависимость напряжения от радиуса:

$$E = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot R \cdot L}$$

Определим  $C$  для определения  $q$ :

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 2.6 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12}}{\ln\left(\frac{0.182}{0.016}\right)} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 2.6 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12}}{2.4314} = 5.95 \cdot 10^{-11} \text{ Ф.}$$

$$q = C \cdot U = 5.95 \cdot 10^{-11} \cdot 10000 = 5.95 \cdot 10^{-7} \text{ Ф.}$$

Найдем зависимость:

$$E = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot L \cdot R} = \frac{5.95 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 2.6 \cdot 3.14 \cdot 500000 \cdot R} = \frac{0.00822}{R} \frac{\text{В}}{\text{м.}}$$

Составим таблицу значений  $R$  и  $E$ :

R	0.014	0.05	0.1	0.15	0.2
E	0.588	0.165	0.082	0.055	0.041

Определим зависимость  $\varphi=f(R)$ :

$$\varphi = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{1}{R_1}\right).$$

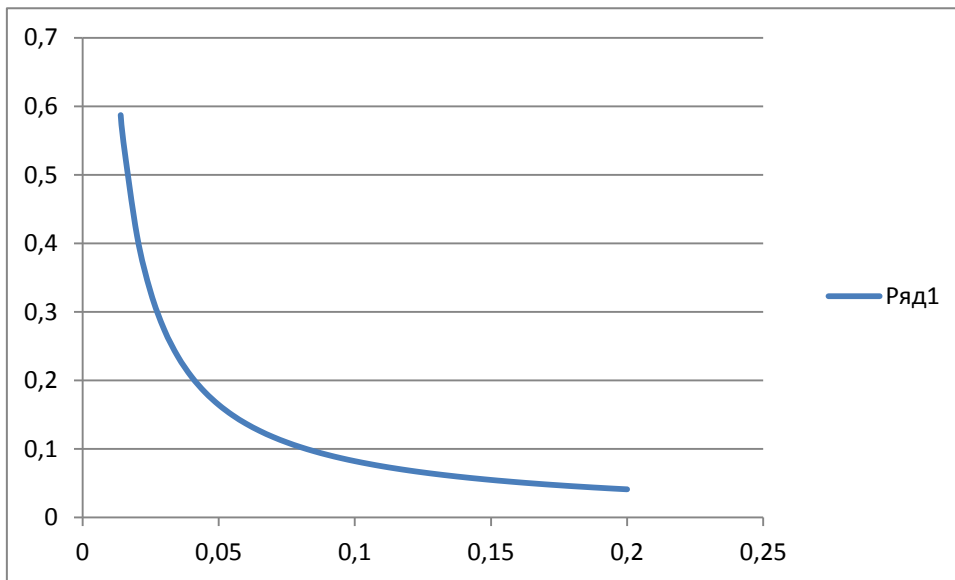
Найдем  $C$  из условия  $R_1=R_2=0.182$ ,  $\varphi=0$ :

$$C = \varphi \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} \cdot \ln\left(\frac{1}{R_1}\right) = 0 - \frac{2.4 \cdot 10^{-5} \cdot 1.7}{2 \cdot 3.14 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12}} = -283000.$$

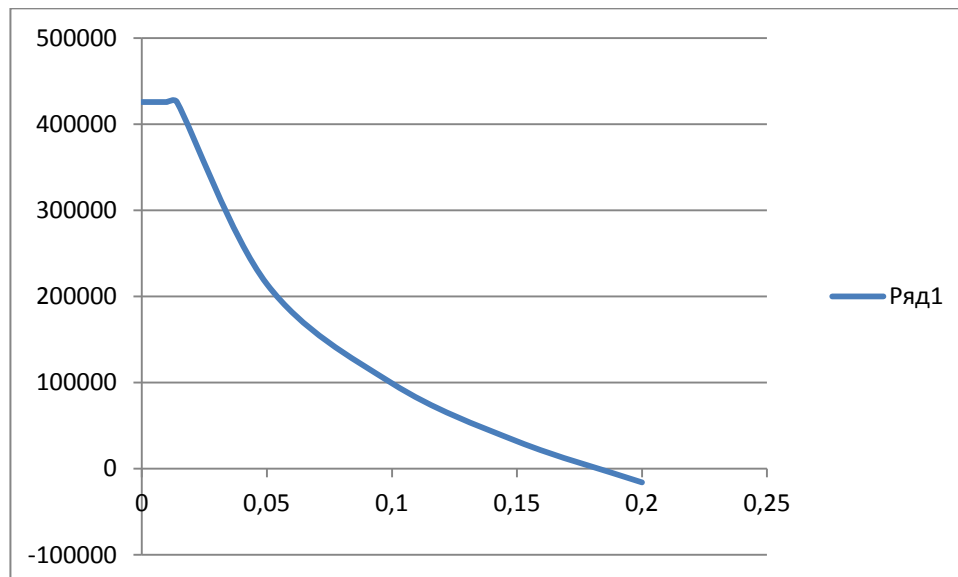
$$K = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0} = \frac{2.4 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 3.14 \cdot 8.85 \cdot 10^{-12}} = 166000.$$

Составим таблицу значений  $R$  и  $\varphi$ :

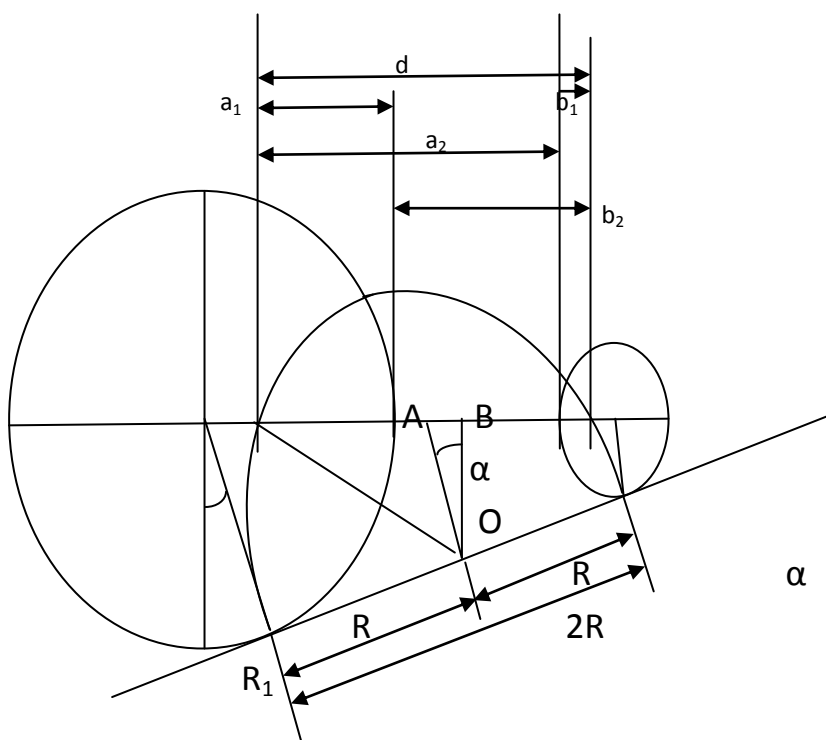
R	0.014	0.05	0.1	0.15	0.2
$\Phi$	425000	214500	99500	32100	0



Зависимость напряженности от расстояния.  $E=f(R)$ .



Зависимость потенциала от расстояния.  $\varphi = f(R)$ .



Найдем выражения для  $(a_1-b_1)$  и  $(a_1+b_1)$ :

От центра первой окружности до ближайшего пересечения прямой с полуокружностью:  $=R_1-a_1$ .

От центра второй окружности до ближайшего пересечения прямой с полуокружностью:  $=R_2-b_1$ .

От центра первой окружности до т. В:  $=R_1-a_1+\frac{d}{2}$ .

От центра второй окружности до т. В:  $=R_2-b_1+\frac{d}{2}$ .

Так как  $R=R$ , по теореме Фалеса расстояния от точки А до центров окружностей одинаково. Они равны следующим выражениям:

$$R_1-a_1+\frac{d}{2}-h*\operatorname{tg}\alpha=R_2-b_1+\frac{d}{2}+h*\operatorname{tg}\alpha.$$

$$a_1-b_1=R_1-R_2-2*h*\operatorname{tg}\alpha.$$

Для  $(a_1+b_1)$  соотношение ищется совсем легко:

$$\sin\alpha=\frac{R_1-R_2}{R_1+R_2+d-(a_1+b_1)}.$$

$$R_1+R_2+d-(a_1+b_1)=\frac{R_1-R_2}{\sin\alpha}.$$

$$a_1+b_1=R_1+R_2+d-\frac{R_1-R_2}{\sin\alpha}.$$

Угол же находится по теореме Пифагора:

$$\frac{d^2}{4}+h^2=R^2.$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{R_1 - R_2}{2 * R}.$$

$$R = \frac{R_1 - R_2}{2 * \operatorname{tg} \alpha} = \frac{(R_1 - R_2) * \cos \alpha}{2 * \sin \alpha}.$$

$$\text{Пусть } t = \sin^2 \alpha. \text{ Тогда } R^2 = \frac{(R_1 - R_2)^2 * (1 - t)}{4 * t}.$$

$$h = \frac{(R_1 + R_2) * \cos \alpha}{2}.$$

$$h = \frac{(R_1 + R_2)^2 * \cos^2 \alpha}{4} = \frac{(R_1 + R_2)^2 * (1 - t)}{4}.$$

Составим и решим уравнение:

$$\frac{d^2}{4} + \frac{(R_1 + R_2)^2 * (1 - t)}{4} = \frac{(R_1 - R_2)^2 * (1 - t)}{4 * t}.$$

$$0,9^2 + 0,99^2 * (1 - t) = \frac{0,83^2 * (1 - t)}{t}.$$

С помощью Mathcad 14.0, мы получаем:

$$t = \sin^2 \alpha = 0,318. \sin \alpha = 0,5639. \operatorname{tg} \alpha = 0,6828.$$

Остается посчитать:

$$a_1 - b_1 = R_1 - R_2 - 2 * h * \operatorname{tg} \alpha = R_1 - R_2 - 2 * \frac{R_1 - R_2}{2} * \cos \alpha * \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = R_1 - R_2 - (R_1 - R_2) *$$

$$\sin \alpha = 0,166 - 0,198 * 0,5639 = 0,05434.$$

$$a_1 + b_1 = R_1 + R_2 + d \cdot \frac{R_1 - R_2}{\sin \alpha} = 0,378 - \frac{0,166}{0,5639} = 0,0836.$$

Имеем систему:

$$\begin{cases} a_1 - b_1 = 0,138, & (1) \\ a_1 + b_1 = 0,029; & (2) \end{cases}$$

Складываем (1) и (2) вычитаем (1) из (2):

$$\begin{cases} 2 * a_1 = 0,137, \\ 2 * b_1 = 0,0293; \end{cases}$$

Далее делим обе части уравнений на 2 и получаем нужный ответ:

$$\begin{cases} a_1 = 0,0689, \\ b_1 = 0,01464. \end{cases}$$



$$b_2 = d - a_1 = 0.18 - 0.689 = 0.111$$

$$a_2 = d - b_1 = 0.18 - 0.0146 = 0.165$$

Итак, имеем:

$$A_1 = 0.0689$$

$$B_1 = 0.014$$

$$A_2 = 0.165$$

$$B_2 = 0.111$$

Определим напряжение между проводами:

$$U = \frac{Q}{2\pi\epsilon\epsilon_0 L} \ln\left(\frac{a_2 - b_1}{a_1 b_2}\right) = 0.47 \text{ В.}$$

$$\varphi_1 = \frac{Q \ln\left(\frac{b_1}{a_1}\right)}{2\pi\epsilon\epsilon_0 L} = 0.51 \text{ В.}$$

$$\varphi_2 = \frac{Q \ln\left(\frac{b_2}{a_2}\right)}{2\pi\epsilon\epsilon_0 L} = 0.13 \text{ В.}$$

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = 0.38 \text{ В.}$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0 L}{\ln\left(\frac{a_2 - b_1}{a_1 b_2}\right)} = 2.42 \cdot 10^{-5} \text{ Ф.}$$

Расстояние между проводами:

$$\Delta R = d + R_1 + R_2 - (a_1 + b_1) = 0.294 \text{ м.}$$

Наибольшая напряженность вблизи поверхности любого из проводов:

$$E_{\text{наиб}1} = U * \frac{\frac{1}{\Delta R} + \frac{1}{R_1}}{2 \ln\left(\frac{\Delta R}{R_1}\right)} = \frac{0.47 * \left(\frac{1}{0.294} + \frac{1}{0.182}\right)}{2 \ln\left(\frac{0.294}{0.182}\right)} = 4.36 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

$$E_{\text{наиб}2} = U * \frac{\frac{1}{\Delta R} + \frac{1}{R_2}}{2 \ln\left(\frac{\Delta R}{R_2}\right)} = \frac{0.47 * \left(\frac{1}{0.294} + \frac{1}{0.016}\right)}{2 \ln\left(\frac{0.294}{0.016}\right)} = 5.32 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

$$E_{\text{наиб}} = \frac{Q * \left(\frac{1}{a_2} + \frac{1}{d - a_2}\right)}{2\pi\epsilon\epsilon_0 L} = \frac{2.4 \cdot 10^{-5} * \left(\frac{1}{0.165} + \frac{1}{0.014}\right)}{2 * 2.6 * 8.85 \cdot 10^{-12} * 3.14 * 500000} = 25.74 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

$$E_{\text{наиб}} = \frac{Q * \left(\frac{1}{a_2} + \frac{1}{d - a_2}\right)}{\ln\left(\frac{a_2 b_1}{a_1 b_2}\right)} = \frac{2.4 \cdot 10^{-5} * \left(\frac{1}{0.165} + \frac{1}{0.014}\right)}{\ln\left(\frac{0.069 * 0.111}{0.014 * 0.165}\right)} = 0.00155 \frac{\text{В}}{\text{м}}.$$

### Задание 2.3

Дано:  $R=2.8$ ,  $\sigma=0.0004 \frac{\text{см}}{\text{м}}$ ,  $I_m = 140000 \text{ А}$ ,  $x = 9 \text{ м}$ ,  $a=1.1 \text{ м}$ ,  $\pi=3.14$ .

Скальный грунт.

Решение

1) Найдем плотность тока через

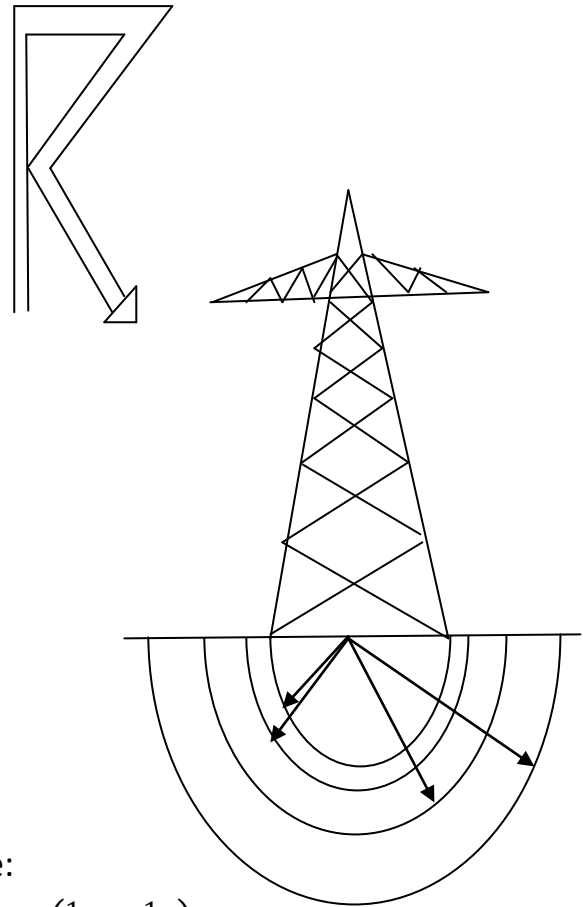
Поверхность полусферы:

$$I = \frac{I_m}{2 * \pi * R^2} = \frac{140000}{2 * 3.14 * 2.8^2} = 2842 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$$

2) Напряженность

электрического поля E:

$$E = \frac{i}{\sigma} = \frac{2842}{0.0004} = 7105131 \frac{\text{В}}{\text{м}}$$



3) Найдем шаговое напряжение:

$$U_{\text{шаг}} = \frac{I_m}{2 * \pi * \sigma} * \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = \frac{140000}{6.28 * 0.0004} * \left( \frac{1}{9} - \frac{1}{10.1} \right) = 674088 \text{ В.}$$

Определим напряжение тока  $U_{\text{шаг}}$  и

потенциал опоры:

$$U_{\text{шаг}} = \frac{I_m}{2 * \pi * \sigma} * \left( \frac{1}{R} - \frac{1}{R+a} \right) = \frac{140000}{6.28 * 0.0004} * \left( \frac{1}{2.8} - \frac{1}{3.5} \right) = 5611232 \text{ В}$$

Определим сопротивление опоры:

$$\varphi_{\text{оп}} = \frac{I_m}{2 * \pi * \sigma} * \frac{1}{R} = \frac{140000}{6.28 * 0.0004} * \frac{1}{2.8} = 19894400 \text{ В.}$$

Определим сопротивление заземления:

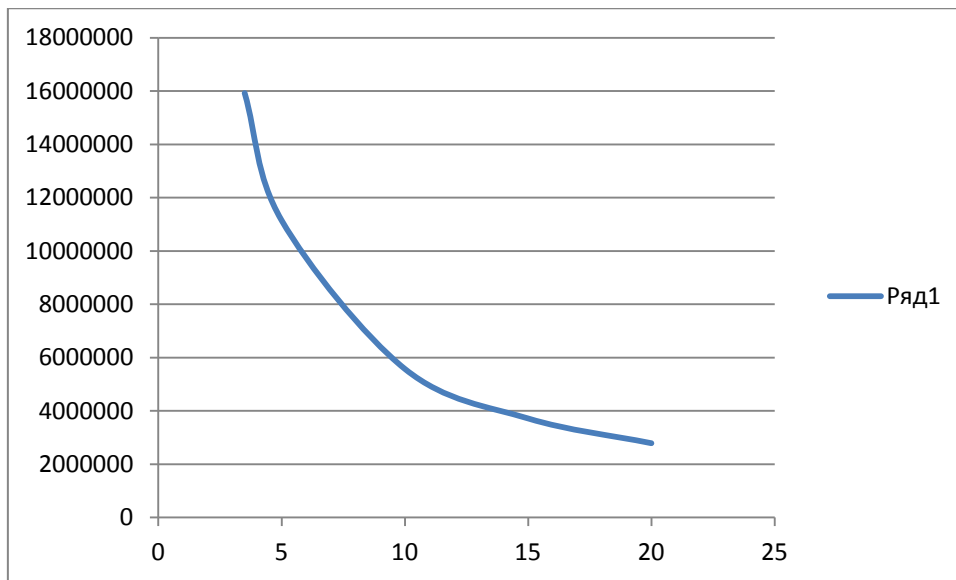
$$R_3 = \frac{\varphi_{\text{оп}}}{I_m} = \frac{19894400}{140000} = 142 \text{ Ом.}$$

Построим зависимость  $\varphi=f(R)$ :

$$\varphi = \frac{I_m}{2 * \pi * \sigma * R}$$

$$\varphi = \frac{140000}{2 * 3.14 * 0.0004 * R} = \frac{55732500}{R}.$$

R, м	3,5	5	10	15	20
$\varphi, 10^7 \text{ В}$	1,6	1,1	0,56	0,37	0,27



Потенциальная кривая,  $\varphi = f(R) = \frac{55732500}{R}$ .

#### Задание 2.4

Дано: К, 3 линия.  $E=400$  В,  $r_0=400$  Ом,  $f=75000000$  Гц,  $\rho=170$  Ом,  $l=17$  м,  $z_H=640+i480$  Ом.

#### Решение

1) Найдем входное сопротивление К, 3 линии:

$$Z_{вх}=i*\rho*tg(\beta x).$$

$$\beta=\frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\lambda=\frac{c}{f}=\frac{3*10^8}{7.5*10^7}=4\text{ м.}$$

$$\beta=\frac{2\pi}{\lambda}=\frac{2\pi}{4}=\frac{\pi}{2}=1.57.$$

$$Z_{вх}=i*\rho*tg(\beta x)=i*120*tg(1.57*17)=8863.7i$$

Характер входного сопротивления – индуктивный.

2) Очевидно, что входное сопротивление линии будет равно нулю тогда, когда напряжение на входе линии равно нулю, а это возможно, если в начале линии находится напряжения, т. е. расстояние от нагрузки до входа линии:

$$x=n*\frac{\lambda}{2}, \text{ где } n = 0, 1, 2, 3 \dots$$

Найдем, сколько полуволн укладывается в делении линии  $l=17$  м:

$$\frac{l}{\frac{\lambda}{2}}=\frac{2l}{\lambda}=\frac{2*17}{4}=4*\lambda+1\text{ м}$$

Т. к.  $\frac{\lambda}{2}=2$  м., то линию необходимо удлинить на  $2-1=1$  м.

Найдем, при каком значении емкости или индуктивности

$$Z_{вх \text{ р. з.}}=0:$$

$$Z_{вх \text{ р. з.}}=-i*\rho*ctg(\beta x)=-i*120*ctg(1.57*18)=-8371i \text{ – емкостной характер.}$$

Т. к. период повторение в Р. 3. линии составляет

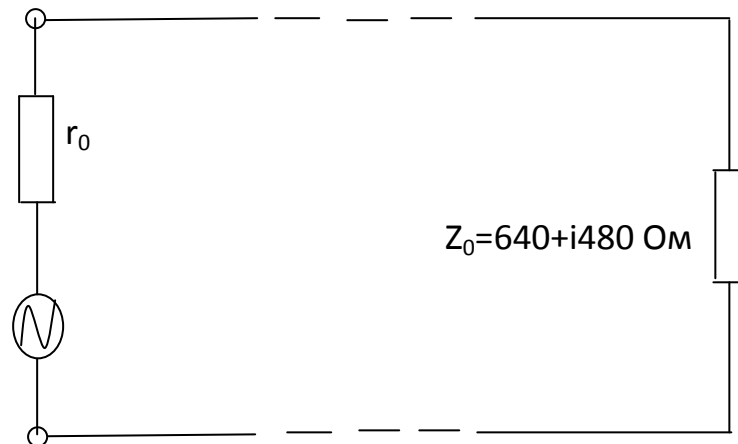
$$\frac{\lambda}{2}=2\text{ м.}, \text{ то вдале линии заданной длины уложится}$$

$$\frac{l}{\frac{\lambda}{2}}=\frac{2l}{\lambda}=\frac{2*17}{4}=\frac{34}{\lambda}=8+\frac{2}{\lambda} \text{ полудлин волн.}$$

Следовательно  $Z_{вх \text{ р. з.}}$  для линии  $l=17$  м равно входному сопротивлению разомкнутой линии

$l'=\frac{2}{\lambda}*\frac{\lambda}{2}=1$  м. Известно, что входное сопротивление разомкнутой на конце линии длиной  $\frac{\lambda}{4}=\frac{4}{4}=1$  м. Следовательно, чтобы входное сопротивление равнялось нулю, ее необходимо удлинить на  $1-1=0$  м, а значите не нужно удлинять.

$$C = \frac{1}{\omega \cdot \rho \cdot \operatorname{ctg}(\beta l_3)} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 7,5 \cdot 10^7 \cdot 120 \cdot \operatorname{ctg}(1,57)} = \frac{\operatorname{tg} 1,57}{15 \cdot 3,14 \cdot 120 \cdot 10^7} = 0,222 \cdot 10^{-7} = 2,22 \cdot 10^{-8} \text{ Ф.}$$



Определим  $Z_{\text{вх}}$ :

$$Z_{\text{вх}} = \rho \cdot \frac{Z_{\text{н}} \cdot \cos(\beta x) + i \rho \sin(\beta x)}{\rho \cos(\beta x) + i Z_{\text{н}} \sin(\beta x)}.$$

$$Z_{\text{вх}} = 120 \cdot \frac{(640 + i480) \cdot \cos(1,57 \cdot 17) + i \cdot 120 \cdot \sin(1,57 \cdot 17)}{120 \cos(1,57 \cdot 17) + i(640 + i480) \cdot \sin(1,57 \cdot 17)} = 120 \cdot (0,1203 - i \cdot 0,103) = 14,438 - 12,416 \cdot i = 19,0424 \cdot e^{-40,715i} \text{ Ом.}$$

Определим  $Z_{\text{полн}} = r_0 + Z_{\text{вх}} = 400 + 14,438 - 12,416 \cdot i = 414,438 - 12,416 \cdot i = 414,624 \cdot e^{-1,717i} \text{ Ом.}$

Запишем решение системы телеграфных уравнений для к. з. линии:

$$U_{\text{м}} = i \cdot I_{\text{мн}} \cdot \rho \cdot \sin(\beta x)$$

$$I_{\text{м}} = I_{\text{мн}} \cdot \cos(\beta x)$$

В начале линии  $x=0$ ,  $U_{\text{м}}=0$ .

Запишем полное сопротивление:

$$Z_{\text{полн}} = 414,624 \cdot e^{-1,717i} \text{ Ом.}$$

Найдем напряжение в начале линии:  $U_{\text{вх}}$ :

$$U_{\text{вх}} = \frac{E}{Z_{\text{полн}}} = \frac{400}{415 \cdot e^{-1,717i}} \cdot 19,04 \cdot e^{-40,751i} = 18,37 \cdot e^{-38,999i} \text{ В.}$$

Для К. З. линии  $U_{\text{м}(x)} = i \cdot I_{\text{мн}} \cdot \rho \cdot \sin(\beta x)$ .

Из этого условия определяем:

$I_{\text{мн}}$  при  $x=l=17 \text{ м.}$

$$I_{\text{мн}} = \frac{U_{\text{м}(x)}}{i \cdot \rho \cdot \sin(\beta x)} = \frac{18,37 \cdot e^{-38,999i}}{i \cdot 120 \cdot \sin(1,57 \cdot 17) \cdot e^{90i}} = 0,153 \cdot e^{-128,999i} \text{ А.}$$

На входе линии  $I_{m(x)} = I_{mH} * \cos(\beta x) = 0.153 * e^{-128.999i} * \cos(1.57 * 17) = 0.002073 * e^{-128.999i}$  А.

Найдем величину напряжения в пучности при  $x = \frac{\lambda}{4}$ :

$$U_{m(\frac{\lambda}{4})} = i * I_{mH} * \rho * \sin(\beta x) = 0.153 * e^{-128.999i} * 120 * \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} * \frac{\lambda}{4}\right) * e^{90i} = 18.372 * e^{-38.999i} \text{ В.}$$

Найдем величину тока в пучности при  $x=0$ :

$$I_{m(0)} = I_{mH} * \cos(\beta x) = 0.153 * e^{-128.999i} * \cos\left(\frac{\pi * 17}{2}\right) * e^{90i} = 0.002073 * e^{-38.999i} \text{ А.}$$

$$U_{m(0)} = i * I_{mH} * \rho * \sin(\beta x) = 18.372 * e^{-38.999i} \text{ В.}$$

$$I_1 = I_H * \cos(\beta * l) + i * \frac{U_H}{\rho} * \sin(\beta * l). \quad (3)$$

$$U_1 = U_H * \cos(\beta * l) + i * I_H * \rho * \sin(\beta l) \quad (4)$$

В полученных выражениях  $I_H$  и  $U_H$  – напряжение и ток на входе линии.

Подставив в (4) (5),

$$U_{mH} = I_{mH} * Z_H \quad (5)$$

получим:

$$u_1 = I_H * Z_H * \cos(\beta l) + i * \rho * I_H * \sin(\beta l).$$

$$U_1 = I_H * (Z_H * \cos(\beta l) + i * \rho * \sin(\beta l)) /$$

Выразим из полученного выражения

$$I_H = \frac{U_1}{Z_H * \cos(\beta l) + i * \rho * \sin(\beta l)} = \frac{18.372 * e^{-38.999i}}{(640 + i480) * \cos(17 * 1.57) + i120 * \sin(17 * 1.57)} = \frac{14.281 - 11.556i}{8.664 + 599.945i} = -0.0189 - 0.024i = 0.0306 * e^{-128.17i} \text{ А.}$$

$$Z_H = 800 * \sin(1.57 * 17) = 799.93 \text{ Ом.}$$

$$U_H = I_H * Z_H = 0.0306 * e^{-128.17i} * 799.93 * e^{36.889i} = 24.492 * e^{-91.328i} \text{ В.}$$

Вычислим мощность в линии:

$$P = I * U * \cos \alpha = 0.0306 * 24.492 * \cos 91.328 = 0.0173 \text{ Вт.}$$

Построим графики  $U_m(x)$ ,  $I_m(x)$ ,  $Z_{вх п. з.}(x)$ . Для этого определим  $U_m(x)$  при  $x=l=17$  м.

$$U_{m(l)} = I_{mH} * \rho * \sin(\beta x) = i * 0.153 * e^{-121} * 120 * \sin(17 * 1.57) = 18.372 * e^{-38.999i} \text{ В.}$$

$$I_{m(l)} = I_{mH} * \cos(1.57 * 17) = 0.002073 * e^{-121} \text{ А.}$$

Определим  $Z_{вх п. з.}(x)$  в точках  $x=1$ ,  $x=2$ ,  $x=3$ ,  $x=16$ ,  $x=17$ .

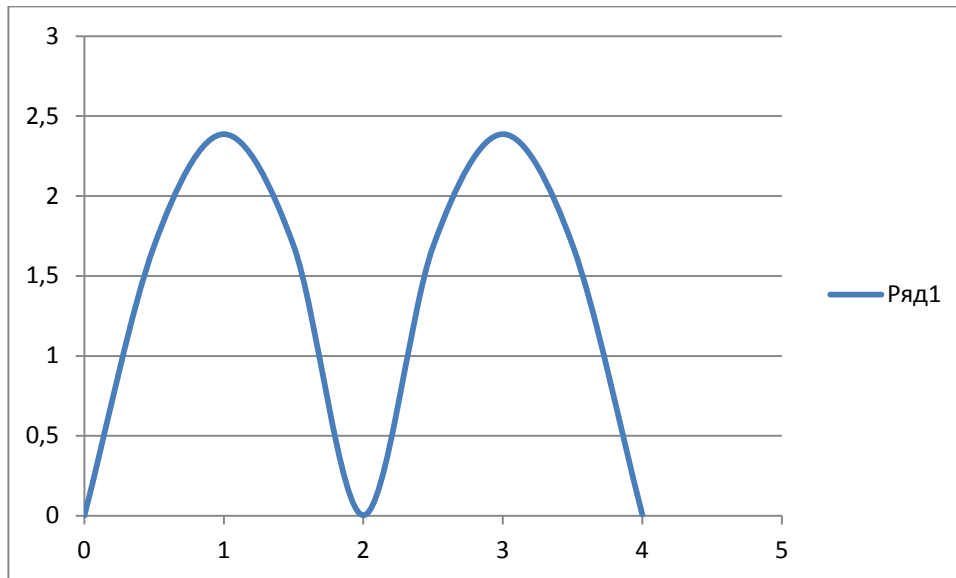
$$1) X=1, Z_{вх п. з.}(1) = i * \rho * \operatorname{tg}(\beta x) = i * 120 * \operatorname{tg}(1.57 * 17) = 150691.87.$$

$$2) X=2, Z_{вх п. з.}(2) = -0.19.$$

$$3) X=3, Z_{вх п. з.}(3) = 50230.$$

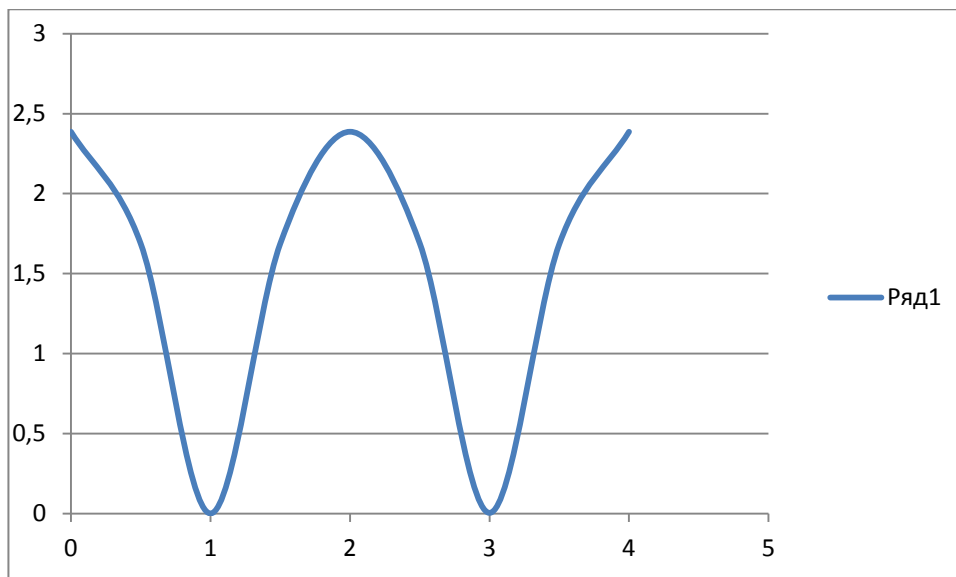
$$4) X=16, Z_{вх п. з.}(16) = -1.529.$$

$$5) X=17, Z_{вх п. з.}(17) = 8863.69.$$



$$U_m(x) = U_m \cdot \sin(\beta \cdot x) = 2.387 \cdot \sin(1.57 \cdot x)$$

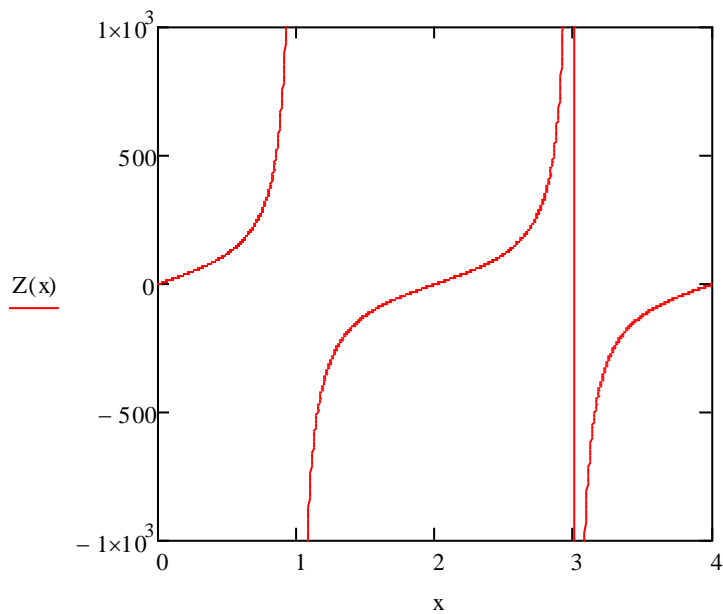
График напряжения от расстояния.



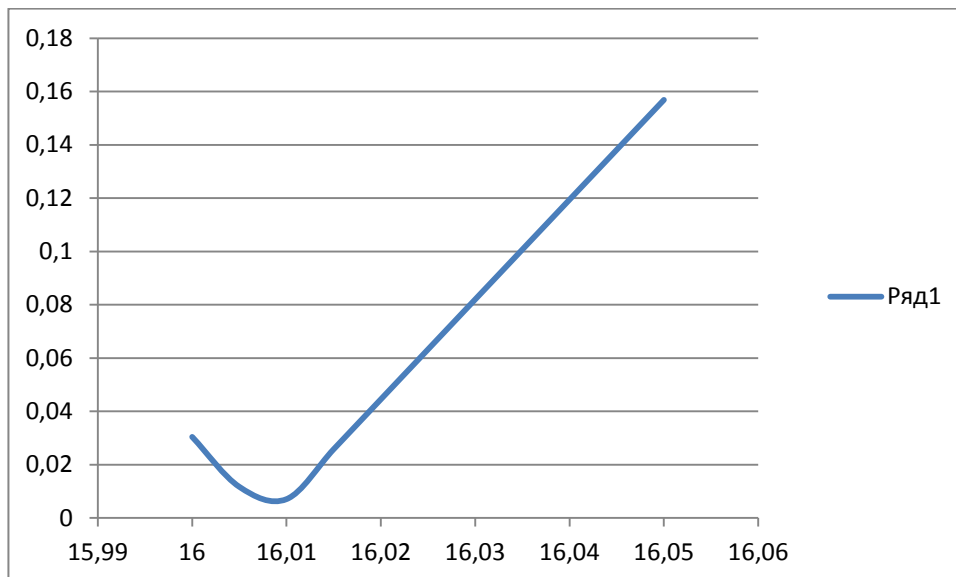
$$I_m(x) = I_m \cdot \sin(\beta \cdot x) = 2.387 \cdot \sin(1.57 \cdot x - 1.57)$$

График силы тока от расстояния.



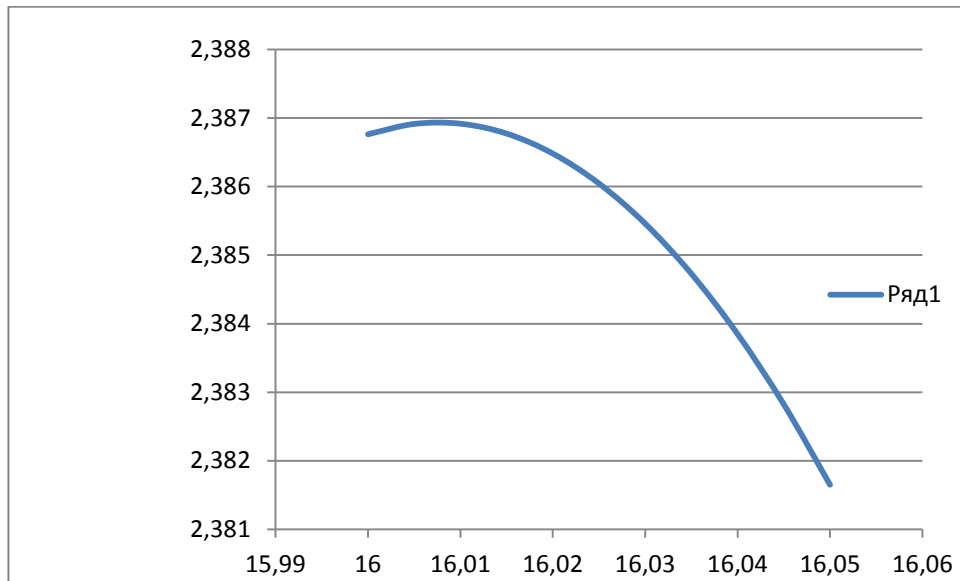


$$Z_{\text{вх п. з.}}(x) = i \cdot \rho \cdot \operatorname{tg}(\beta x) = 120 \cdot \operatorname{tg}(1.57 \cdot x).$$



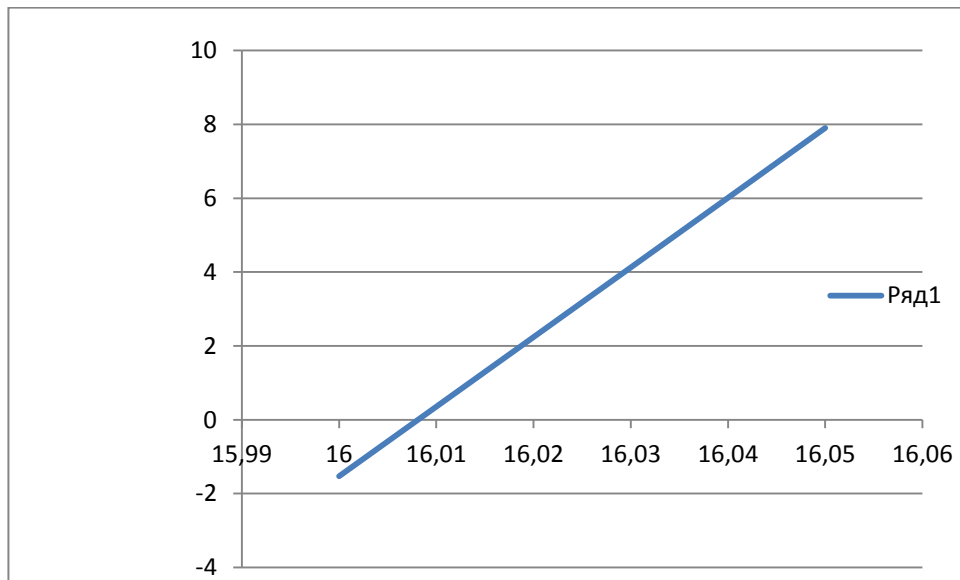
$$U_m(x) = U_m \cdot \sin(\beta \cdot x) = 2.387 \cdot \sin(1.57 \cdot x)$$

График напряжения от расстояния в окрестности  $4 \cdot \lambda = 16$ .



$$I_m(x) = I_m \cdot \sin(\beta \cdot x) = 2.387 \cdot \sin(1.57 \cdot x - 1.57)$$

График силы тока от расстояния в окрестности  $4 \cdot \lambda = 16$ .



$$Z_{\text{вх п. з.}}(x) = i \cdot \rho \cdot \operatorname{tg}(\beta x) = 120 \cdot \operatorname{tg}(1.57 \cdot x)$$

В окрестности  $4 \cdot \lambda = 16$ .

Найдем наибольшее и наименьшее значения напряжения и тока в линии:

$$U_{\text{пад}} = \frac{U_2 + I_2 \cdot \rho}{2} = \frac{I_2(Z_H + \rho)}{2} = \frac{0,0306}{2} * e^{-128,217i} * (640 + i480 + 120) = \frac{0,0306}{2} * e^{-128,217i} * 898,888 * e^{32,276i} = 13,761 * e^{-95,941i} \text{ В.}$$

$$U_{\text{отр}} = \frac{U_2 - I_2 \cdot \rho}{2} = \frac{I_2(Z_H - \rho)}{2} = \frac{0,0306}{2} * e^{-128,217i} * (640 + i480 - 120) = \frac{0,0306}{2} * e^{-128,217i} * (640 + i480 - 120) = \frac{0,0306}{2} * e^{-128,217i} * 707,672 * e^{42,709i} = 10,834 * e^{-85,507i} \text{ В.}$$

$$\text{Итак, } U_{\text{пад}} = 13,761 * e^{-95,941i} \text{ В. } U_{\text{отр}} = 10,834 * e^{-85,507i} \text{ В.}$$

$$\psi_{\text{пад}} = -95,941; \psi_{\text{отр}} = -85,507.$$

$$\chi = \frac{\psi_{\text{отр}} - \psi_{\text{пад}}}{2 \cdot \beta} = \frac{10,434}{\pi} = 0,05 \text{ рад.}$$

Соответственно, минимумы напряжения и максимумы тока будут в точке:

$$\chi = \frac{\psi_{\text{отр}} - \psi_{\text{пад}}}{2 \cdot \beta} + \frac{\lambda}{4} = 0,05 + 1 =$$

1,05 рад, и будут повторяться через:  $\frac{\lambda}{2}, \lambda, \frac{3\lambda}{2}$  и т. д.

Найдем значение  $U_{\text{пад}}$  и  $U_{\text{отр}}$  при  $\chi = 0,05$ :

$$U_{\text{пад}} = \frac{U_2 + I_2 \cdot \rho}{2} * e^{i\beta x} = 13,761 * e^{-95,941i} * e^{\frac{\pi}{2} * 0,05i} = 13,761 * e^{-90,724i} \text{ В.}$$

$$U_{\text{отр}} = \frac{U_2 - I_2 \cdot \rho}{2} * e^{-i\beta x} = 10,834 * e^{-85,507i} * e^{-\frac{\pi}{2} * 0,05i} = 10,834 * e^{-90,724i} \text{ В.}$$

Определим  $U_{\text{наиб}}$  в точке  $\chi = 0,05$ :

$$U_{\text{наиб}} = U_{\text{пад}} + U_{\text{отр}} = 13,761 * e^{-90,724i} + 10,834 * e^{-90,724i} = -0,163 - 13,76i - 0,128 - i10,833 = -0,291 - 24,593i = 24,594 * e^{-90,524i} \text{ В.}$$

$$I_{\text{наим}} = \frac{U_{\text{пад}}}{\rho} - \frac{U_{\text{отр}}}{\rho} = \frac{13,761}{120} * e^{-90,724i} - \frac{10,834}{120} * e^{-90,724i} = -0,00029 - 0,024392i = 0,02394 * e^{-90,724i} \text{ А.}$$

Определим значения  $U_{\text{наим}}$  и  $I_{\text{наиб}}$ :

$$U_{\text{наим}} = I_{\text{наим}} * \rho = 0,0244 * 120 * e^{-90,274i} = 2,927 * e^{-90,724i} \text{ В.}$$

$$I_{\text{наиб}} = \frac{U_{\text{наиб}}}{\rho} = \frac{24,594 * e^{-90,724i}}{120} = 0,205 * e^{-90,724i} \text{ А.}$$

$$I = \frac{\sqrt{2} * U_{\text{пад}}}{\rho} * \sin(1,57x - 1,673) - \frac{\sqrt{2} * U_{\text{отр}}}{\rho} * \sin(-1,57x - 1,491) = 0,1621 * \sin(1,57x - 1,673) - 0,1277 * \sin(-1,57x - 1,491).$$

$$U = \sqrt{2} * U_{\text{пад}} * \sin(1,57x - 1,673) + \sqrt{2} * U_{\text{отр}} * \sin(-1,57x - 1,491) = 19,458 * \sin(1,57x - 1,673) + 15,319 * \sin(-1,57x - 1,491).$$

Итак,  $i = 0,1621 * \sin(1.57x - 1.673) - 0,1277 * \sin(-1.57x - 1.491)$ .

$u = 19.458 * \sin(1.57x - 1.673) + 15.319 * \sin(-1.57x - 1.491)$ .

R	0	0.05	1.05	2.05	3.05	4
I	-0.034	-0.0345	-0.00039	0.0344	0.00394	-0.034
U	-34.626	-34.771	-0.512	34.77	0.567	-34.615

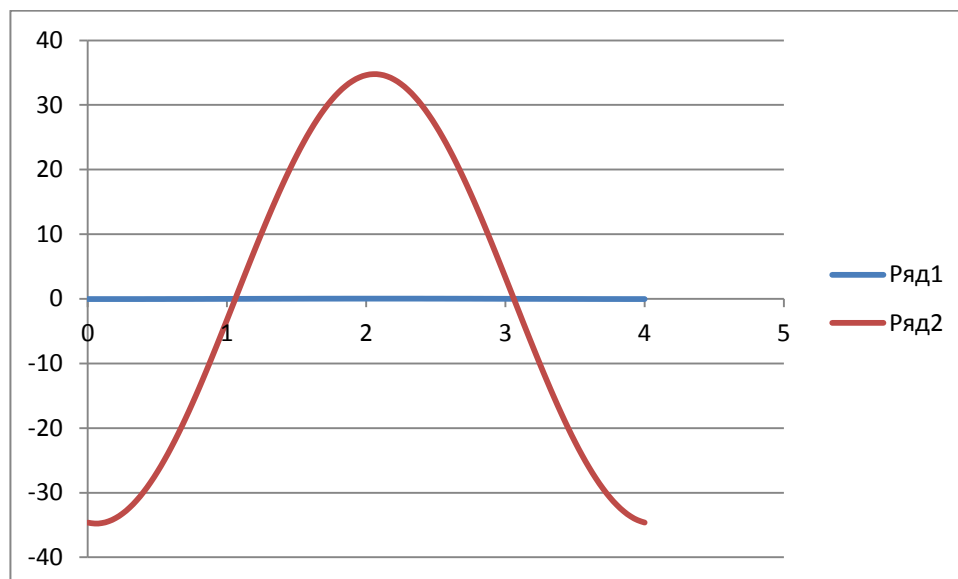


График напряжения от расстояния.

$u = 19.458 * \sin(1.57x - 1.673) + 15.319 * \sin(-1.57x - 1.491)$ .

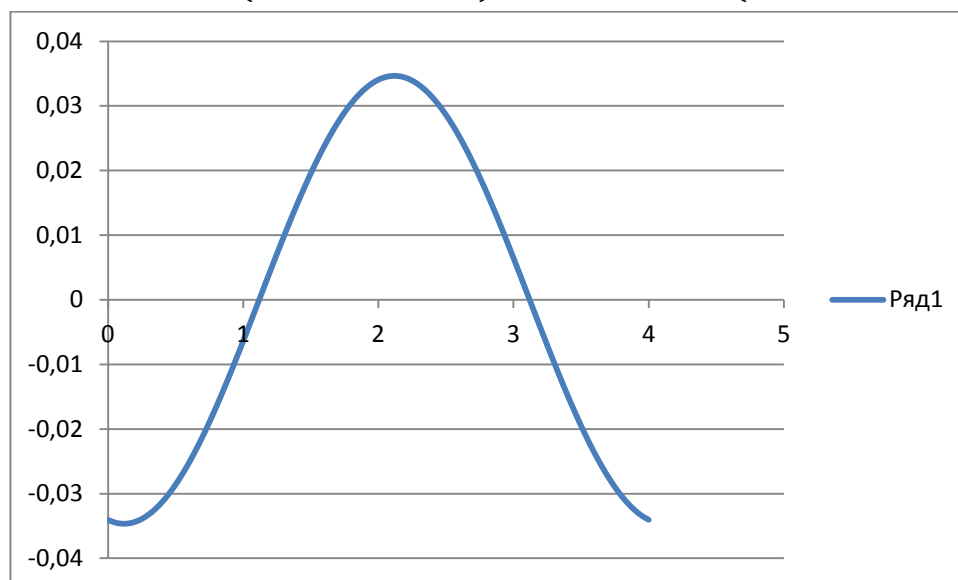


График силы тока от расстояния.

$i = 0,1621 * \sin(1.57x - 1.673) - 0,1277 * \sin(-1.57x - 1.491)$ .

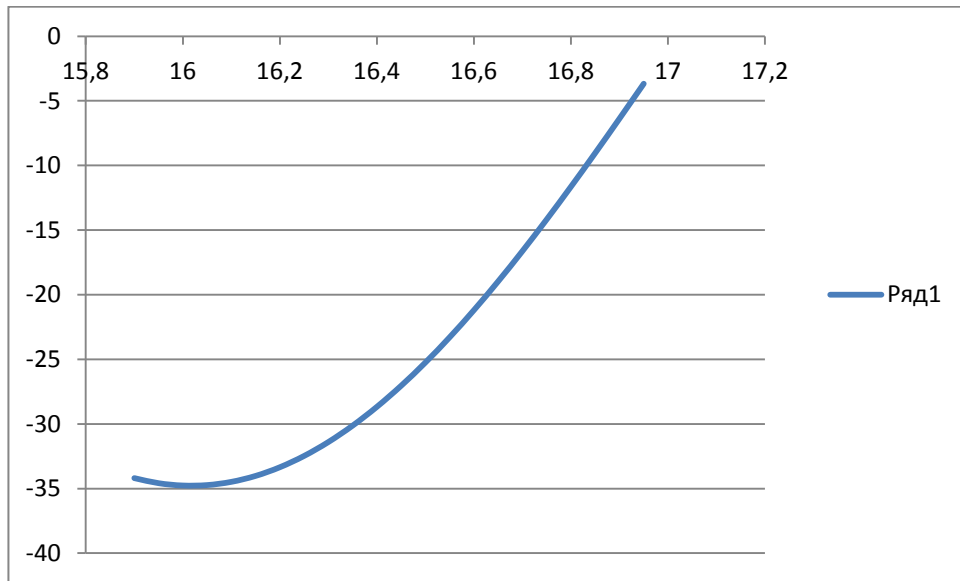


График напряжения от расстояния в окрестности  $4*\lambda=16$ .

$$u = 19.458 * \sin(1.57x - 1.673) + 15.319 * \sin(-1.57x - 1.491).$$

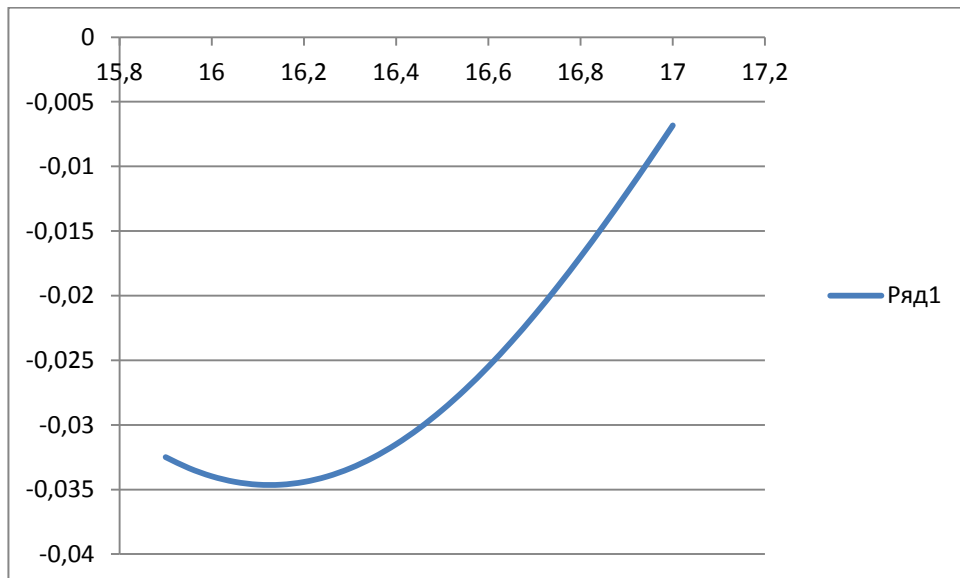


График силы тока от расстояния в окрестности  $4*\lambda=16$ .

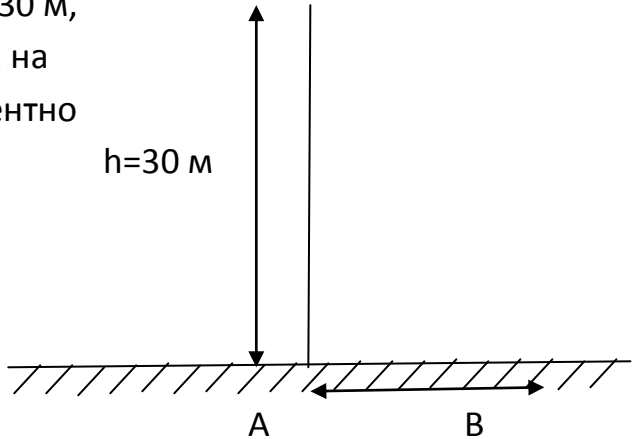
$$i = 0,1621 * \sin(1.57x - 1.673) - 0,1277 * \sin(-1.57x - 1.491).$$

### Задание 2.5

Дано:  $f=7.5 \cdot 10^7$  Гц,  $h=30$  м,  $l=17000$  м,  $E=400$  В,  $\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6}$ ,  $\pi = 3,14$ .

#### Решение

1) Поле антенны, высотой  $h=30$  м, Расположенной вертикально, на Поверхности земли, эквивалентно Диполю длиной  $l=2 \cdot h=60$  м Находящемуся в свободном Пространстве. В данной зоне Такого диполя в точке, находящейся от него на расстоянии  $l=17000$  м на горизонтальной поверхности, проходящей через середину диполя, амплитуда напряженности электрического поля.



$$E_m = \frac{\mu_0 \cdot l \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot I_m}{4 \cdot \pi \cdot l}, \text{ откуда находим амплитуду тока в антенне.}$$

$$I_m = \frac{2 \cdot l \cdot E_m}{\mu_0 \cdot L \cdot f} = \frac{2 \cdot 17000 \cdot 400 \cdot 0.001 \cdot \sqrt{2}}{1.26 \cdot 10^{-6} \cdot 60 \cdot 75 \cdot 10^6} = 3.3916 \text{ А.}$$

2) Сопротивления излучателя:

$$H = \frac{c}{v} = \frac{3 \cdot 10^8}{7.5 \cdot 10^7} = 4 \text{ м.}$$

$$R_{\text{изл}} = 1580 \cdot \frac{h^2}{\lambda^2} = 1580 \cdot \frac{30^2}{4^2} = 1580 \cdot 7.5^2 = 88875 \text{ Ом.}$$

3) Определим мощность на выходе передатчика:

$$P_{\text{вых}} = \frac{R \cdot I_m^2}{2} = \frac{88875 \cdot 3.3916^2}{2} = 511162 \text{ Вт.}$$

$$P_{\text{вх}} = 511 \text{ кВт.}$$

4. Вектор Умова-Поитинга в заданной точке

$$\Pi = E \cdot H = \frac{E^2}{Z_B} = \frac{160000 \cdot 10^{-6}}{377} = \frac{0.16}{377} = 0,0004 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

### Задание 2.6

$L=0.9$  м,  $d=0.09$  м,  $\epsilon_3 = 0,0004$ ,  $\pi = 3,14$ .

### Решение

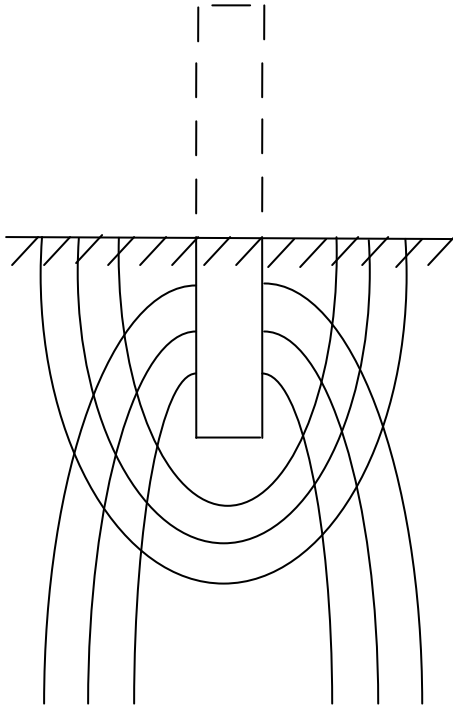


рис. 1

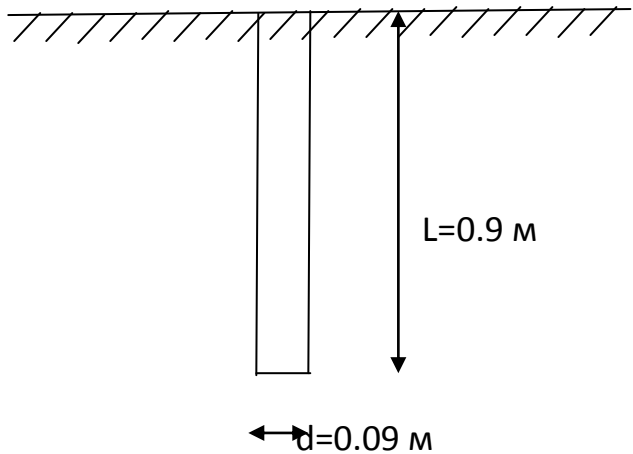


рис. 2

Картина поля заземления показана на рис. 1. Труба длиной  $l_1=0.9$  м, находящаяся в земле, дополнена такой же трубой, находящейся в воздухе. Проводимость заземления равна половине проводимости трубы длиной  $2l$ :

$$\begin{aligned} \sigma &= 2 * \pi * \epsilon_3 * l * \left[ \operatorname{Arcsh} \left( \frac{2l}{d} \right) - \sqrt{1 + \left( \frac{d}{2l} \right)^2} + \frac{d}{2l} \right]^{-1} = 2 * 3.14 * 0.0004 * \\ &0.9 * \left[ \operatorname{Arcsh}(20) - \sqrt{1 + \frac{1}{400}} + 0.05 \right]^{-1} = \frac{6.28 * 0.00036}{3.69 - 1 + 0.05} = \frac{0.0022608}{2.737005} = 0.000826. \end{aligned}$$

$$\text{Итак, } R_3 = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{0.000826} = 1210.022 \text{ Ом.}$$

С учетом того, что по требованиям техники безопасности,  $R_3$  должен быть не более 4 Ом, данный заземлитель использовать нельзя.

### Литература

- 1) А. А. Бессонов. /Теоретические основы электротехники/ «Высшая школа», 1964 г.
- 2) В. Ф. Калинин, В. М. Исаев /Теоретические основы электротехники/ Москва, «Издательство машиностроение-1» 2004 г, 218 с.
- 3) В. М. Иванов, Е. А. Пичагин, А. В. Баранов /Методическое пособие. Теоретические основы электротехники. Теория магнитного поля. Длинные волны. Методические указания к курсовой работе./ Издательство Тамбовского государственного технического университета. 2002 г., 22 с.