

**Федеральное агентство связи**  
Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение  
высшего профессионального образования  
Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики

**Кафедра электродинамики и антенн**

МЕТОДИЧЕСКАЯ РАЗРАБОТКА  
к лабораторному практикуму по дисциплине

## **ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ И ВОЛНЫ**

### **Часть I**

для студентов, обучающихся по направлениям бакалавриата и специалитета:

- 10.03.01 Информационная безопасность
- 10.05.02 Информационная безопасность телекоммуникационных систем
- 11.03.01 Радиотехника
- 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи
- 12.03.03 Фотоника и оптоинформатика

**Авторы-составители:**

к.т.н., доцент Ружников В.А.  
ассистент Скачков Д.В.

**Самара, 2014**

**УДК 538.3**

**Ружников Вадим Александрович, Скачков Дмитрий Владимирович.**

Методическая разработка к лабораторному практикуму по дисциплине «Электромагнитные поля и волны». Часть I. Самара, 2014.

16 стр. с иллюстрациями.

В методической разработке содержатся указания к выполнению лабораторных работ по исследованию скин-эффекта, прямоугольного волновода, проходного объемного резонатора. Лабораторные работы выполняются на компьютерах, в программе, моделирующей работу устройств СВЧ техники.

## СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №1. Исследование скин-эффекта. ....	4
Лабораторная работа №2. Исследование собственных волн прямоугольного волновода.....	6
Лабораторная работа №3. Исследование вынужденных колебаний в объемном резонаторе .....	9
Лабораторная работа №4. Измерение полных сопротивлений .....	11
ПРИЛОЖЕНИЕ .....	13

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1. «ИССЛЕДОВАНИЕ СКИН-ЭФФЕКТА»

## 1.1. Цель работы

Исследование закономерностей распространения электромагнитных волн в проводящих средах, а также скин-эффекта в проводнике конечных размеров.

## 1.2. Литература

1. Электродинамика и распространение радиоволн: учеб. для вузов / Петров Б.М. - 2-е изд., испр. - М. : Горячая линия-Телеком, 2003. – 558 с.
2. Пименов Ю.В., Вольман В.И., Муравцов А.Д. «Техническая электродинамика» – М.: «Радио и связь», 2000. – 536 с.
3. Семенов Н.А., «Техническая электродинамика» – М.: «Связь», 1973. – 480 с.

## 1.3. Оборудование

Работа выполняется с использованием имитационной модели металлической пластины, находящейся в переменном электромагнитном поле. Толщина пластины фиксирована и составляет  $D = 20$  мм. Рабочая частота  $f = 1$  кГц.

## 1.4. Порядок выполнения работы

1. Выбрать, в качестве материала пластины, медь.
2. Перемещая виртуальный зонд вдоль пластины определить максимальное значение напряженности электрического поля  $E_{max}$ .
3. Перемещая виртуальный зонд вдоль пластины измерить зависимость напряженности поля от координат зонда (расстояние, пройденное волной в материале). Записать полученные результаты в таблицу 1.1.

*Таблица 1.1.*

$x, \text{ мм}$		0,1	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Медь	$E, \text{ мВ/м}$												
	$E/E_{max}$												
Олово	$E, \text{ мВ/м}$												
	$E/E_{max}$												
Латунь	$E, \text{ мВ/м}$												
	$E/E_{max}$												
$x, \text{ мм}$		0,1	0,2	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	1,8	2,1	2,4	2,7	3
Сталь	$E, \text{ мВ/м}$												
	$E/E_{max}$												

4. Повторить п.п.2 и п.п.3 для других материалов (олово, латунь, сталь). Обратите внимание, что координаты зонда  $x$  для стали необходимо изменять в пределах от 0,1 до 3 мм.

5. По полученным данным построить нормированные графики амплитуд напряженностей электрического поля ( $E/E_{max}$ ) в пластинах от расстояния, пройденного волной в материале ( $x$ ).

6. По графикам определить глубину проникновения поля в материал (толщину скин-слоя), рассчитать удельную проводимость материала  $\sigma$  для каждой пластины. Методика определения глубины проникновения поля в материал графическим методом описана в Приложении 1.

$$\sigma = \frac{1}{\pi f \mu \mu_0 \Delta^2},$$

где  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;

$\mu$  – относительная магнитная проницаемость, равна 1 для всех материалов кроме стали,

$\mu_{стали} = 80 \dots 220$ ;

### 1.5. Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Таблица результатов экспериментов.
3. Нормированные графики амплитуд напряженностей электрического поля  $E(x)$  с определением глубины проникновения поля в материал (толщины скин-слоя) для каждого из материалов.
4. Результаты расчета удельной проводимости материалов.
5. Выводы по проделанной работе.

### 1.6. Контрольные вопросы

1. Поле внутри проводника конечных размеров как суперпозиция прошедших волн (на примере пластины конечной толщины).
2. Условия, при которых в проводнике конечных размеров наблюдается скин-эффект.
3. Что называют глубиной проникновения поля в материал (толщиной скин-слоя)?
4. Как определяется глубина проникновения поля в материал (графически и аналитически)?
5. Приближенные граничные условия Шукина-Леонтовича и границы их применимости.
6. Физическая сущность электромагнитного экранирования.
7. Какие параметры экрана определяют эффективность экранирования?
8. Как выбрать эффективную толщину экрана в заданном диапазоне частот?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2. «ИССЛЕДОВАНИЕ СОБСТВЕННЫХ ВОЛН ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОЛНОВОДА»

### 2.1. Цель работы

Исследование частотной зависимости коэффициента затухания волны основного типа в прямоугольном волноводе в режиме отсечки (запредельный волновод). Исследование частотной зависимости длины волны основного типа в прямоугольном волноводе.

### 2.2. Литература

1. Электродинамика и распространение радиоволн: учеб. для вузов / Петров Б.М. - 2-е изд., испр. - М. : Горячая линия-Телеком, 2003. – 558 с.
2. Пименов Ю.В., Вольман В.И., Муравцов А.Д. «Техническая электродинамика» – М.: «Радио и связь», 2000. – 536 с.
3. Семенов Н.А., «Техническая электродинамика» – М.: «Связь», 1973. – 480 с.

### 2.3. Оборудование

Лабораторная работа выполняется на ЭВМ, в программе, моделирующей работу участка прямоугольного волновода. В работе используются виртуальные: генератор, участок прямоугольного волновода, измерительный зонд, миллиамперметр.

### 2.4. Порядок выполнения работы

1. Установить частоту генератора  $f = 5 \text{ ГГц}$ . Перемещая зонд вдоль измерительной линии, снять зависимость напряженности электрического поля от пройденного по волноводу пути  $x = x_0 - x_3$  ( $x_0$  – координата, соответствующая началу волновода 40 мм,  $x_3$  – координата измерительного зонда). Измерения следует производить до тех пор, пока напряженность поля не уменьшится в 10 раз от максимального значения. Записать значения в таблицу 2.1.

2. Повторить измерения п.1. для частот  $f = 5,5; 6; 6,5 \text{ ГГц}$ , записывая значения для каждой из частот в таблицу 2.1

Таблица 2.1.

$x_3, \text{ мм}$									
$x, \text{ мм}$									
$I, \text{ мкА}$									
$E \approx \sqrt{I}$									

3. Построить зависимость напряженности электрического поля  $E(x)$  от пути, пройденного волной вдоль волновода в режиме отсечки на каждой из частот п.п.1. и п.п.2.

4. По полученным распределениям амплитуды электрического поля  $E_0$  на каждой частоте определить графически коэффициент затухания  $\alpha_{\varnothing}(f)$  и построить его зависимость от частоты.

**Примечание:** в версии программы ниже v.2.2, разработчиком программы допущена ошибка, вследствие которой экспериментально полученные величины коэффициента затухания в 10 раз больше, чем должны быть. Учитывайте это при расчетах, полученные экспериментально значения коэффициента затухания нужно уменьшить в 10 раз.

5. Для каждой из частот аналитически рассчитать коэффициент затухания для волны основного типа в запердельном волноводе и построить частотную зависимость  $\alpha_A(f)$  на том же графике, что и экспериментальную. Размеры волновода  $23 \times 10$  мм.

$$\alpha_A(f) = -\frac{2\pi i}{\lambda_{кр}} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}, \text{ где}$$

$i$  – мнимая единица,

$\lambda$  – длина волны в свободном пространстве,

$\lambda_{кр}$  – критическая длина волны основного типа прямоугольного волновода.

6. На частотах, указанных в таблице 2.2 измерить длину волны основного типа в прямоугольном волноводе. Методика определения длины волны в волноводе графическим методом описана в приложении. Записать значения для каждой частоты в таблицу 2.2.

Таблица 2.2.

$f, ГГц$	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5	13,0
$x_1, мм$									
$x_2, мм$									
$\Lambda_{\varnothing}(f)$									

7. По экспериментальным результатам построить зависимость длины волны в волноводе от частоты  $\Lambda_{\varnothing}(f)$ :

$$\Lambda_{\varnothing}(f) = 2 \cdot |x_2 - x_1|.$$

8. Для каждой из экспериментальных частот аналитически рассчитать длину волны  $H_{10}$  и построить частотную зависимость  $\Lambda_A(f)$  на том же графике, что и экспериментальную. Размеры волновода  $23 \times 10$  мм.

$$\Lambda_A(f) = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_{кр}}\right)^2}}, \text{ где } \lambda \text{ – длина волны в свободном пространстве,}$$

$\lambda_{кр}$  – критическая длина волны основного типа прямоугольного волновода.

## **2.5. Содержание отчета**

1. Название и цель работы.
2. Краткое описание и схема каждого из экспериментов.
3. Таблицы результатов каждого из экспериментов.
4. Графики распределения амплитуды поля в запердельном волноводе с построениями, необходимыми для расчета коэффициента затухания волны.
5. Расчет коэффициентов затухания волны в запердельном режиме.
6. Графики теоретической и экспериментальной зависимостей коэффициента затухания от частоты.
7. Графики теоретической и экспериментальной зависимостей длины волны в волноводе от частоты.
8. Выводы по проделанной работе.

## **2.6. Контрольные вопросы**

1. Прямоугольный волновод и его особенности.
2. Собственные волны прямоугольного волновода и их классификация.
3. Структуры полей электрических и магнитных волн в прямоугольном волноводе.
4. Постоянная распространения, поперечное волновое число и фазовая скорость собственных волн прямоугольного волновода.
5. Критическая частота для разных типов волн.
6. Коэффициент затухания в прямоугольном волноводе.
7. Длина волны, фазовая и групповая скорости собственных волн прямоугольного волновода и их зависимость от частоты.
8. Что называется запердельным волноводом? Структура электромагнитного поля в запердельном волноводе.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 «ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ В ОБЪЕМНОМ РЕЗОНАТОРЕ»

## 3.1. Цель работы

Исследование методик экспериментального определения нагруженной добротности объемного резонатора.

## 3.2. Литература

1. Электродинамика и распространение радиоволн: учеб. для вузов / Петров Б.М. - 2-е изд., испр. - М. : Горячая линия-Телеком, 2003. – 558 с.
2. Пименов Ю.В., Вольман В.И., Муравцов А.Д. «Техническая электродинамика» – М.: «Радио и связь», 2000. – 536 с.
3. Семенов Н.А., «Техническая электродинамика» – М.: «Связь», 1973. – 480 с.

## 3.3. Оборудование

Лабораторная работа выполняется на ЭВМ, в программе, моделирующей работу проходного объемного резонатора: В работе используются виртуальные: генератор, проходной прямоугольный резонатор, измерительный зонд, миллиамперметр.

## 3.4. Порядок выполнения работы

1. Выбрать на имитационном макете резонатор с высокой добротностью. Изменяя частоту генератора, определить резонансную частоту  $f_0$  одноволнового режима по максимуму показаний микроамперметра.
2. Изменяя частоту с шагом 0,005 ГГц (4 шага в каждую сторону от резонансной частоты), снять зависимость мощности на выходе резонатора от частоты. Записать результаты измерения в таблицу 3.1.

*Таблица 3.1.*

$f$ , ГГц					$f_0$				
$I_0$ , мкА									
$P \approx I^2$									
$P/P_{max}$									
$10 \lg(P/P_{max})$									

3. Повторить п.п.1 и п.п.2 для других добротностей (средней, низкой).
4. Для всех добротностей построить графики зависимости мощности на выходе резонатора от частоты. Учитывая специфику измеренных величин, графики удобнее строить в логарифмическом масштабе.

5. По полученным графикам определить частоты расстроек по половинной мощности для каждой добротности и рассчитать нагруженные добротности резонатора.

$$Q = \frac{f_0}{2\Delta f_{0,5}}, \text{ где } 2\Delta f_{0,5} = |f_1 - f_2|.$$

**Примечание:** Методика определения  $2\Delta f_{0,5}$  изложена в Приложении 1.

### 3.5. Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Краткое описание и схема эксперимента.
3. Таблица результатов эксперимента.
4. Графики зависимости мощности на выходе резонатора от частоты с необходимыми построениями для расчетов нагруженной добротности.
5. Расчеты нагруженных добротностей резонатора.
6. Выводы по проделанной работе.

### 3.6. Контрольные вопросы

1. Понятие объемного резонатора. Общие свойства резонаторов.
2. Понятие проходного резонатора.
3. Условия существования колебаний в проходном прямоугольном резонаторе.
4. Собственные колебания объемного резонатора и их связь с собственными волнами линии передачи. Типы колебаний. Основной тип колебаний.
5. Потери в резонаторе. Виды потерь и добротность резонатора
6. Проходной прямоугольный резонатор. Типы собственных колебаний, собственные частоты прямоугольного резонатора. Вырожденные колебания.
7. Классификация типов колебаний проходного прямоугольного резонатора. Основной тип колебаний.
8. Нагруженная добротность резонатора и метод ее экспериментального определения.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4. «ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ»

### 4.1. Цель работы

Исследование методик экспериментального определения полного сопротивления нагрузки по коэффициенту стоячей волны (КСВ) и фазовому сдвигу.

### 4.2. Литература

1. Электродинамика и распространение радиоволн: учеб. для вузов / Петров Б.М. - 2-е изд., испр. - М. : Горячая линия-Телеком, 2003. – 558 с.
2. Пименов Ю.В., Вольман В.И., Муравцов А.Д. «Техническая электродинамика» – М.: «Радио и связь», 2000. – 536 с.
3. Семенов Н.А., «Техническая электродинамика» – М.: «Связь», 1973. – 480 с.

### 4.3. Оборудование

Лабораторная работа выполняется на ЭВМ, в программе, моделирующей работу отрезка волноводной линии с подключенной нагрузкой. В работе используются виртуальный генератор, участок волноводной линии, показательный прибор (миллиамперметр).

### 4.4. Порядок выполнения работы

1. Включите приборы, на генераторе установите частоту, указанную преподавателем, установите характер нагрузки «Замыкание».
2. Измерьте длину волны, распространяющейся по волноводной линии (см. Приложение) и определите положение опорной плоскости ( $x_{on}$  – координату ближайшего к нагрузке минимума).
3. Установите зонд в опорную плоскость, и сдвигая его в направлении генератора (от нагрузки) произведите 10 измерений тока с шагом  $\lambda / 40$ . Заполните таблицу 4.1.

Таблица 4.1.

$x-x_{on}, \text{ мм}$	$0$	$\frac{\lambda}{40}$	$\frac{2\lambda}{40}$	$\frac{3\lambda}{40}$	$\frac{4\lambda}{40}$	$\frac{5\lambda}{40}$	$\frac{6\lambda}{40}$	$\frac{7\lambda}{40}$	$\frac{8\lambda}{40}$	$\frac{9\lambda}{40}$	$\frac{10\lambda}{40}$
$I, \text{ мкА}$											
$\sqrt{I}$											
$\sin k(x-x_{on})$											

4. Постройте график зависимости  $\sqrt{I}$  от  $\sin k(x-x_{on})$  и определите по нему область квадратичности характеристики детекторного диода измерительной линии.

5. Установите характер нагрузки «Малый КСВ». Произведите измерение КСВ ( $\rho$ ) по методу максимума-минимума. Определите расстояние от опорной плоскости до ближайшего минимума в сторону генератора ( $d$ ).

6. Установить характер нагрузки «Большой КСВ» Произведите измерение КСВ ( $\rho$ ) по методу исследования поля вблизи минимума. Определите расстояние от опорной плоскости до ближайшего минимума в сторону генератора ( $d$ ).

7. Произведите расчет полных сопротивлений для устройств с малым и большим КСВ.

**Примечание:** Методики измерения КСВ приведены в Приложении 1.

#### 4.5. Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Краткое описание и схема эксперимента.
3. Таблица результатов эксперимента.
4. График определения области квадратичности детекторного диода.
5. Расчеты КСВ и полных сопротивлений устройств.
6. Выводы по проделанной работе.

#### 4.6. Контрольные вопросы

1. Отраженные волны в направляющих системах. Коэффициент отражения.
2. Возникновение стоячих волн и их свойства.
3. КСВ, КБВ их связь с коэффициентом отражения.
4. Полное сопротивление нагрузки, влияние характера нагрузки на картину поля стоячей волны.
5. Измерительная линия – устройство и принцип работы.
6. Детекторный диод. Нелинейность детекторного диода измерительной линии.
7. Поглощающая нагрузка – устройство и принцип работы.
8. Согласование элементов СВЧ тракта.

### Определение глубины проникновения поля в материал (направляющую систему)

Для определения глубины проникновения поля в материал требуется на графике зависимости напряженности электрического поля от расстояния, пройденного волной в материале/направляющей системе (рис.П.1), провести горизонталь на уровне  $E_{max}/e = 0,37E_{max}$ .

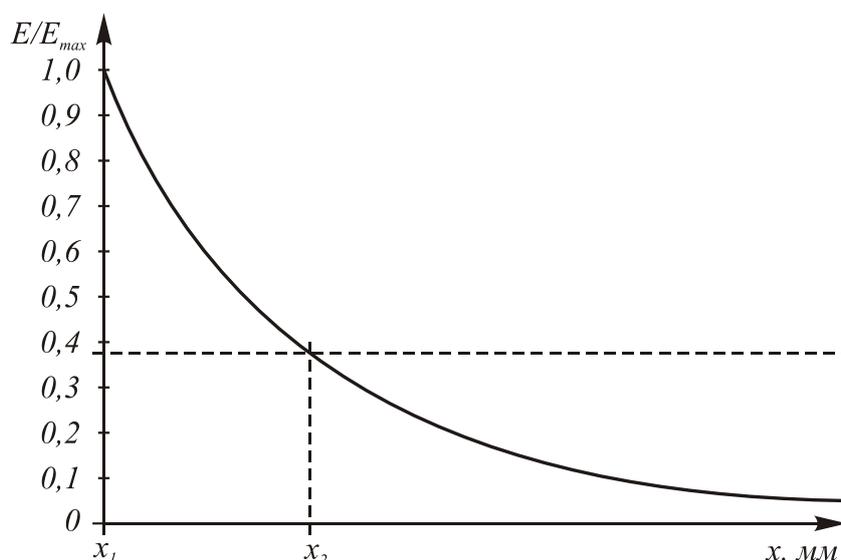


Рис.П.1. Зависимость напряженности электрического поля от расстояния, пройденного волной в материале/направляющей системе.

Из точки пересечения горизонтали с кривой напряженности электрического поля опускается перпендикуляр на ось  $x$ . Глубина проникновения ( $\Delta$ ) определяется как разность между координатой  $x_1$  в точке  $E_{max}$  и координатой  $x_2$  в точке  $0,37E_{max}$ .

Коэффициент затухания определяется как величина, обратная глубине проникновения поля в материал/направляющую систему ( $\Delta$ ).

### Определение длины волны в направляющей системе

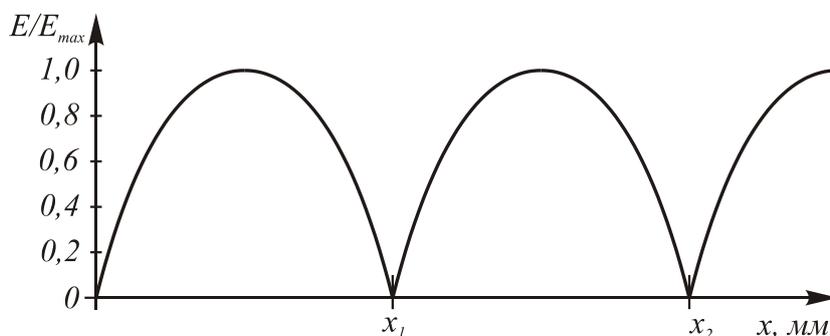


Рис. П.2. Зависимость напряженности электрического поля от координаты измерительного зонда.

Для определения длины волны в прямоугольном волноводе требуется найти координаты  $x_1$  и  $x_2$  двух соседних минимумов напряженности электрического поля (рис.П.2). Модуль их разницы будет равен половине длины волны  $\Delta x = |x_1 - x_2|$ .

Следовательно, длина волны  $\Lambda_{\varnothing} = 2\Delta x$ .

### Определение расстройки по половинной мощности

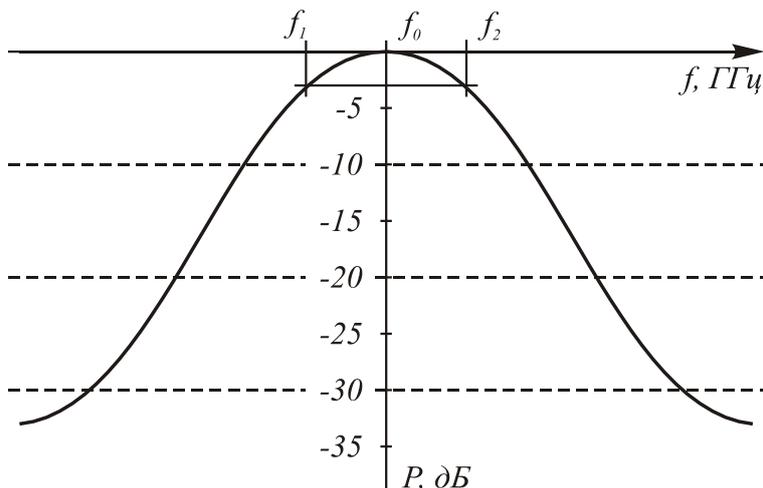


Рис. П.3. Зависимость выходной мощности проходного резонатора от частоты.

Для определения расстройки по половинной мощности требуется на графике зависимости выходной мощности резонатора от частоты (рис. П.3.) провести горизонталь на уровне  $0,5P_{max}$  ( $-3$  дБ, если график построен в логарифмическом масштабе).

Из точек пересечения горизонтали с кривой выходной мощности резонатора опускаются перпендикуляры на ось частоты ( $f$ ), при этом определяются две частоты  $f_1$  и  $f_2$ . Расстройка по половинной мощности определяется как модуль разности этих частот  $2\Delta f_{0,5} = |f_1 - f_2|$ .

### Определение области квадратичности детекторного диода

Для определения области квадратичности детекторного диода требуется построить график зависимости  $\sqrt{I}$  от  $\sin k(x-x_{on})$ . по построенному графику визуально определяются два значения  $\sqrt{I_{min}}$  и  $\sqrt{I_{max}}$  соответствующие границам линейного участка графика (рис. П.5.).

Возведя найденные значения в квадрат, можно получить минимальное и максимальное значение токов, при которых характеристика детекторного диода квадратичная (область квадратичности).

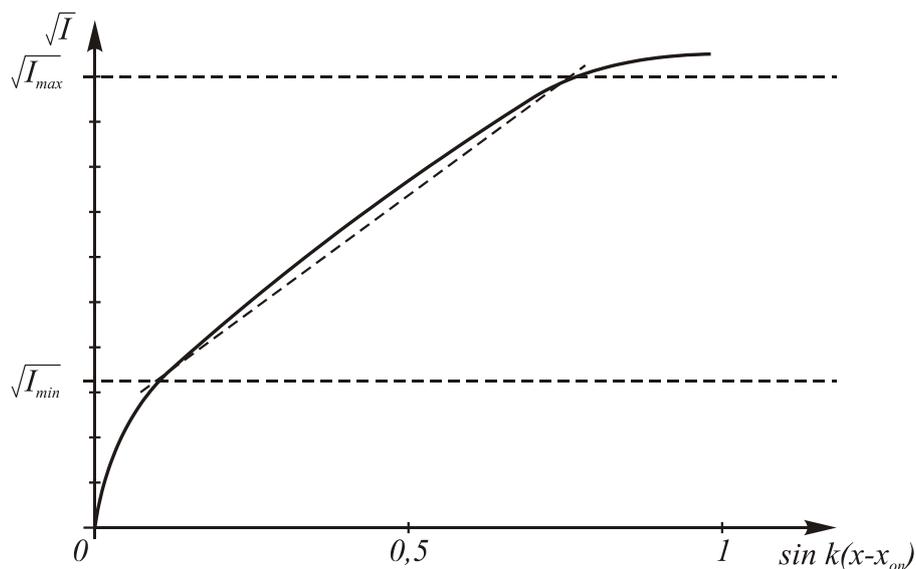


Рис.П.5. Определение области квадратичности детекторного диода.

### Измерение КСВ по методу максимума-минимума

Метод максимума-минимума используется только в случае, когда минимальное и максимальное показания миллиамперметра лежат в области квадратичности детекторного диода.

Для измерения КСВ устройства по методу малых ослаблений следует найти максимальное и минимальное показания миллиамперметра. Учитывая квадратичность детекторного диода, КСВ можно рассчитать как квадратный корень отношения максимального тока к минимальному.

$$\rho = \sqrt{\frac{I_{\max}}{I_{\min}}};$$

### Измерение КСВ по методу исследования поля вблизи минимума

Метод исследования поля вблизи минимума используется в случае, когда минимальное показание миллиамперметра оказывается меньше нижней границы области квадратичности детекторного диода.

Для измерения КСВ устройства по методу больших ослаблений следует выбрать два тока  $I_1$  и  $I_2$ , так чтобы их значения были в области квадратичности детекторного диода.

Необходимо определить координаты  $x'_1$  и  $x''_1$  в окрестностях минимума, где показания миллиамперметра принимают значение  $I_1$ , и координаты  $x'_2$  и  $x''_2$  в окрестностях минимума, где показания миллиамперметра принимают значение  $I_2$  (рис.П.4.).

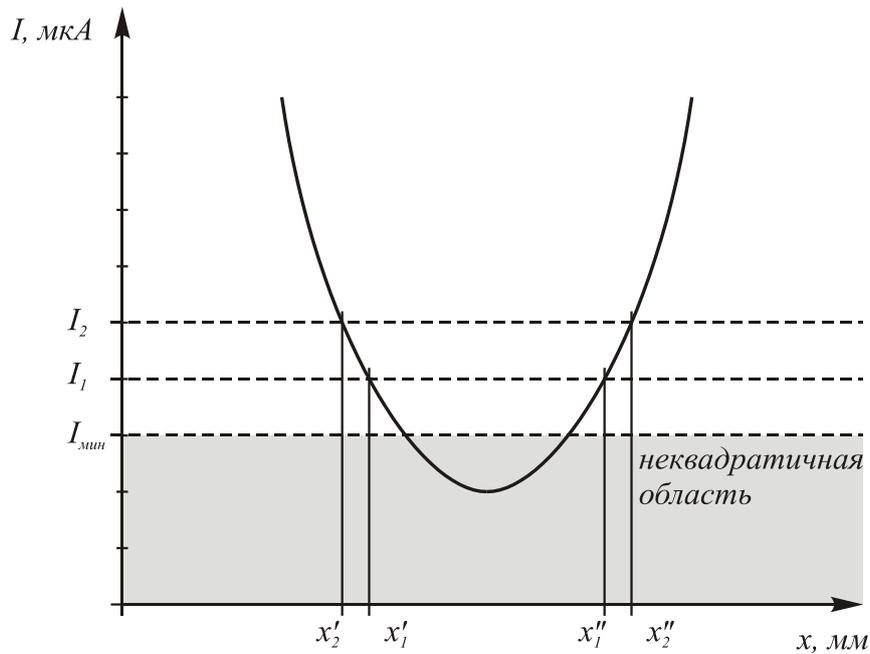


Рис.П.4. Измерение КСВ методом больших ослаблений.

Рассчитать КСВ устройства можно по формуле:

$$\rho = \sqrt{\frac{I_1/I_2 \cos^2 k\Delta x_2 - \cos^2 k\Delta x_1}{\sin^2 k\Delta x_1 - I_1/I_2 \sin^2 k\Delta x_2}},$$

где  $\Delta x_1 = |x'_1 - x''_1|/2$ ,  
 $\Delta x_2 = |x'_2 - x''_2|/2$ .

### Расчет полного сопротивления нагрузки.

Для расчета полного сопротивления нагрузки необходимо предварительно измерить коэффициент стоячей волны ( $\rho$ ) и расстояние от опорной плоскости до ближайшего минимума в сторону генератора ( $d$ ). Полное сопротивление нагрузки рассчитывается по формуле:

$$Z_n = Z_0 \frac{\rho}{\rho^2 \cos^2 kd + \sin^2 kd} - iZ_0 \frac{(\rho^2 - 1) \sin kd \cos kd}{\rho^2 \cos^2 kd + \sin^2 kd},$$

где  $Z_0 = 50$  Ом – волновое сопротивление измерительной линии;  
 $k$  – волновое число.