

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна

Должность: проректор по учебной работе

Дата подписания: 05.08.2023 12:11:11

Уникальный программный ключ:

0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eab0f754943d14a4851fda56d089

## МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра космического приборостроения и систем связи

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

О.Г. Локтионова

2023 г.



## ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ И УПРАВЛЕНИЕ РАДИОЧАСТОТНЫМ СПЕКТРОМ

Методические указания  
по выполнению лабораторных работ  
для студентов, обучающихся по направлению подготовки  
11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»  
по дисциплине «Теория электромагнитной совместимости и  
управление радиочастотным спектром»

Курск 2023

УДК 654:004.7 (075.8)

Составители: И.Е. Мухин, Д.С. Коптев

Рецензент

Доктор технических наук, старший научный сотрудник,  
заведующий кафедрой космического приборостроения и систем связи  
*В. Г. Андронов*

**Теория электромагнитной совместимости и управление радиочастотным спектром: методические указания по выполнению лабораторных работ / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: И.Е. Мухин, Д.С. Коптев. – Курск, 2023. – 35 с.**

Методические указания по выполнению лабораторных работ содержат краткие теоретические сведения о методах решения прикладных задач теории электромагнитной совместимости и управления радиочастотным спектром, задания для выполнения работ, а также перечень вопросов для самопроверки изучаемого материала.

Методические указания соответствуют учебному плану по направлению подготовки 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», а также рабочей программе дисциплины «Теория электромагнитной совместимости и управление радиочастотным спектром».

Предназначены для студентов, обучающихся по направлению подготовки 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», очной и заочной форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 23.08.2023. Формат 60x841/16.

Усл. печ. л. 2,03. Уч.-изд. л. 1,84. Тираж 100 экз. Заказ 771. Бесплатно

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

## Содержание

Лабораторная работа № 1. Расчет суммарного коэффициента усиления антенны мешающей станции и станции реципиента .....	4
Лабораторная работа № 2. Определение величины защитного отношения на входе телевизионного приемника.....	8
Лабораторная работа № 3. Определение требуемого защитного отношения для радиоприемника при воздействии мешающего сигнала с известными параметрами .....	11
Лабораторная работа № 4. Определение эталонной диаграммы направленности для основной и кроссполяризации.....	13
Лабораторная работа № 5. Прогнозирование взаимных электромагнитных помех в системе и определение комбинаций источник - помеха, рецептор - помеха.....	18
Лабораторная работа № 6. Составление матрицы помех. Отбор пар по амплитуде. Отбор по частоте.....	21
Лабораторная работа № 7. Учет помех при распространении электромагнитного поля.....	25
Лабораторная работа № 8. Улучшение ЭМС за счет пространственного и поляризационного разделения сигналов.....	28
Лабораторная работа № 9. Обеспечение ЭМС с помощью поляризационного разделения сигналов.....	33
Список литературы, рекомендуемой для подготовки к лабораторным занятиям.....	35

## Лабораторная работа № 1

### Расчет суммарного коэффициента усиления антенны мешающей станции и станции - реципиента

#### 1 Цель работы:

- освоение методики расчёта суммарного коэффициента усиления антенны мешающей станции и станции реципиента.

#### 2 Краткие теоретические сведения

Расчитать суммарный коэффициент усиления антенн мешающей станции и станции-реципиента в тракте распространения магистральной связи для помеховой ситуации, указанной на рисунке 1. Приняты следующие значения углов взаимодействия станций  $\varphi_t = 20^\circ$ ;  $\varphi_r = 120^\circ$  и зависимости коэффициентов усиления антенн, показанных на рисунках 2 и 3.

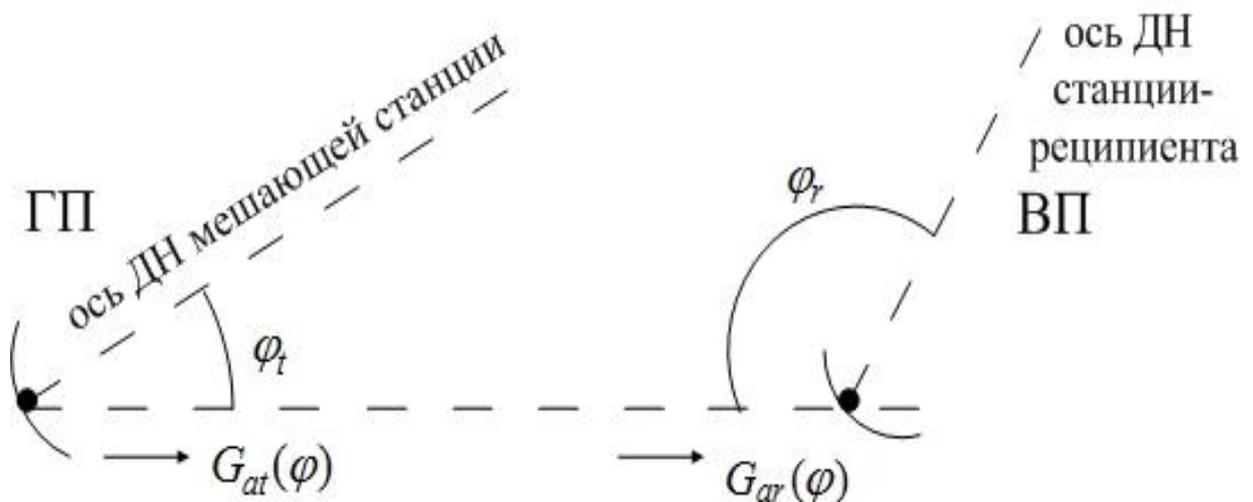


Рисунок 1 – Помеховая ситуация в тракте магистральной связи

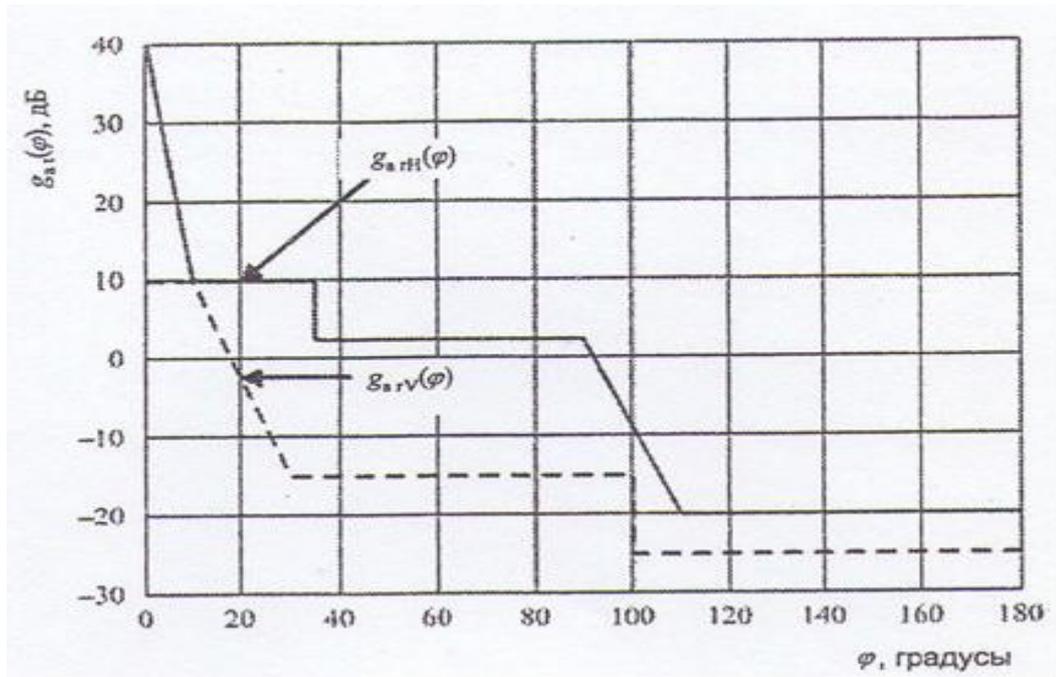


Рисунок 2 – Пример зависимости коэффициента усиления передающей антенны мешающей станции для основной и кроссполяризации

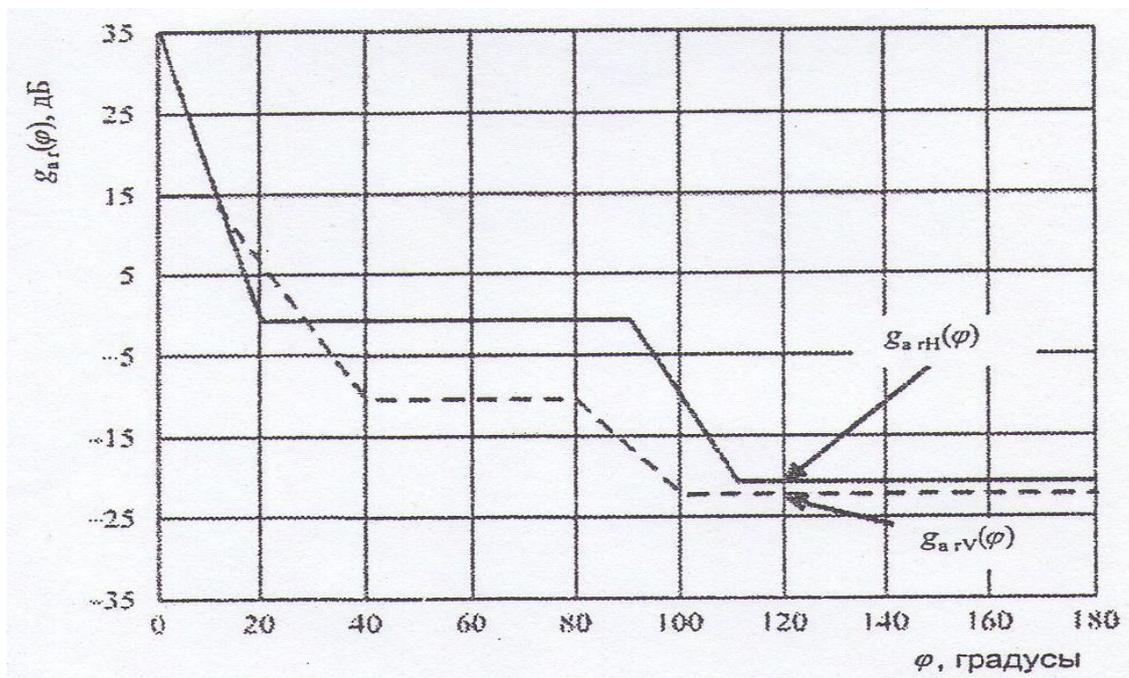


Рисунок 3 – Пример зависимости коэффициента усиления приемной антенны станции-реципиента для основной и кроссполяризации

Из рисунков 2 и 3 получены следующие показатели рассматриваемой помеховой ситуации:

1) Коэффициент усиления мешающей станции с основной (горизонтальной) поляризацией при угле  $\varphi_{at} = 20^\circ$  равен 10 дБ;

2) Коэффициент усиления антенны реципиента с основной поляризацией (вертикальной) при угле  $\varphi_r = 120^\circ$  равен - 22 дБ;

3) Коэффициент усиления антенны мешающей станции с кроссполяризацией при угле взаимодействия  $\varphi = 20^\circ$  равен - 2 дБ;

4) Коэффициент усиления антенны станции реципиента с кроссполяризацией при угле взаимодействия  $\varphi = 120^\circ$  равен - 20 дБ;

Суммарный коэффициент усиления антенн мешающей станции и станции-реципиента в тракте распространения мешающего сигнала для помеховой ситуации рассчитывается по формуле (1):

$$G_{At}(\varphi_t) + G_{Ar}(\varphi_r) = 10 \lg \left[ 10^{\frac{G_{AtH}(\varphi_t) + G_{ArV}(\varphi_r)}{10}} + 10^{\frac{G_{AtV}(\varphi_t) + G_{ArH}(\varphi_r)}{10}} \right] \quad (1)$$

Подставив полученные значения в формулу (1), имеем:

$$G_{At}(\varphi_t) + G_{Ar}(\varphi_r) = 10 \lg \left[ 10^{\frac{10-22}{10}} + 10^{\frac{-2-20}{10}} \right] = -11,6 \text{ дБ}$$

Согласно теореме взаимности, результат взаимного вычисления коэффициента усиления не изменится при перемене передающей и приемной антенн.

Если антенны мешающей станции и станции-реципиента работают на совпадающих поляризациях, расчетное соотношение для помеховой ситуации имеет вид (2):

$$G_{At}(\varphi_t) + G_{Ar}(\varphi_r) = 10 \lg \left[ 10^{\frac{G_{AtH}(\varphi_t) + G_{ArH}(\varphi_r)}{10}} + 10^{\frac{G_{AtV}(\varphi_t) + G_{ArV}(\varphi_r)}{10}} \right] \quad (1)$$

Для случая, аналогичного, но для совпадающих поляризаций, исходя из (2), имеем:

$$G_{At}(\varphi_t) + G_{Ar}(\varphi_r) = 10 \lg \left[ 10^{\frac{10-20}{10}} + 10^{\frac{-22-2}{10}} \right] = -9,6 \text{ дБ}$$

Последний результат говорит о том, что при совпадающих поляризациях, электромагнитная обстановка хуже.

### 3 Задание на лабораторную работу

Рассчитайте суммарный коэффициент усиления антенны мешающей станции и станции реципиента при следующих исходных данных:

- 1) Коэффициент усиления мешающей станции с основной (горизонтальной) поляризацией при угле  $\varphi_{at} = 50^\circ$  равен 15 дБ;
- 2) Коэффициент усиления антенны реципиента с основной поляризацией (вертикальной) при угле  $\varphi_r = 70^\circ$  равен - 12 дБ;
- 3) Коэффициент усиления антенны мешающей станции с кроссполяризацией при угле взаимодействия  $\varphi = 20^\circ$  равен - 2 дБ;
- 4) Коэффициент усиления антенны станции реципиента с кроссполяризацией при угле взаимодействия  $\varphi = 110^\circ$  равен - 30 дБ;

### 4 Контрольные вопросы

- 1) Приведите расчетное соотношение для оценки помеховой ситуации антенны мешающей станции и станции-реципиента, работающих на совпадающих поляризациях.
- 2) Дайте определение понятию станции-реципиента.
- 3) Что такое кроссполяризация?

## Лабораторная работа № 2

### Определение величины защитного отношения на входе телевизионного приемника

Цель работы:

- освоение методики определения величины защитного отношения на входе телевизионного приемника;

#### 2 Краткие теоретические сведения

Рассмотрим методику определения величины защитного отношения на входе телевизионного приемника на конкретном примере.

Пример: определить требуемую величину защитного отношения на входе ТВ приемника, работающего в 5-м телевизионном канале, если на его вход поступает мешающий ОВЧ-ЧМ сигнал радиостанции на частоте 95 МГц.

Рассмотрим частоты каналов видео и звука в Российской Федерации (таблица 1).

Таблица 1 – Частоты каналов в РФ

№	Частота видео, МГц	Частота звука, МГц
1	49,75	56,25
2	59,25	65,75
3	77,25	83,75
4	85,25	91,75
5	93,25	99,75
6	175,25	181,75
7	183,25	189,75
8	191,25	197,75
9	199,25	205,75
10	207,25	213,75
11	215,25	221,75
12	223,25	229,75

Определим несущую частоту радиосигнала изображения в 5-м телевизионном канале. Несущая частота радиосигнала

изображения в 5-м ТВ-канале равна 93,25 МГц. Частотная расстройка между несущим (полезным ТВ) сигналом и мешающим сигналом равна:

$$95 - 93,25 = 1,75 \text{ МГц}$$

Для этого значения расстройки по графикам рисунка 4 величина защитного отношения, которое обеспечивает хорошее качество изображения, должна быть  $\geq 55$  дБ.

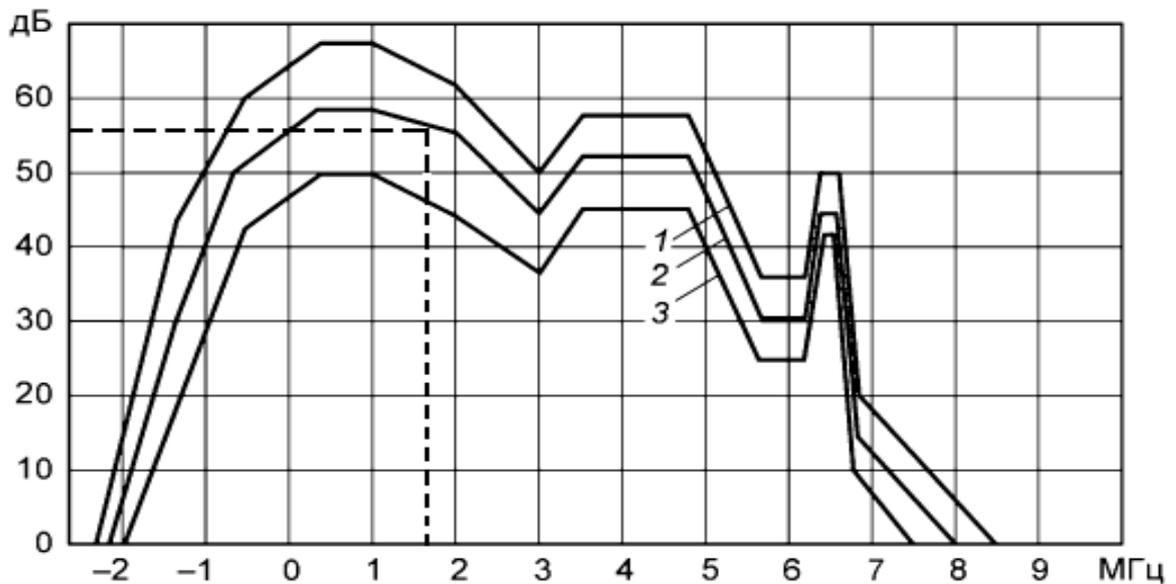


Рисунок 4 – Нормы на защитные отношения для системы SECAM К, D при помехе от гармонического колебания или ЧМ радиосигнала звука

На рисунке 4 приняты следующие обозначения:

- 1 – порог заметности;
- 2 – хорошее качество;
- 3 – удовлетворительное качество;

### 3 Задание на лабораторную работу

1) Определить требуемую величину защитного отношения на входе ТВ приемника, работающего в 12-м телевизионном канале, если на его вход поступает мешающий ОВЧ-ЧМ сигнал радиостанции на частоте 225 МГц.

2) Определить требуемую величину защитного отношения на входе ТВ приемника, работающего в 7-м телевизионном канале, если на его вход поступает мешающий ОВЧ-ЧМ сигнал радиостанции на частоте 190 МГц.

3) Определить требуемую величину защитного отношения на входе ТВ приемника, работающего в 1-м звуковом канале, если на его вход поступает мешающий ОВЧ-ЧМ сигнал радиостанции на частоте 55 МГц.

#### 4 Контрольные вопросы

- 1) Дайте определение защитного отношения.
- 2) Как изменится алгоритм действий по определению требуемой величины защитного отношения на входе ТВ приемника, если частотная расстройка окажется отрицательной?

## Лабораторная работа № 3

### Определение требуемого защитного отношения для радиоприемника при воздействии мешающего сигнала с известными параметрами

#### 1 Цель работы

- освоение методики расчета требуемого защитного отношения для радиоприемника при воздействии мешающего сигнала с известными параметрами

#### 2 Краткие теоретические сведения

Нормированная спектральная плотность мощности мешающего радиосигнала, модулированного по фазе цифровым сигналом, определяется выражением:

$$W(f) = \left( \frac{1}{\beta \cdot R} \right) \cdot \left( \frac{\sin x}{x} \right)^2, \text{ 1/Гц}$$

где  $x = \pi \cdot F$ ;

$$F = f_0 - f;$$

$\beta = 0,5$  для модуляции 4-ФМ;

$R$  – скорость цифрового потока.

Относительная доля мощности мешающего сигнала, попадающая в полосу пропускания канала системы ОКН определяется по формуле:

$$\delta_{ОКН} = \frac{P_{мвх}}{P_{мвх}} = \Delta f_{ОКН} \cdot W(f_0)$$

Определим требуемое защитное отношение для приемника ОКН, на вход которого поступает полезный сигнал с параметрами: скорость цифрового потока  $R_1 = 64$  кбит/с, тип модуляции несущей – 4-ФМ, ширина полосы пропускания канала  $\Delta f_{ОКН} = 38$  кГц. Мешающий сигнал имеет следующие параметры: скорость цифрового потока  $R_2 = 40$  Мбит/с, тип модуляции несущей – 4-ФМ. Несущие частоты полезного и мешающего сигналов совпадают.

Для решения вышеописанной задачи первоначально определяем нормированную спектральную плотность мощности

мешающего сигнала на средней частоте полезного сигнала по формуле:

$$W(f_0) = \frac{1}{\beta \cdot R_2} = \frac{1}{0,5 \cdot 40 \cdot 10^6}; 1/\text{Гц}$$

Относительная доля мощности мешающего сигнала, попадающая в полосу пропускания канала системы ОКН составляет:

$$\delta_{\text{ОКН}} = \frac{3,8 \cdot 10^3}{0,5 \cdot 40 \cdot 10^6} = 1,9 \cdot 10^{-3}$$

Мощность широкополосной помехи на выходе узкополосного канального фильтра приемника системы ОКН ослабляется в:

$$\frac{1}{\delta_{\text{ОКН}}} = \frac{10^3}{1,9} \approx 526,3 \text{ раза или } 27,2 \text{ дБ}$$

по сравнению с мощностью на входе.

Требуемое защитное отношение в этом случае определяется по формуле:

$$q_{\text{мдоп}} = 30,6 + 10 \lg \left( \frac{\Delta f_{\text{ОКН}}}{\beta \cdot R_2} \right)$$

Подставив необходимые данные в формулу, получим:

$$q_{\text{мдоп}} = 30,6 - 27,2 = 3,4 \text{ дБ}$$

### 3 Задание на лабораторную работу

Определить требуемое защитное отношение для приемника ОКН, на вход которого поступает полезный сигнал с параметрами: скорость цифрового потока  $R_1 = 100$  кбит/с, тип модуляции несущей – 4-ФМ, ширина полосы пропускания канала  $\Delta f_{\text{ОКН}} = 56$  кГц. Мешающий сигнал имеет следующие параметры: скорость цифрового потока  $R_2 = 70$  Мбит/с, тип модуляции несущей – 8-ФМ. Несущие частоты полезного и мешающего сигналов совпадают.

### 4 Контрольные вопросы

1) Дайте определение нормированной спектральной плотности мощности.

2) Как изменится алгоритм действий по определению требуемой величины защитного отношения для приемника ОКН, если частоты полезного и мешающего сигналов не совпадут?

## Лабораторная работа № 4

### Определение эталонной диаграммы направленности для основной и кроссполяризации

#### 1 Цель работы:

- получение навыков расчета эталонной диаграммы направленности для основной и кроссполяризации.

#### 2 Краткие теоретические сведения

Рассмотрим пример. Требуется определить эталонную диаграмму направленности для основной и кроссполяризации. Диаметр антенны 60 см; назначение – радиовещательная спутниковая служба (РСС), рабочая частота – 11,7 ГГц. Коэффициент использования поверхности КИП = 0,65.

Решение.

1) По заданной рабочей частоте рассчитывается значение длины волны в см:

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{11,7 \cdot 10^9} = 0,0256 \text{ м} = 2,56 \text{ см}$$

2) Определяется соотношение:

$$\frac{d}{\lambda} = \frac{60}{2,56} = 23,4$$

3) Проверяется соотношение

$$\frac{d}{\lambda} > 11$$

4) Общая эталонная диаграмма направленности приемной земной станции (ЗС) радиовещательной спутниковой системы в полосе частот 11,7 – 12,75 ГГц описывается выражениями (5) и (6), справедливыми для  $\frac{d}{\lambda} > 11$ .

Для основной поляризации выражение имеет вид:

$$F^2(\varphi) = \begin{cases} -2,5 \cdot 10^{-3} \left( \frac{d_a \cdot \varphi}{\lambda^2} \right), & \text{при } 0 \leq \varphi \leq \varphi_m; \\ G_{A1} - G_{A\max}, & \text{при } \varphi_m \leq \varphi < \varphi_2; \\ 29 - 25 \lg \varphi - G_{A\max}, & \text{при } \varphi_2 \leq \varphi < \varphi_0; \\ -5 - G_{A\max}, & \text{при } \varphi_6 \leq \varphi < 70^\circ; \\ -G_{A\max}, & \text{при } 70^\circ \leq \varphi < 180^\circ; \end{cases}$$

$$\text{где } \varphi_m = \frac{\lambda}{d_a} \sqrt{\frac{G_{A\max} - G_{A1}}{0,0025}};$$

$$G_{A\max} = 10 \lg \left[ k_{\text{КПП}} \cdot \left( \frac{\pi \cdot d_a}{\lambda} \right)^2 \right];$$

$$G_{A1} = 29 - 25 \lg \varphi_2;$$

$$\varphi_2 = 95 \cdot \frac{\lambda}{d_a};$$

$$\varphi_6 = 10^{(34/25)};$$

$k_{\text{КПП}}$  – КИП антенны.

Для кроссполяризации выражение имеет вид:

$$F^2(\varphi) = \begin{cases} -25, & \text{при } 0 \leq \varphi < \varphi_{0,5}; \\ -25 + 8 \left( \frac{\varphi - 0,25 \cdot \varphi_{0,5}}{0,19 \cdot \varphi_{0,5}} \right) - G_{A\max}, & \text{при } 0,25 \varphi_{0,5} \leq \varphi < 0,44 \varphi_{0,5}; \\ -17, & \text{при } 0,44 \varphi_{0,5} \leq \varphi < \varphi_{0,5}; \\ -17 + c \left| \frac{\varphi - \varphi_{0,5}}{\varphi_1 - \varphi_{0,5}} \right| - G_{A\max}, & \text{при } \varphi_{0,5} \leq \varphi < \varphi_1; \\ 21 - 25 \lg \varphi - G_{A\max}, & \text{при } \varphi_1 \leq \varphi < \varphi_2; \\ -5 - G_{A\max}, & \text{при } \varphi_2 \leq \varphi < 70^\circ; \\ -G_{A\max}, & \text{при } 70^\circ \leq \varphi < 180^\circ; \end{cases}$$

где  $\varphi_{0,5} = 2 \frac{\lambda}{d} \sqrt{\frac{3}{0,0025}}$  – ширина ДН;

$$\varphi_1 = \frac{\varphi_{0,5}}{2} \sqrt{10,1875}, \quad \varphi_2 = 10;$$

$$c = 21 - 25 \lg(\varphi_1) - (G_{A\max} - 17).$$

Рассчитанные значения для основной поляризации:

$$\lambda = 2,5 \text{ см}; \quad \frac{d_a}{\lambda} = 23,4; \quad G_{A\max} = 35,5 \text{ дБ};$$

$$\varphi_m = 3,98^\circ; \quad \varphi_2 = 4,06^\circ; \quad G_{A1} = 13,78 \text{ дБ};$$

$$\varphi_b = 10^{(34/25)} = 22,91^\circ;$$

Для кроссполяризации:

$$\varphi_{0,5} = 2,96^\circ; \quad \varphi_1 = 4,73^\circ;$$

$$\varphi_2 = 10,96^\circ; \quad c = -14,36 \text{ дБ}.$$

Диаграмма направленности для основной и кроссполяризации приведена на рисунке 5. Диаграммы построены по вышеприведенным формулам.

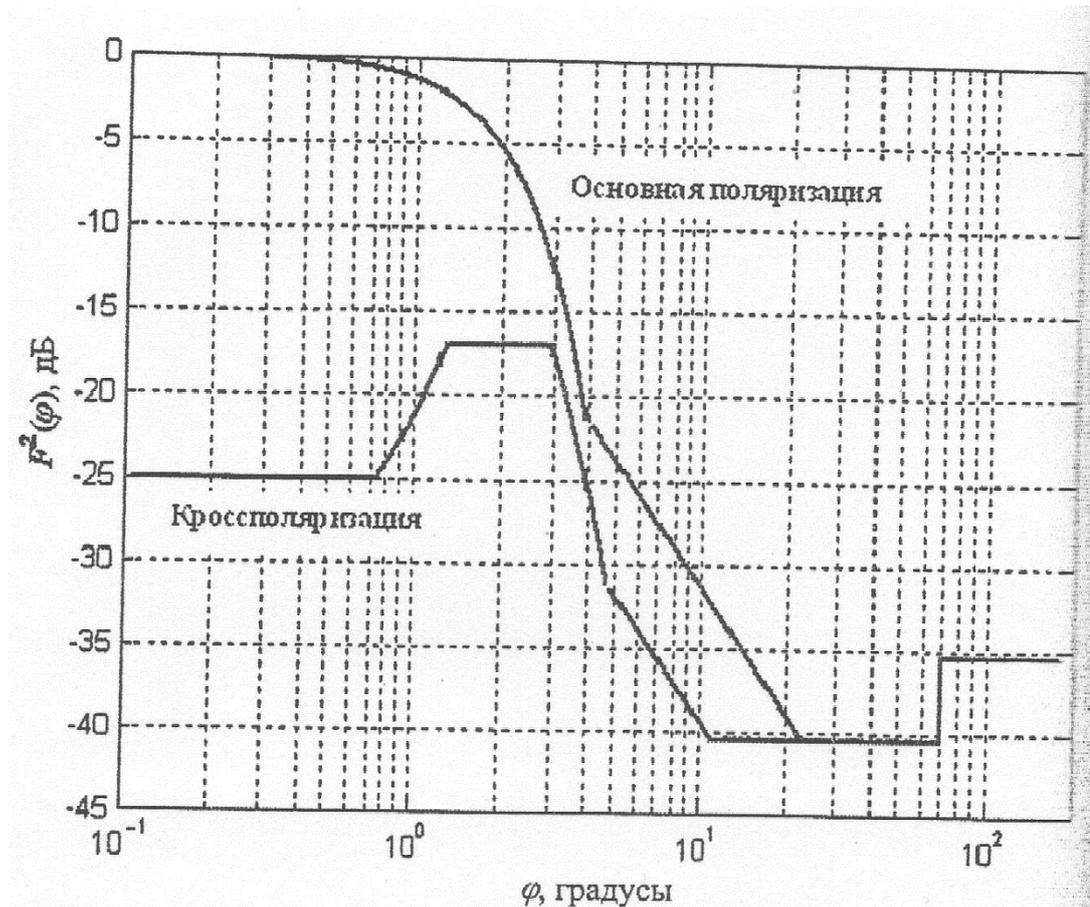


Рисунок 5 – Эталонная ДНА антенны диаметром 60 см приемной ЗС РСС на частоте 11,7 ГГц

### 3 Задание на лабораторную работу

Определите и изобразите подобно рисунку 5 эталонную диаграмму направленности для основной и кроссполяризации. Диаметр антенны 90 см; назначение – радиовещательная спутниковая служба (РСС), рабочая частота – 14 ГГц. Коэффициент использования поверхности КИП = 0,8.

#### 4 Контрольные вопросы

- 1) Дайте определение коэффициенту использования поверхности.
- 2) Что показывает и от каких величин зависит диаграмма направленности антенны?
- 3) Что такое кроссполяризация?

## Лабораторная работа № 5

### Прогнозирование взаимных электромагнитных помех в системе и определение комбинаций источник – помеха, рецептор –помеха

#### 1 Цель работы:

- изучение теоретических сведений и приобретение навыков прогнозирования электромагнитных помех.

#### 2 Краткие теоретические сведения

Помехи бывают межсистемными и внутрисистемными. Если источник помехи (ИП) и рецептор помехи (РП) находятся в одном корпусе, то эти электромагнитные помехи внутрисистемные (ВЭМП).

Подготовка к прогнозированию ВЭМП. Прежде чем прогнозировать ВЭМП необходимо определить следующие исходные данные:

1. Возможные комбинации ИП-РП.
2. Полосы частот ИП и РП.
3. Возможные пути распространения ВЭМП.
4. Возможные методы защиты от ВЭМП.

Данные по первым двум пунктам должны быть известны до начала прогнозирования. Возможные методы защиты могут быть определены после предварительного прогнозирования. На практике эти данные формулируются уже после предварительной разработки системы.

Первым этапом прогнозирования электромагнитной обстановки в системе является разработка частотной карты источников помех и рецепторов помех с примерным указанием их диапазонов рабочих частот, мощностей излучения и чувствительности рецепторов. На рисунке 1 представлена частотная карта типовой системы радиоэлектронного обеспечения авиационного комплекса. Следующим этапом на основе составленной таблицы является определение комбинаций ИП-РП.

На этом этапе необходимо выявить все возможные ИП в системе: передающие устройства, генераторы, источники питания. Модуляторы, системы передачи цифровых сигналов, реле,

соленоиды и др. Затем следует оценить полосы частот или временные интервалы каждого ИП.

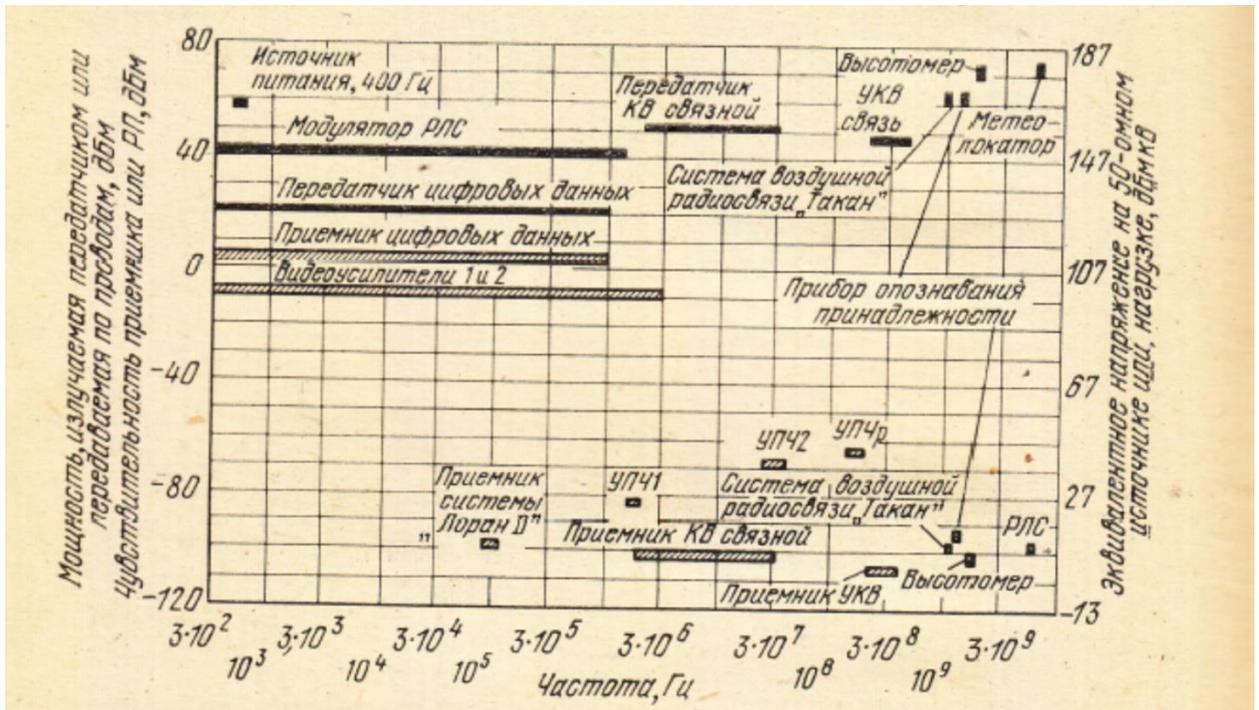


Рисунок 1 – Частотная карта источников (зачерненные отрезки) и рецепторов помех для типовой авиационной системы

Временные характеристики позволят учитывать возможные моменты возникновения внутрисистемных помех.

Затем необходимо выявить все РП, в которых могут возникать сбои и отказы. К ним относятся, например, оконечные исполнительные устройства, приемники сигналов и т.п. результатом воздействия помех на систему может быть аварийный сброс крыльевых топливных баков самолета при случайном срабатывании электрической системы самолета).

Затем следует оценить пороги срабатывания исполнительных устройств или оценить степень ухудшения работы при воздействии помехи. Так как помехи обычно не воздействуют непосредственно на исполнительные устройства, то необходимо знать наиболее чувствительные РП, с которых сигналы поступают на данные устройства. К таким РП обычно относится антенна, входные цепи УВЧ и УПЧ в супергетеродинном приемнике и чувствительные усилители. При этом также оценивают минимальные уровни помех, ухудшающие работу системы.

Рассмотрим вышеописанные подходы применительно к типовой авиационной системе. Включающей в себя источник питания 400 Гц, передатчик КВ связи, радиовысотомер, система воздушной радиосвязи. Передатчик цифровых данных, приемник цифровых данных, приемник КВ диапазона, УПЧ1, УПЧ2, высотомер, РЛС, видеоусилители и др.

Процедура отбора пар ИП-РП.

Процесс отбора заключается в следующем:

– составляется матрица всех комбинаций ИП-РП. Причем в матрицу заносятся данные об уровнях помех и чувствительности рецепторов независимо от их диапазона частот;

– отбираются пары по амплитуде (отбор является приближенным, так как не учитываются полосы частот);

– отбираются пары с учетом их пространственного положения и потерь распространения.

Составление матрицы ИП и РП типовой авиационной радиоэлектронной системы.

Включает запись:

– всех возможных ИП в первую строку матрицы

– всех возможных РП в левый столбец матрицы

– различий уровней без учета полос частот в столбцы матрицы.

В матрицу не заносятся данные о передатчиках и приемниках. предназначенных для совместной работы.

### 3 Контрольные вопросы

- 1) С какой целью разрабатываются частотные карты.
- 2) Какие существуют возможные комбинации ИП-РП?
- 3) Охарактеризуйте процедуру отбора пар ИП-РП?

## Лабораторная работа № 6

### Составление матрицы помех: отбор пар по амплитуде и частоте

#### 1 Цель работы:

- освоение теоретических сведений по составлению матрицы помех и приобретение навыков по составлению и заполнению таблиц помех.

#### 2 Краткие теоретические сведения

Отбор по амплитуде производится по следующему алгоритму:  
Для каждой из пар ИП-РП возможны следующие ситуации:

1. Помеха в основной полосе частот. Диапазон частот излучения ИП полностью перекрывает диапазон РП. Если перекрытие существует, то в верхнюю часть соответствующего квадрата таблицы 1.2. записывают поправку 0 Дб, в нижнюю часть того же квадрата записывают данные их таблицы 1.1.

2. основное излучение ИП попадает в побочный канал приема РП. Если побочный канал находится в пределах одной декады от основного диапазона приема РП, то в верхнюю левую часть соответствующего квадрата табл.1.2. записывается поправка -60 ДБ. В нижнюю правую часть записываются данные из таблицы 1.1 с учетом поправки -60 ДБ.

Таблица 1.1

РП	Разница в мощности ИП и чувствительности РП, дБм								
	источник питания, 400 Гц	передатчики			система «Такан»	приборы опознавания	высотомер	метеолокатор	модулятор РЛС
		цифровых данных	КВ	УКВ					
Приемник цифровых данных	65	—	45	40	55	55	65	65	35
Видеоусилитель 1	80	30	60	55	70	70	80	80	50
Видеоусилитель 2	80	30	60	55	70	70	80	80	50
ЭВМ*)	65	15	45	40	55	55	65	65	35
УПЧ1	155	105	135	130	145	145	155	155	125
УПЧ2	140	90	120	115	130	130	140	140	110
УПЧр	135	85	115	110	125	125	135	135	105
Система «Лоран Д»	170	120	150	145	160	160	170	170	140
Приемник КВ	170	120	—	145	160	160	170	170	140
Приемник УКВ	175	125	155	—	165	165	175	175	145
Система «Такан»	170	120	150	145	—	160	170	170	140
Приборы опознавания	165	115	145	140	155	—	165	165	135
Высотомер	170	120	150	145	160	160	—	170	140
Приемник РЛС	170	120	150	145	160	160	170	170	140
Электровоспламеняющее устройство 1*)	80	30	60	55	70	70	80	80	50
Электровоспламеняющее устройство Q*)	80	30	60	55	70	70	80	80	50

Число комбинаций ИП—РП 136

\*) На рис. 1.3 не показаны. По отечественной классификации диапазоны КВ, УКВ обозначаются ВЧ, ОВЧ. (Прим. ред.)

Таблица 1.2

РП	Поправка и результирующий уровень ВЭМП, дБ								
	источник питания, 400 Гц	передатчики			система «Такан»	приборы опознавания	высотомер	метеолокатор	модулятор РЛС
		цифровых данных	КВ	УКВ					
Приемник цифровых данных	65	—							0 35
Видеусилитель 1	0 80	0 30	0 60						0 50
Видеусилитель 2	0 80	0 30	0 60						0 50
ЭВМ	0 65	0 15							0 35
УПЧ1	-150 5	-60 45	0 135				-150 5	-150 5	-60 65
УПЧ2		0 120	-60 55	-120 10	-120 10	-120 20			
УПЧ <sub>p</sub>			-60 55	-60 50	-60 65	-60 65	-120 15	-120 15	
Система «Лоран D»	-150 20	0 120	-120 30		-150 10	-150 10	-150 20	-150 20	0 140
Приемник КВ	-150 20	-60 60	—	-60 85	-120 40	-120 40	-120 50	-150 20	-60 80
Приемник УКВ	-150 20	-60 95	-60 95	—	-60 105	-60 105	-60 115	-60 115	
Система «Такан»	-150 20		-120 30	-60 85	—	-60 100	-60 110	-60 110	
Приборы опознавания	-150 20		-120 30	-60 80	0 155	—	-60 105	-60 105	
Высотомер	-150 20		-120 30	-60 85	-60 100	-60 100	—	-60 110	
Приемник РЛС	-150 20			-120 25	-60 100	-60 100	-60 100		
Электровоспламеняющее устройство 1	0 80	0 30	0 60	0 55	0 70	0 70	0 80	0 80	0 50
Электровоспламеняющее устройство Q	0 80	0 30	0 60	0 55	0 70	0 70	0 80	0 80	0 50

3. Побочное излучение ИП попадает в побочный канал РП. В этом случае в верхнюю левую часть соответствующего квадрата табл.1.2. записывается поправка -120 дБ, а в нижнюю правую часть записываются данные из таблицы 1.1. с учетом поправки (-120дБ).

Отбор по амплитуде позволил уменьшить число возможных пар со 136 до 93. Наиболее вероятные помехи у пары передатчик системы «Такан» - приемник прибора опознавания принадлежности (155дБ). У всех остальных пар уровень помех составил не более 115 дБ.

Следующим этапом в процессе отбора является дальнейшее сокращение пар ИП –РП с учетом двух возможных случаев:

1.) расстройка между ИП и РП отсутствует (их полосы существенно перекрываются)

2.) расстройка между ИП и РП значительна, и поэтому в полосу РП попадает небольшая часть мощности, излучаемой ИП.

В первом случае полоса частот РП может быть:

–равна или больше полосы пропускания ИП; РП принимает всю излучаемую мощность и поправку (ослабление уровня сигнала) вносить не требуется;

–меньше полосы ИП; в этом случае РП принимает только часть излучаемой мощности, что учитывается поправкой по полосе. Эта поправка зависит от соотношения полос и определяется формулой:

$$D=k*\lg(B_R/V_T)\text{дБ},$$

где  $B_R, V_T$ -полосы частот РП и ИП по уровню 3 дБ.

$k$ -постоянная для данной пары ИП-РП, например для шумоподобных сигналов (некогерентных ) излучений  $k=10$ , для импульсных сигналов или когерентных излучений  $k=20$ .

**Пример 1.1.** Приемник системы «Лоран D» (рис. 1.3) имеет полосу  $B_R=10$  кГц, модулятор РЛС имеет полосу излучения 1,5 МГц, т. е.  $B_R < B_E$ . Поэтому приемник «Лоран D» принимает только часть мощности, излучаемой РЛС. Так как модулятор излучает когерентные импульсные сигналы, то в (1.1)  $k=20$ , и  $CF(\Delta f=0) = 20 \lg(10 \cdot 10^3 / 1500 \cdot 10^3) = -44$  дБ.

Таким образом, после второго этапа отбора для пары модулятор РЛС — приемник системы «Лоран D» (уровень помех согласно табл. 1.2 составляет 140 дБ) в соответствующий квадрат табл. 1.3 записывается поправка (–44 дБ), и результирующий уровень ВЭМП составляет  $140 - 44 = 96$  дБ.

Аналогично примеру 1.1 отбираются по частоте пары ИП-РП и результат заносят в таблицу 1.3. Отбор по частоте позволил исключить еще 37 пар ИП-РП. В результате данного этапа отбора только для двух пар из оставшихся (связной ВЧ передатчик-УПЧ 1 и 2 уровня – уровни ВЭМП превышают 100дБ.

### 3 Задание на лабораторную работу

1) Провести точный отбор по частоте на базе данных

2) Определить комбинации ИП-РП.

#### 4 Контрольные вопросы

- 1) Охарактеризуйте методику отбора по частоте
- 2) Охарактеризуйте методику отбора по амплитуде
- 3) Составьте матрицу помех по произвольным данным и объясните правила её составления

## Лабораторная работа № 7

### Учет помех при распространении электромагнитного поля

#### 1 Цель работы

- приобретение навыков учёта помех при распространении электромагнитного поля

#### 2 Краткие теоретические сведения

На предыдущих этапах отбора не учитывалось влияние пространственной изоляции для оставшихся пар ИП-РП. При этом предполагалось, что переходное затухание между ИП и РП отсутствует. А это не соответствует действительности. На данном этапе сначала определяют пространственное расположение пар ИП-РП, а также расположение ближайших стен, блок, отсеков, перегородок, монтажных жгутов и т.п. Затем выявляют пути распространения ЭМП для каждой из оставшихся пар. Поле излучения помехи может быть ближним и дальним. В процессе отбора учитываются дальние поля, которые в меньшей степени подвержены изменениям.

В таблице 1.4. приведены формулы для учета потерь при распространении ЭМП, в которых;

$\lambda_R$ -длина волны, соответствующая наивысшей частоте приема рецептора;

$d_{ER}$ -расстояние от излучателя (антенны, блока или проводов) до рецептора (антенны, блока или проводов).

$A_B$ -площадь поверхности блока РП, повернутой к ИП (антенне, блоку или проводам).

$K$ -минимальная эффективность экранирования металлического блока, дБ. Обычно  $K=10$  и  $40$  дБ при воздействии магнитного и электрического поля (или электромагнитного соответственно).

$a=2$  при связи между металлическими блоками;  $a=1$  , если излучатель не является блоком;

$l_R$ -длина кабеля (провода), являющегося РП.

$W_R$ -разнос входящих и выходящих проводов, являющихся РП.

Таблица 1.4

РП	Формулы для расчета потерь при распространении ЭМП излучения		
	ИП		
	оптсина	блок	провод
Антенна	$20 \lg (\lambda_R / 4\pi d_{ER})$		
Блок	$10 \lg (A_B / 4\pi d_{ER}^2) + aK$		
Провод	$10 \lg \left( \frac{l_R \omega_R}{4\pi d_{ER}^2} \right)$		См. график на рис. 1.6

Учет потерь при распространении ЭМП позволит уменьшить число возможных пар ИП-РП (в рассматриваемом примере таких пар 56) до нескольких. Следует иметь в виду, что результаты такого расчета являются ориентировочными.

**Пример 1.2.** Передатчик системы «Такан» и приемник РЛС (9,3 ГГц,  $\lambda=0,032$  м, табл. 1.3) являются потенциальной парой ИП—РП с уровнем помех 65 дБ. На борту самолета они размещены на расстоянии 10 м один от другого. Потери при распространении ЭМП учитываются для пары антенна—антенна по формуле (табл. 1.4):

$$L \geq 20 \lg \left( \frac{0,032}{4\pi \cdot 10} \right) = -72 \text{ дБ.}$$

Таким образом, эта пара исключается из дальнейшего анализа, так как потери превышают 65 дБ.

**Пример 1.3.** Провод питания от сети переменного тока с напряжением 115 В и частотой 400 Гц, длина которого  $l=3$  м, расположен на расстоянии  $d_{ER}=30$  см от скрученной пары, идущей к приемнику цифровых данных. Мощность источника питания составляет 70 дБм (10 кВт), сопротивление нагрузки  $R \approx 1$  Ом. Согласно табл. 1.4 для пары провод—провод следует воспользоваться графиком на рис. 1.6. Тогда

$$L \geq 97 \text{ дБ} - 20 \lg \left( \frac{50 \cdot 3}{30 \cdot 1} \right) = 83 \text{ дБ.}$$

График (рис. 1.6) приведен для параллельных нескрученных проводов, поэтому полученное значение потерь является заниженным. Однако так как оно превышает уровень помех (65 дБ), то эта пара ИП—РП также исключается.

Учет потерь при распространении ЭМП позволяет уменьшить число возможных пар ИП—РП (в рассматриваемом примере таких пар 56) до нескольких. Следует иметь в виду, что результаты такого расчета являются ориентировочными.

### 3 Контрольные вопросы

- 1) Чем вызвана необходимость учета помех при распространении электромагнитного поля
- 2) Чем объясняется решение задач по учету помех применительно к дальней зоне?

## Лабораторная работа № 8

### Улучшение ЭМС за счет пространственного и поляризационного разделения сигналов

#### 1 Цель работы

- изучение методов улучшения электромагнитной совместимости.

#### 2 Краткие теоретические сведения

Одним из методов улучшения электромагнитной совместимости в сложной системе, состоящей из множества ИП и РП, является пространственное и поляризационное разделение излучаемых и принимаемых сигналов. В качестве примера рассмотрим результаты улучшения ЭМС за счет пространственного разнесения источников и приемников излучения. Результаты были получены на основе лабораторной установки исследования основных параметров антенно-фидерных систем.

В ходе выполнения лабораторных работ исследовалась поляризация электромагнитного поля, излучаемого симметричным вибратором. Для этого использовалась схема, в которой одна из указанных антенн является передающей. В качестве приемной антенны в обоих случаях используется симметричный вибратор.

Функциональная схема экспериментальной установки с полуволновыми вибраторами приведена на рисунке 6.

В ее состав входят следующие элементы:

1) Передающая полуволновая антенна, представляющая собой полуволновый вибратор ( $\nu 1$ ,  $\nu 2$ ). Для создания однонаправленного излучения в антенне используется плоский экран  $\varepsilon 1$  в виде круглого диска. Конструктивно антенна связана с симметрирующим и согласующим устройством с короткозамыкателем  $\kappa 1$ . Симметричный вибратор подключается к внешним устройствам с помощью отрезка коаксиального кабеля с волновым сопротивлением 50 Ом, заканчивающегося разъемами  $p 1$ ,  $p 2$  типа СР50-164ФВ. Настройка антенны осуществляется путем изменения размеров  $b$  и  $l$ . Конструкция антенны допускает ее вращение вокруг оси симметрии (угол  $\varphi$ );

2) Приемная антенна - симметричный вибратор  $\delta 5$ ,  $\delta 6$  с плоским экраном  $\delta 2$  в виде круглого диска для создания однонаправленного излучения. Как и передающая эта антенна конструктивно связана с симметрирующим и согласующим устройством с короткозамккателем  $кз2$ , настраивается путем изменения размеров  $b$  и  $l$  и допускает вращение вокруг оси симметрии (угол  $\varphi$ );

3) Две диэлектрические штанги  $дш1$  и  $дш2$ , на которых крепятся приемная и передающая антенны;

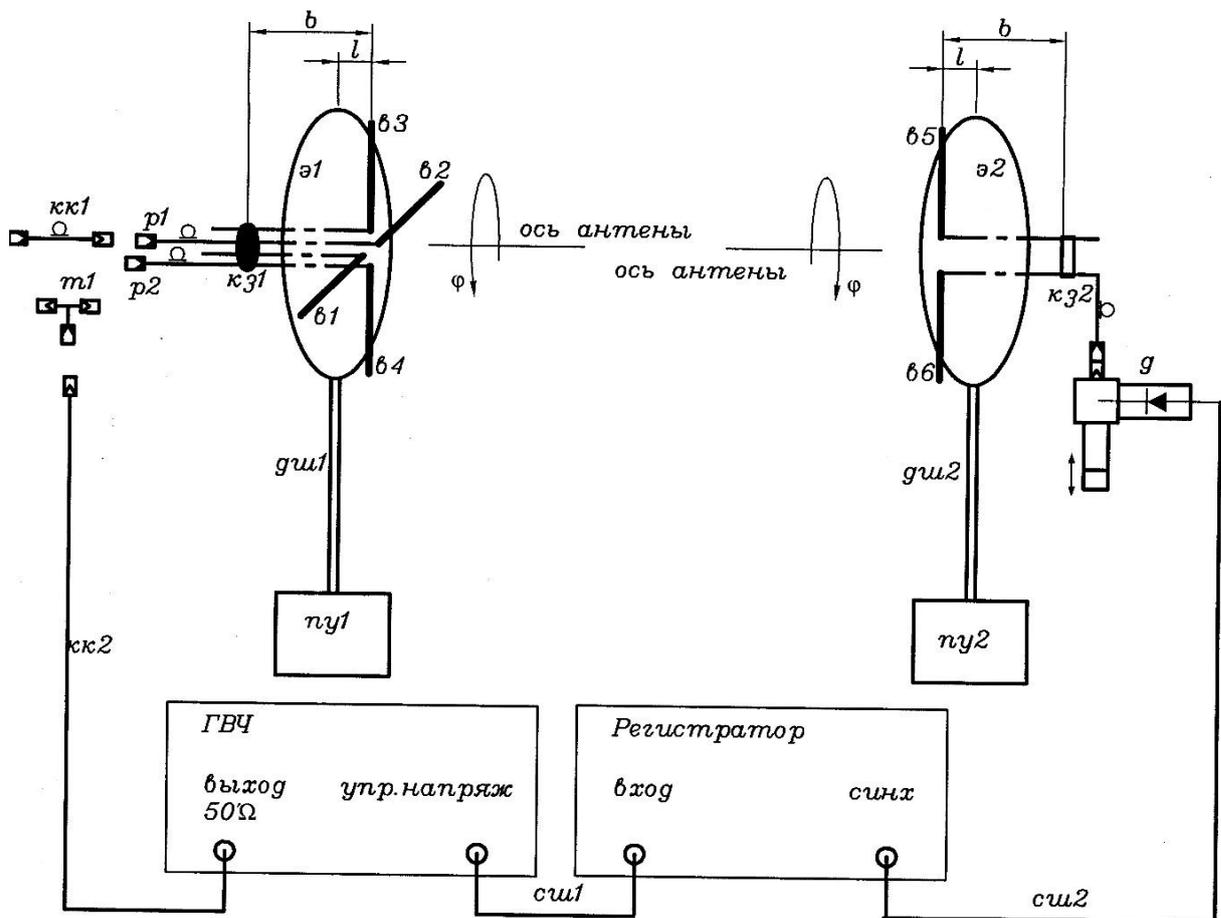


Рисунок 6 – Функциональная схема макета с двумя полуволновыми вибраторами

4) Два поворотных устройства  $пу1$  и  $пу2$  для регулировки углового положения антенн в горизонтальной плоскости;

5) Отрезок коаксиального кабеля  $кк1$  с волновым сопротивлением 50 Ом, заканчивающегося разъемами типа СР50-164ФВ и СР50-163ФВ;

- 6) Волноводный тройник *m1*;
- 7) Генератор высокой частоты ГВЧ типа Г4-144 на диапазон (500-1000) МГц, который служит для питания передающей антенны. Подключение его к антенне осуществляется с помощью коаксиального кабеля *кк2* с волновым сопротивлением 50 Ом;
- 8) Детекторная секция *д* для измерения уровня принимаемой мощности;
- 9) Регистратор для измерения и индикации тока детекторной секции;
- 10) Соединительный шнур *см1* соединяющий детекторную секцию и регистратор;
- 11) Соединительный шнур *см2*, по которому синхронизирующий сигнал от регистратора поступает на вход ГВЧ.

Все кабели снабжены соответствующими разъемами СР50.

Методика улучшения ЭМС за счет пространственного разнесения диаграмм направленности антенн и математическая модель приведены ниже.

Установим произвольно длину плеча передатчика горизонтального полуволнового вибратора 120 мм.

Оптимальная частота излучения полуволнового вибратора рассчитывается по формуле (1):

$$f = \frac{c}{4L} = \frac{3 \times 10^8}{4 \times 120} = 765 \times 10^8 = 765 \text{ МГц} \quad (1).$$

Последовательно вращая поворотное устройство приемной антенны в горизонтальной плоскости, проведем замер относительного уровня, наведенного в приемной антенне напряжения. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты замера относительного уровня, наведенного в приемной антенне напряжения.

Угол поворота приемной антенны, град.	Относительный уровень наведенного напряжения в приемной антенне
0	770
+10	800
+20	810
+30	670
+40	420
+50	500
+60	300

Угол поворота приемной антенны, град.	Относительный уровень наведенного напряжения в приемной антенне
+70	200
+80	400
+90	340
-10	700
-20	580
-30	390
-40	180
-50	60
-60	20
-70	60
-80	100
-90	110

По данным таблицы 2 строится график зависимости относительного уровня наведенного напряжения от угла поворота приемной антенны в горизонтальной плоскости (рисунок 7).

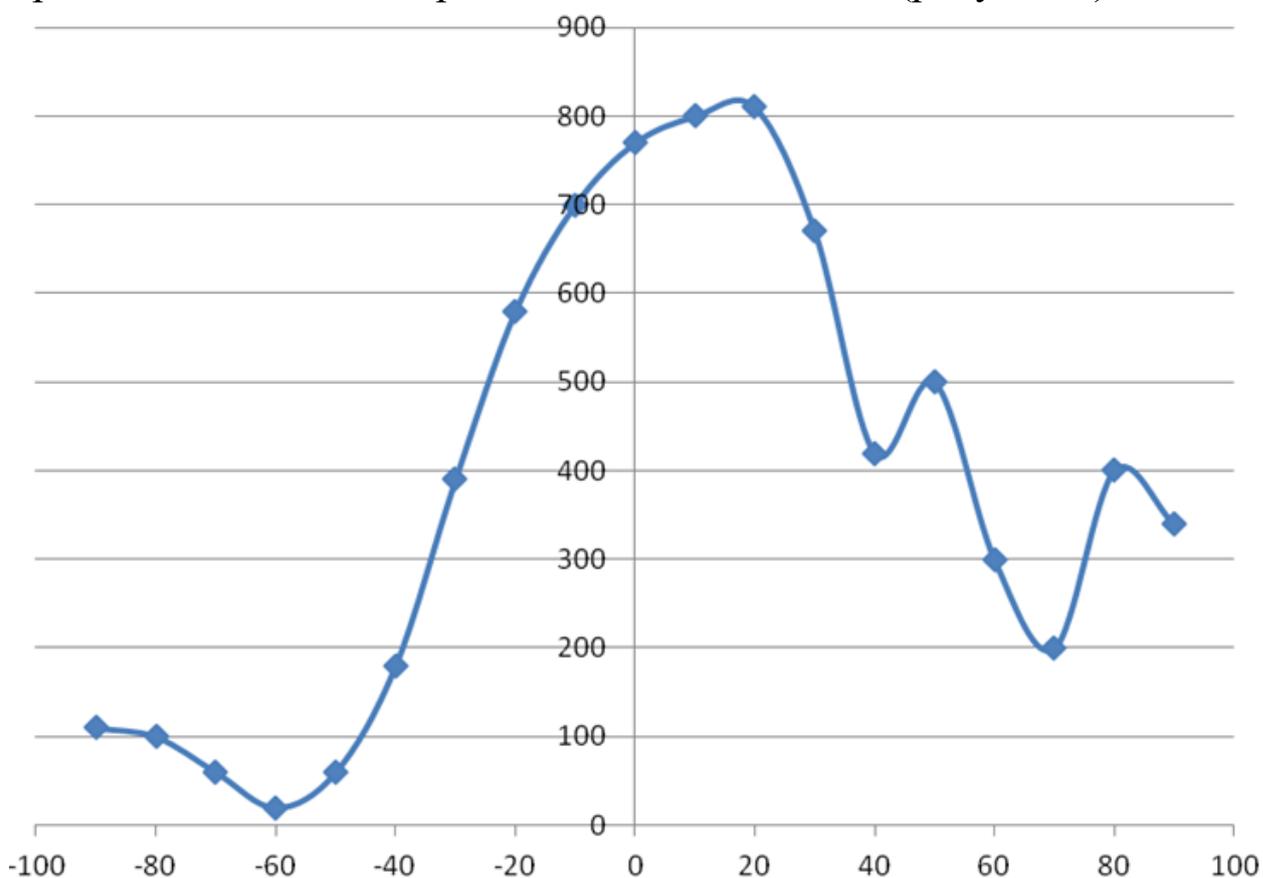


Рисунок 7 - Зависимость относительного уровня напряжения от угла поворота приемной антенны

Анализ представленной зависимости показал, что максимальное затухание на краях диаграммы приемной антенны составляет 32 дБ. Для обеспечения электромагнитной совместимости двух радиосредств, работающих на одной частоте, достаточно обеспечить пространственное разнесение по азимуту и обеспечить как минимум 40 дБ разведя по направлению. Неравномерности относительного уровня напряжений от угла поворота приемной антенны обусловлены влиянием отражений радиоволн от стен лаборатории.

### 3 Контрольные вопросы

- 1) Перечислите методы улучшения электромагнитной совместимости.
- 2) Охарактеризуйте этапы выполнения лабораторной работы на установке.

## Лабораторная работа № 9

### Обеспечение ЭМС с помощью поляризационного разделения сигналов

#### 1 Цель работы:

- исследование поляризационного разделения сигналов как метода обеспечения ЭМС

#### 2 Краткие теоретические сведения

Как уже отмечалось выше, одним из методов улучшения электромагнитной совместимости является поляризационное разделение сигналов. В качестве примера рассмотрим результаты улучшения ЭМС за счет поляризационного разделения источников излучения. Результаты были получены на основе лабораторной установки, функциональная схема которой описана в пункте 3.1.

1. Построим поляризационную характеристику приемной антенны, результаты которой приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Поляризационная характеристика приемной антенны.

0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
1,3 мВ	1 мВ	1,3 мВ	1,2 мВ	0,3 мВ	0,9 мВ	0,2 мВ	0,1 мВ	0,14 мВ	0,04 мВ

На основе результатов таблицы 2 построим графическую зависимость относительного уровня напряжения в приемной антенне от угла разделения передающей и приемной антенн по поляризации (рисунок 8).

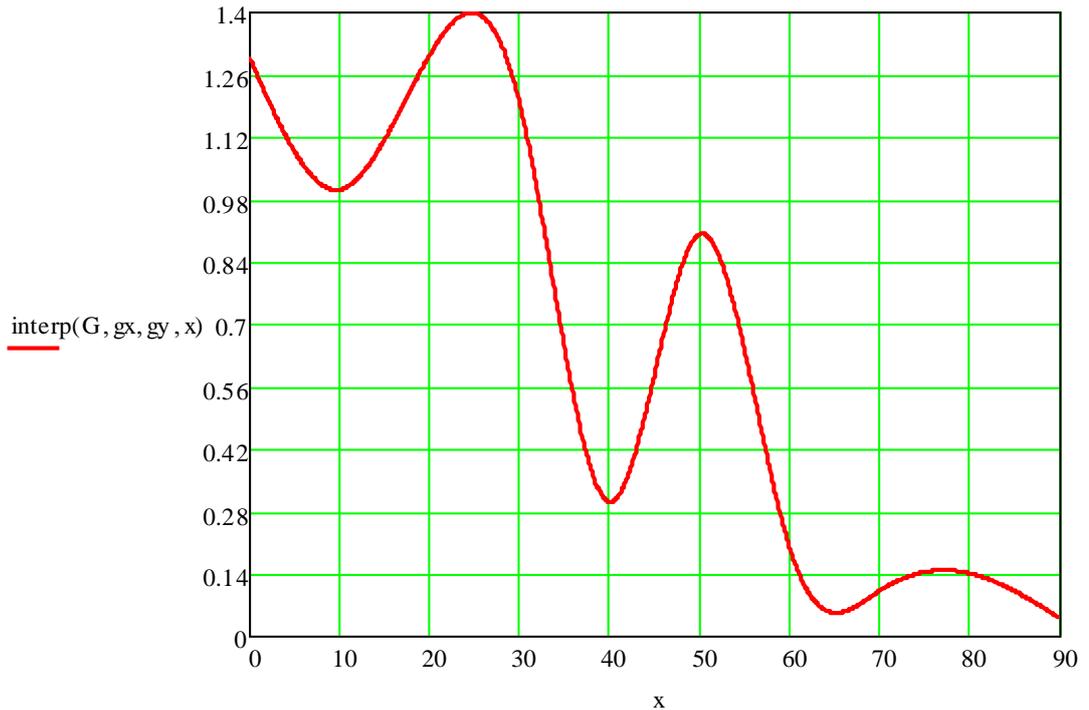


Рисунок 8 - Поляризационная характеристика приемной антенны

Расчет затухание при поляризационном разделении передающего и принятого сигналов в  $90^\circ$  осуществляется по формуле (2):

$$20 \log \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = 20 \log \frac{1.3}{0.04} = 115 \text{ дБ} \quad (2).$$

При поляризационном разделении сигналов полуволновых вибраторов ослабление сигнала может достигать 115 дБ на частоте 765 МГц.

### 3 Контрольные вопросы

- 1) Что показывает поляризационная характеристика антенны?
- 2) Назовите основные методы обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронного оборудования.

**Список литературы, рекомендуемой для подготовки к лабораторным занятиям**

1. Мухин И.Е., Хмелевская А.В., Коптев Д.С. Основы конструирования радиоэлектронной аппаратуры с учетом обеспечения электромагнитной совместимости: учеб. пособие / Юго-Зап. гос. ун-т. – Курск, 2018. – 140 с.
2. Пудовкин А. П. Электромагнитная совместимость и помехозащищённость РЭС [Текст]: учебное пособие / Пудовкин А. П., Панасюк Ю. Н., Чернышова Т. И. – Тамбов: ТГТУ, 2011. - 92 с.
3. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике [Электронный ресурс]: учебное пособие / А.Ф. Шаталов [и др.] - Ставрополь: Агрус, 2014. - 63 с.
4. Основы управления использованием радиочастотного спектра [Текст]. Т. 1. Международная и национальная системы управления РЧС. Радиоконтроль и радионадзор / под ред. М. А. Быховского. – М.: Красанд, 2012. – 340 с.
5. Основы управления использованием радиочастотного спектра [Текст]. Т. 2. Обеспечение электромагнитной совместимости радиосистем/ под ред. М. А. Быховского. – М.: Красанд, 2012. – 554 с.
6. Овсянников А.Г. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике [Электронный ресурс]: учебник / А.Г. Овсянников, Р.К. Борисов. - Новосибирск: НГТУ, 2011. – 194 с.