

**621.396**  
**Л 125**

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

МОСКОВСКИЙ ордена ЛЕНИНА и ордена ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

---

Утверждено  
учебным управлением МЭИ

## **Лабораторная работа № 2**

по курсу

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ  
РАДИОВОЛН

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯ ИЗЛУЧАТЕЛЯ,  
РАСПОЛОЖЕННОГО ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ  
ЗЕМЛИ

(Продолжительность лабораторного занятия 4 часа)

**621.396**

**Л 125**

**УДК: 621.396.1.018.001.57 (076.5)**

Исследование поля излучателя, расположенного вблизи поверхности земли /Грудинская Г. П., Зайцев А. С. — М.: Моск. энерг. ин-т, 1986. — 16 с.

Описание лабораторной работы «Исследование поля излучателя, расположенного вблизи поверхности земли» содержит постановку задачи, расчетное задание, описание экспериментальной установки, задание к экспериментальной части, контрольные вопросы.

Описание лабораторной работы предназначено для студентов радиотехнического факультета (дневной и вечерней форм обучения), выполняющих лабораторные работы по 2-й части курса «Электродинамика и распространение радиоволн».

## 2.1. Введение

Целью работы является изучение влияния поверхности Земли на амплитудные и поляризационные характеристики поля излучателя, расположенного вблизи поверхности. Исследуется характер диаграмм направленности излучателя в вертикальной плоскости в зависимости от высоты расположения излучателя, электрических свойств поверхности и вида поляризации излучаемой волны; распределение напряженности поля вдоль радиотрассы; структура электрического поля вблизи границы раздела воздух — полупроводящая поверхность.

Все исследования проводятся на модели радиотрассы.

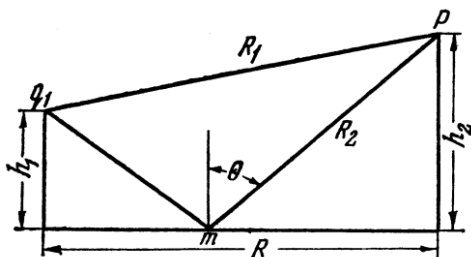


Рис. 2.1. Схема радиотрассы при антеннах, поднятых на высоты  $h_1$  и  $h_2$  над плоской поверхностью:

$q_1P$  - траектория прямой волны;

$q_1mP$  - траектория отраженной волны.

На рис. 2.1 изображена схема радиотрассы, на которой передающая и приемная антенны подняты над плоской поверхностью на высоты  $h_1$  и  $h_2$  и разнесены на расстояние  $R$ . Амплитуда вектора напряженности поля над плоской поверхностью при условии, что  $h_1 \geq \lambda$  и  $R \geq h$ , определяется интерференционной формулой:

$$E_m = E_{m0} \cdot |V|. \quad (2.1)$$

Здесь  $E_{m0}$  — амплитуда напряженности поля в свободном пространстве:

$$E_{m0} = \frac{\sqrt{60PD\eta}}{R} \cdot F(\theta). \quad (2.2)$$

$E_{m0}$  зависит от мощности передатчика  $P$ , коэффициента направленного действия антенны  $D$ , коэффициента полезного действия антенны  $\eta$  и характеристики направленности передающей антенны  $F(\theta)$ . При этом  $F(\theta) = 1$  для горизонтального вибратора и  $F(\theta) = \sin \theta$  для вертикального вибратора. В формуле (2.1)  $|V|$  — множитель влияния поверхности; для

слабонаправленных антенн  $|V|$  определяется выражением:

$$|V| = \left[ 1 + |R_{\Pi, \perp}|^2 + 2|R_{\Pi, \perp}| \cos(2kh_1 \cos\theta + \Phi_{\Pi, \perp}) \right]^{1/2}, \quad (2.3)$$

где  $\theta$  — угол падения волны на поверхность,  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число,  $R_{\Pi, \perp}$  и  $\Phi_{\Pi, \perp}$  — модули и фазы коэффициентов отражения при параллельной и нормальной поляризациях волны:

$$R_{\Pi} = |R_{\Pi}| e^{-i\Phi_{\Pi}} = \frac{\tilde{\varepsilon} \cos\theta - \sqrt{\tilde{\varepsilon} - \sin^2\theta}}{\tilde{\varepsilon} \cos\theta + \sqrt{\tilde{\varepsilon} - \sin^2\theta}}, \quad (2.4)$$

$$R_{\perp} = |R_{\perp}| e^{-i\Phi_{\perp}} = \frac{\cos\theta - \sqrt{\tilde{\varepsilon} - \sin^2\theta}}{\cos\theta + \sqrt{\tilde{\varepsilon} - \sin^2\theta}}, \quad (2.5)$$

$\tilde{\varepsilon} = \varepsilon(1 - i60\sigma\lambda/\varepsilon)$  — комплексная диэлектрическая проницаемость поверхности; в диапазоне дециметровых и сантиметровых волн при  $60\sigma\lambda/\varepsilon \ll 1$  диэлектрическая проницаемость может считаться действительной величиной  $\tilde{\varepsilon} = \varepsilon$ ;  $\sigma$  — удельная объемная проводимость среды, измеряемая в См/м.

На рис. 2.2 представлены графики зависимости модуля коэффициента отражения радиоволн от сухого песка ( $\sigma = 0$ ,  $\varepsilon = 3$  или  $\varepsilon = 5$ ) при параллельной и нормальной поляризациях. Модуль коэффициента отражения от идеально проводящей поверхности для любых углов  $\theta$  и любого вида поляризации равен  $|R_{\Pi}| = |R_{\perp}| = 1$ . Фаза коэффициента отражения от идеального диэлектрика или проводника при нормальной поляризации волны равняется  $\Phi_{\perp} = 180^\circ$ , при параллельной поляризации и отражении от идеального проводника фаза не меняется  $\Phi_{\Pi} = 0^\circ$ ; при отражении от идеального диэлектрика фаза коэффициента отражения зависит от угла падения волны  $\theta$ : при  $\theta < \theta_0$  ( $\theta_0$  — угол полного преломления)  $\Phi_{\Pi} = 0^\circ$ ,

при  $\theta > \theta_0$   $\Phi_{\Pi} = 180^\circ$ .

Если на поверхности имеются неровности, высота которых превосходит допустимое значение определяемое критерием Рэлея

$$h_{\text{доп}} \leq \lambda/8 \cdot \cos\theta, \quad (2.6)$$

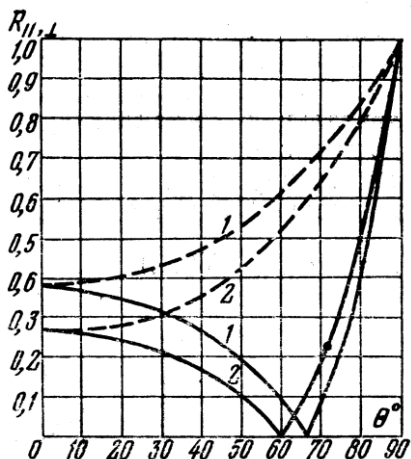


Рис. 2.2. Графики изменения модуля коэффициента отражения плоской волны от границы воздух - песок при изменении угла падения волны:

- — нормально поляризованная волна;
- параллельно поляризованная волна;
- 1 - диэлектрическая проницаемость поверхности  $\epsilon = 5$ ;
- 2 - диэлектрическая проницаемость поверхности  $\epsilon = 3$ .

то происходит рассеяние радиоволн и напряженность поля волны, рассеянной в направлении зеркального отражения  $\theta_{\text{отр}} = \theta_{\text{пад}}$  уменьшается, что приводит к уменьшению эффективного коэффициента отражения. Модуль эффективного коэффициента отражения от поверхности с неровностями или неизвестными электрическими параметрами  $|R_{\text{эф}}|$  можно определить по измеренному распределению поля в вертикальной плоскости

$$|R_{\text{эф}}| = (1 - |E_{\text{min}}/E_{\text{max}}|) / (1 + |E_{\text{min}}/E_{\text{max}}|), \quad (2.7)$$

где  $|E_{\text{min}}/E_{\text{max}}|$  — отношение амплитуд напряженности поля в соседних минимумах и максимумах распределения поля.

В важном для практики случае пологих лучей ( $\theta \rightarrow 90^\circ$ )  $|R_{||}| \approx |R_{\perp}| \approx 1$ ,

$\Phi_{\Pi} \approx \Phi_{\perp} \approx 180^\circ$  и множитель влияния поверхности сводится к упрощенной формуле Введенского

$$|V| = 4\pi \frac{h_1 h_2}{R\lambda}. \quad (2.8)$$

Применимость формулы (2.8) ограничена соотношением между высотами

подъема антенн и протяженностью радиотрассы

$$\pi h_1 h_2 / \lambda R < 0.1. \quad (2.9)$$

Структура поля волны, распространяющейся в непосредственной близости от полупроводящей поверхности, отличается от структуры поля в свободном пространстве. Если антенна, излучающая параллельно поляризованную волну, расположена вблизи полу проводящей поверхности ( $h_1 < \lambda$ ), то вдоль границы раздела «воздух — поверхность» распространяется поверхностная волна, имеющая наряду с вертикальной составляющей вектора электрического поля  $E_{z1}$ , горизонтальную составляющую  $E_{x1}$ , направление которой совпадает с направлением на приемную антенну (рис. 2.3). Связь между ортогональными составляющими поля над поверхностью определяется формулами

$$E_{x1} = E_{z1} / (\varepsilon - i60\sigma\lambda)^{1/2} = E_{z1} e^{i\psi/2} [\varepsilon^2 + (60\sigma\lambda)^2]^{1/4}, \quad (2.10)$$

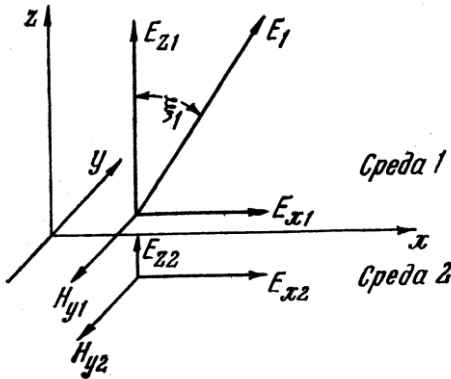


Рис. 2.3. Структура поля радиоволны, распространяющейся вблизи полупроводящей поверхности

где  $\psi = \arctg(60\sigma\lambda/\varepsilon)$  — разность фаз между составляющими  $E_{z1}$  и  $E_{x1}$ . Суммарное поле имеет эллиптическую поляризацию. При малой проводимости поверхности  $\sigma \approx 0$ ,  $\psi \approx 0$  и поляризация суммарного поля, близка к линейной. Угол между нормалью к поверхности и направлением вектора  $E_1$  составляет угол  $\xi_1$

$$\xi_1 = \arctg[\varepsilon^2 + (60\sigma\lambda)^2]^{1/4}. \quad (2.11)$$

Под поверхностью (в земле) также возбуждаются две составляющие  $E_{z2}$  и  $E_{x2}$ , связанные с соответствующими составляющими поля над

поверхностью соотношениями

$$E_{x2} = E_{x1}; \quad (2.12)$$

$$E_{z2} = E_{z1} e^{i\psi} / [\varepsilon^2 + (60\sigma\lambda)^2]^{1/2}. \quad (2.13)$$

В общем случае поле под поверхностью имеет эллиптическую поляризацию, которая при малых потерях ( $\sigma \approx 0$ ) переходит в линейную, причем векторы  $E_1$  и  $E_2$  взаимно перпендикулярны

$$\xi_2 = 90^\circ - \xi_1. \quad (2.14)$$

Поверхностная волна существует только в непосредственной близости от границы раздела и амплитуда поля этой волны экспоненциально затухает при удалении от поверхности.

## 2.2. Расчетное задание

1. С помощью формул (2.2) и (2.3) и графиков рис. 2.2 рассчитать и построить в декартовой системе координат нормированные графики распределения напряженности поля в вертикальной плоскости для электрических вертикального В и горизонтального Г вибраторов, поднятых над идеальными металлом и диэлектриком. Значения  $h_1/\lambda$ ,  $\varepsilon$  и тип вибратора для каждой бригады указаны в табл. 2.1.

Таблица 2.1

№ бригады	1	2	3	4	5	6	7	8
$h_1/\lambda$	1 ¼	1 ½	1 ¾	1 ⅞	2 ⅛	2 ¼	1 ¼	1 ½
Тип вибратора	В	Г	В	Г	В	Г	Г	В
$\varepsilon$	3	5	5	3	3	5	3	5

При расчете графиков следует, прежде всего, определить углы  $\theta$ , при которых имеют место максимумы и минимумы, и потом рассчитать промежуточные точки. Нормировку проводить по максимальному значению поля в свободном пространстве.

2. По формуле (2.9) рассчитать максимальную величину  $h_{2\text{доп}}$ , при которой применима формула Введенского (2.8), взяв значения  $h_1$  из табл. 2.1  $R = 50$  см. Построить график зависимости нормированной величины  $E$  от  $h_2$  по формуле (2.8), приняв значение  $E$  при  $h_{2\text{доп}}$  за единицу, менять  $h_2$  от 0 до 10 см,  $\lambda = 3,2$  см.

3. Построить графики  $1/R$  и  $1/R^2$  для  $R$ , меняющихся в пределах от 30 см до 50 см. Значение при  $R = 50$  см принять за единицу.
4. Рассчитать, используя формулу (2.6), углы  $\theta$ , при которых начинают влиять неровности высотой  $h = 1.5$  и  $2,5$  см.
5. По формулам (2.10—2.13) рассчитать отношения  $E_{x1}/E_{z1}$ ,  $E_{x2}/E_{z2}$  и углы наклона векторов  $E_1$  и  $E_2 - \xi_1$  и  $\xi_2$  при  $\varepsilon = 5$ ,  $\sigma = 10^{-2}$  См/м,  $\lambda = 3,2$  см.

## 2.3. Экспериментальная часть

### Описание установки

Лабораторная установка (рис. 2.4) состоит из модели земной радиотрассы А, передающего устройства в виде рупорной антенны Г и клистронного генератора В, приемного устройства, состоящего из трех приемных зондов 1, 2, 3 и усилителя Б.

При моделировании протяженность трассы и высоты расположения антенн уменьшаются в отношении  $\lambda(\text{мод.})/\lambda(\text{действ.})$ . Используемая установка представляет собой ящик длиной 90 см. Генератор работает на частоте 9400 МГц ( $\lambda = 3,2$  см). Таким образом, установка может служить моделью радиотрассы дециметровых волн (например,  $\lambda_{(\text{действ.})} = 9,6$  м, протяженность трассы 270 м).

Для полного моделирования коэффициент отражения  $R$  должен сохраниться прежним. Следовательно, величина  $\tilde{\varepsilon} = \varepsilon(1 - i60\sigma\lambda/\varepsilon)$  не должна изменяться и проводимость поверхности модели должна быть больше, чем на реальной трассе ( $\sigma(\text{модели})/\sigma(\text{действ.})$ )  $\lambda(\text{мод.})/\lambda(\text{действ.})$ ). В нашем примере  $\sigma(\text{мод.}) = 300\sigma(\text{действ.})$ .

Поэтому песок, заполняющий ящик, моделирует очень сухую поверхность с  $\sigma = 10^{-6}$  См/м, а для моделирования поверхности моря применяется металл (проводимость морской воды 4 См/м, модель должна иметь проводимость  $1,2 \times 10^3$  См/м). С целью уменьшения влияния посторонних предметов и излучений радиотрасса по боковой и конечной сторонам закрыта поглощающими экранами.

В качестве излучающей антенны применяется рупор, расширяющийся в горизонтальной плоскости. Изменение поляризации излучающей волны



осуществляется поворотом на  $90^\circ$  волновода с клистронной головкой, питающего рупор.

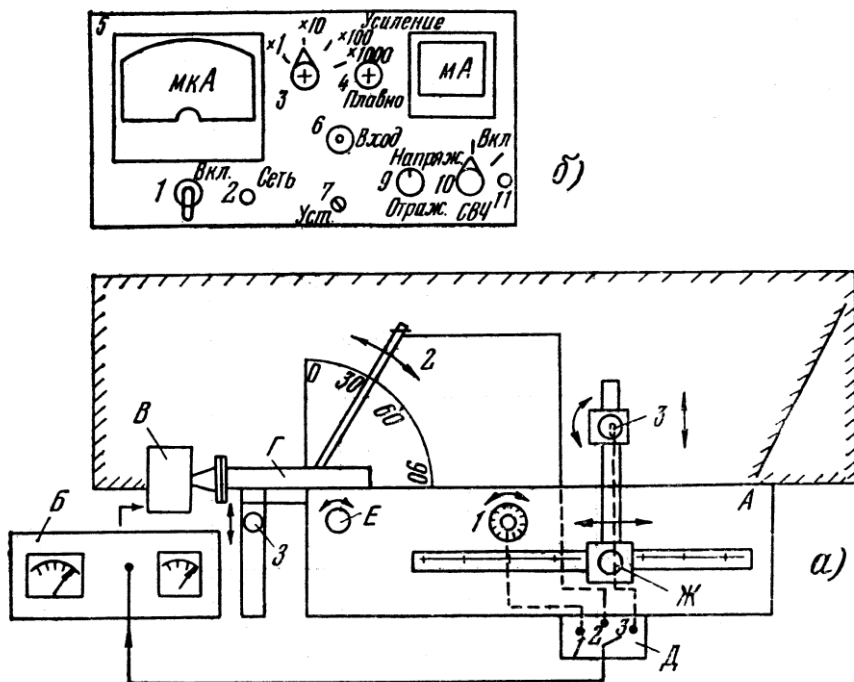


Рис. 2.4.: а - структурная схема лабораторной установки: А - модель радиотрассы; Б - блок питания генератора и усилителя; В - выносная клистронная головка; Г - рупор; Д - переключатель зондов: 1 - зонд для измерения поляризации поля в земле; 2 - зонд для измерения распределения поля в вертикальной плоскости; 3 - зонд для измерения поляризационной характеристики поля над землей и распределения поля вдоль радиотрассы; Е - рукоятка для перемещения зонда 2; Ж - рукоятка для перемещения зонда 3; 3 - рукоятка для перемещения рупора по высоте; б - расположение органов управления блока питания клистронного генератора и измерительного усилителя: 1 - тумблер включения прибора в сеть; 2 - сигнальная лампочка включения сети; 3 - декадный переключатель уровня входного сигнала; 4 - ручка плавной регулировки уровня входного сигнала; 5 - индикатор уровня входного сигнала; 6 - разъем для подключения зондов; 7 - ручка регулировки установки нуля; 8 - индикатор тока клистрона; 9 - ручка регулировки напряжения отражателя клистрона; 10 - выключатель напряжения отражателя клистрона; 11 - сигнальная лампочка включения напряжения отражателя клистрона.

Диаграммы направленности рупора в вертикальной плоскости при параллельной и нормальной поляризациях изображены на рис. 2.5. При параллельной поляризации диаграммы направленности рупора и вибратора почти совпадают, при нормальной существенно отличаются, что приводит к отличию результатов эксперимента от расчета. Высота передающего рупора меняется путем перемещения его вместе с клистронной головкой на вертикальной стойке при помощи вращающейся ручки 3.

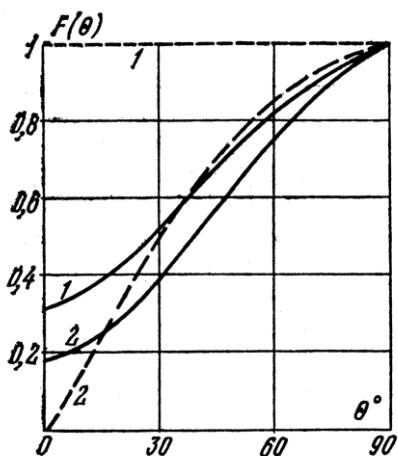


Рис. 2.5. Диаграммы направленности диполя и рупорной антенны (отсчет углов от вертикали):

- 1 — нормальная поляризация;
- 2 — параллельная поляризация;
- диаграмма рупора;
- — диаграмма диполя.

Отсчет высоты необходимо вести от середины рупора. Для этого служит вертикальная шкала с красной стрелкой. В качестве приемных антенн используются три зонда, в которых роль вибраторов играют выводы детекторов. Для подсоединения к усилителю одного из трех зондов служит переключатель Д. При снятии диаграмм направленности (распределения поля в вертикальной плоскости при  $R = const$  и  $R \gg \lambda$ ) используется зонд 2, перемещаемый по окружности рукояткой Е. Отсчет углов производится по специальной шкале от вертикали. При снятии распределения поля вдоль трассы прием ведется на зонд 3, перемещаемый при помощи каретки. Для отсчета расстояний от раскрыва рупора используется шкала горизонтальной линейки. Зонд 3 может поворачиваться, вокруг своей оси (необходимо освободить стопорный винт) и служит также для измерения поляризационной характеристики поля над поверхностью. В этом случае отсчет углов ведется по шкале на зонде и нулевое значение угла соответствует положению зонда вдоль нормали к поверхности трассы.

Для измерения поля под поверхностью (в земле) применяется зонд 1, помещенный в специальное отверстие в стенке ящика — модели радиотрассы. Отсчет углов ведется по шкале на этом зонде.

## Экспериментальная часть

Требования к технике безопасности при работе на установке:

- а) к работе на установке допускаются лица, ознакомленные с программой проводимых работ и прошедшие общий инструктаж по технике безопасности в лаборатории кафедры АУ и РРВ;
- б) включение установки производится дежурным лаборантом или преподавателем;
- в) включение клистронного генератора производится только на время проведения измерений;
- г) при любой возникшей неисправности в установке немедленно обращаться к дежурному лаборанту или преподавателю. Категорически запрещается пытаться самостоятельно исправлять возникшие дефекты.

### Задание к экспериментальной части

1. Измерить и построить в декартовой системе координат нормированные графики распределения поля в вертикальной плоскости (зонд 2).  
2). Высоту расположения излучателя и вид поляризации установить в соответствии с расчетом (табл. 2.1). Экспериментальные зависимости строить попарно с расчетными для аналогичных условий, нормировку проводить, приравнявая максимумы, ближайшие к поверхности в расчетной и экспериментальной диаграммах.

2. Измерить и построить в декартовой системе координат распределение поля в вертикальной плоскости над неровной поверхностью (зонд 2).

3. На основании проведенных измерений рассчитать эффективные коэффициенты отражения от диэлектрической и неровной поверхности по формуле (2.7).

4. Измерить распределение напряженности поля вдоль трассы (зонд 3) над песком и металлом при  $h_1 = 2$  см при параллельной поляризации и изменении расстояния до приемной антенны от  $R = 30$  до 50 см. Результаты пронормировать, приняв напряженность поля при  $R = 50$  см за единицу. Сравнить скорость убывания напряженности поля над песком и металлом с расчетными графиками  $1/R$  и  $1/R^2$ , совместить их на одном рисунке.

5. Измерить относительное изменение напряженности поля при подъеме приемной антенны (зонд 3) над песком при параллельной поляризации. Высоту  $h_1$  взять из табл. 2.1,  $R = 50$  см. Построить график и определить максимальную •высоту  $h_2$ , при которой применима формула Введенского. Сопоставить с расчетом.

6. Измерить поляризационные характеристики поля над землей (зонд 3) и в земле (зонд 1), поворачивая приемные зонды на  $360^\circ$  и отмечая показания прибора через каждые  $10^\circ$ . Построить нормированный график изменения напряженности поля от угла поворота зонда (поляризационную диаграмму) в полярной системе координат. Сравнить расчетные и экспериментальные углы наклона векторов  $E$  —  $\xi_1$  и  $\xi_2$ .

Примечания: а) При выполнении пп. 1, 2 необходимо отводить зонд 3 в дальний от излучателя конец трассы с целью уменьшения влияния на результаты измерений,

б) При выполнении пп. 1, 2, 4 — 6 необходимо учитывать квадратичность характеристики детектора и извлекать корень квадратный из показаний прибора.

## 2.4. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. Результаты расчетов и экспериментов в соответствии с заданиями.
2. Результаты обработки экспериментов и сравнение экспериментальных данных с расчетами.
3. Выводы по проделанной работе. В выводах необходимо дать объяснение полученных результатов, количественную оценку расхождения результатов расчета и эксперимента,

## 2.5. Контрольные вопросы

1. По какому признаку почвы делятся на проводники и диэлектрики?
2. Какие строгие и приближенные граничные условия выполняются на границе раздела воздух — земля?
3. Проанализировать интерференционную формулу и построить диаграммы направленности электрического и магнитного вибраторов, расположенные над песком или металлом горизонтально и вертикально на высотах  $h_1/\lambda = 1, 5/4, 5/2$ .
4. Объясните роль зон Френеля в формировании отраженного луча,
5. Укажите условия применимости интерференционной формулы (2.1). В каком диапазоне радиоволн выполняются эти условия?
6. В каких случаях можно пользоваться упрощенной формулой Введенского?
7. Как проявится в результатах эксперимента отличие диаграммы направленности рупора от диаграммы направленности элементарного вибратора при размещении их в свободном пространстве?
8. Сравните зависимости амплитуды напряженности поля от расстояния для элементарного вертикального вибратора, поднятого над песком и металлом.
9. Как влияют мелкие неровности поверхности на диаграмму направленности излучателя, поднятого над поверхностью?
10. Что такое расстояние прямой видимости?
11. Каким образом учитывается влияние сферичности поверхности Земли при пользовании интерференционной формулой?
12. Какова структура -поля, волны, распространяющейся вблизи полупроводящей поверхности в воздухе и в земле?
13. Как поляризована волна на лабораторной модели трассы? Какой график поляризационной характеристики Вы ожидаете получить?

## ЛИТЕРАТУРА

### Основная

Марков Г. Т., Петров Б. М., Грудинская Г. П. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебное пособие для вузов. — М.: Сов. радио, 1979. — 376 с (для изучения с. 304 — 319).

### Дополнительная

Грудинская Г. П. Распространение радиоволн: Учебное пособие для радиотехнической специальности вузов. — Изд. 2-е. — М.: Высш. школа, 1975, — 280 с. (для изучения с. 38—66, 72—77).

Черенкова Е. Л., Чернышев О. В. Распространение радиоволн: Учебник для вузов связи. "М.: Радио и связь, 1984. — 272 с. (для изучения с. 24 — 36, 144—146).

Г. П. Грудинская, А. С. Зайцев  
Редактор А. И. Гореликов

Лабораторная работа № 2

по курсу

«Электродинамика и распространение радиоволн»

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЯ ИЗЛУЧАТЕЛЯ, РАСПОЛОЖЕННОГО  
ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

(Кафедра антенных устройств и распространения радиоволн)

Технический редактор О. В. Силуянова.

Корректор Л. М. Филиппова.

---

Темплан издания МЭИ 1986 г., поз. 44 (метод.)

Подписано к печати 23.06.1986 г.

Формат бумага 60X84/16

Печ. л. 1,0.

Уч.-изд. л. 0,8.

Тираж 600.

Заказ 1792.

Бесплатно.

---

Типография МЭИ, Красноказарменная, 13