

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра радиотехнических систем

***СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ  
НЕПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ НА РЕЦЕПТОРЫ***

Методическое руководство

к лабораторной работе по курсу  
«Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств»  
для студентов специальностей  
«Радиотехника» и «Радиоэлектронные системы»  
дневной, вечерней и заочной форм обучения

Минск 2003

УДК 621.396 (075.8)

ББК 32.844 я 73

С 78

С о с т а в и т е л ь

Е.В. Кереселидзе

**Статистическая** оценка воздействия непреднамеренных помех на С 78 рецепторы: Метод. руководство к лабораторной работе по курсу «Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств» для студ. спец. «Радиотехника» и «Радиоэлектронные системы» дневной, вечерней и заочной форм обучения / Сост. Е.В. Кереселидзе. — Мн.: БГУИР, 2003. — 24 с.: ил.

В методическом руководстве кратко изложены основные положения статистической теории электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоэлектронных средств. Рассмотрены методы статистической оценки параметров непреднамеренных помех (НРП) с помощью математической статистики. Изложены сведения, связанные с принципами построения измерителей радиопомех и измерений статистических характеристик НРП. Даются рекомендации по выполнению лабораторной работы, требования к содержанию отчета и контрольные вопросы.

Предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальностям «Радиотехника» и «Радиоэлектронные системы».

УДК 621.396 (075.8)

ББК 32.844 я 73

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Цель работы
  2. Краткие теоретические сведения
  3. Оценка плотности распределения и параметров случайных величин
  4. Измерение параметров непреднамеренных помех
    - 4.1 Общие сведения об измерении параметров помех
    - 4.2 Измеритель радиопомех SMV 6.1
  5. Подготовка измерителя радиопомех SMV 6.1 к работе
  6. Задания к лабораторной работе
  7. Содержание отчета
- Вопросы для самопроверки  
Литература

Библиотека БГУИР

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование статистических характеристик непреднамеренных радиопомех в гектометровом (ГКМ) и декаметровом (ДКМ) диапазонах волн и определение на их основе параметров ЭМС радиоприемного устройства, расположенного в изучаемой электромагнитной обстановке.

## 2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Радиоэлектронные средства (РЭС) благодаря своей эффективности используются практически во всех сферах человеческой деятельности, причем количество используемых РЭС наращивается быстрыми темпами. Одновременно работающие РЭС могут создавать помехи друг другу. Вероятность мешающего воздействия зависит от числа работающих РЭС и их тактико-технических характеристик (мощность излучения, чувствительность, избирательность и т.д.). Для увеличения плотности размещения одновременно работающих РЭС в пространственно-частотно-временном объеме необходимо тщательное изучение их мешающего взаимодействия.

В реальных условиях в точке расположения РЭС действует большое число различного рода излучений, учет которых возможен только при помощи методов теории вероятности и математической статистики. В дальнейшем мы будем рассматривать только те помехи от РЭС и других источников, которые не создаются специально и называются непреднамеренными радиопомехами (НРП).

Важнейшей характеристикой РПрУ с точки зрения ЭМС является избирательность. Под избирательностью понимается способность РПрУ выделять полезный сигнал из сложных электромагнитных полей, созданных в точке расположения РПрУ. Для обеспечения избирательности используют отличия полезного сигнала от помех. Наиболее широко используются отличия по частоте, направлению прихода волны, поляризации, времени прихода сигналов и т.д.

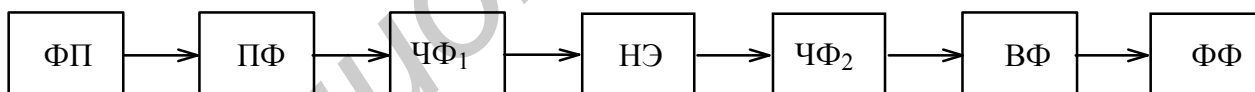


Рис. 1. Модель радиоприемного устройства

Модель приёмника (рис. 1) представляет собой последовательное включение линейных фильтров по различным параметрам: ФП — фильтр по пространству, ПФ — поляризационный фильтр, ЧФ<sub>1</sub> — частотный фильтр, характеристика избирательности, которого определяется частотной избирательностью антенны, входных цепей и усилителя высокой частоты, НЭ — нелинейный элемент, ЧФ<sub>2</sub> — частотный фильтр, частотная характеристика которого в основном определяется характеристикой ФОС, ВФ — временной фильтр, ФФ — фильтр по форме.

Под электромагнитной обстановкой понимается совокупность излучений, образованных за счет совместной работы РЭС и других источников НРП в точке расположения приемного устройства рассматриваемой радиотехнической системы.

Можно отметить исключительное многообразие частотно-время-пространственных характеристик помех и многочисленность источников. Знание индивидуальных свойств каждого из них необходимо для оценки действия помех на радиосредства, расположенные в непосредственной близости от источника, и разработки эффективных мер защиты.

Для решения задач ЭМС необходимо составить модель ЭМО, позволяющую выявлять закономерности взаимного влияния совместно работающих РЭС.

Естественно, что модель — это лишь приближительная копия, отражающая наиболее существенные особенности ЭМО. Для составления модели надо знать ряд факторов: относительное расположение источников мешающего излучения; энергетические характеристики мешающих сигналов; параметры помех, определенные в интересующих нас диапазонах; число источников, создающих радиопомехи. Такая модель необходима для возможности количественно оценить ухудшение тактико-технических характеристик исследуемой радиосистемы. Изобразим модель территориального расположения РЭС.

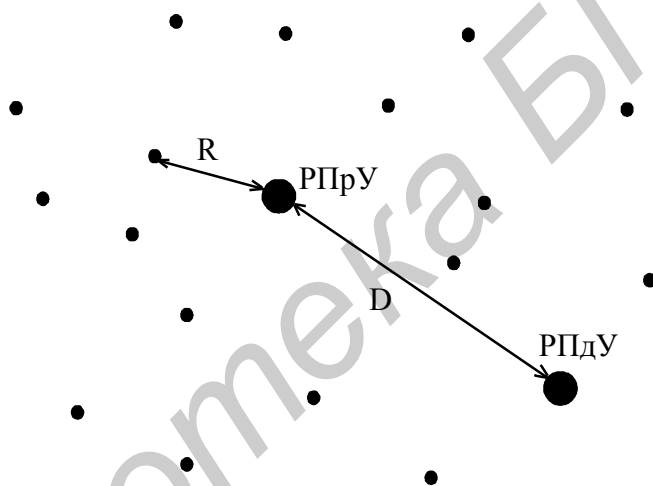


Рис. 2. Территориальная модель ЭМО

Территориальная модель ЭМО (рис. 2) состоит из передатчика (RPrU) и приемника (RPdU), которые разнесены на расстояние  $D$ , близкое к максимальному для исследуемой радиосистемы. Таким образом, приемное устройство принимает полезный сигнал на фоне  $N$  излучений от других РЭС, которые в данном случае являются мешающими. Приёмник должен выделить полезный сигнал из всей совокупности излучений. Основой для такого выделения служит отличие параметров сигнала от параметров помех.

Целесообразно все параметры сигналов разделить на энергетические и неэнергетические. К неэнергетическим параметрам относятся: несущая частота, направление прихода по азимуту и углу места, временные характеристики, поляризация. Энергетическими параметрами считают энергию сигнала, плотность потока мощности, напряженность поля, мощность, силу тока, напряжение и т.д.

Любой радиосигнал можно представить набором параметров  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , каждый из которых принимает значения в соответствующих диапазонах

$Dx_1, Dx_2, \dots, Dx_n$ . Таким образом, каждый сигнал можно представить в виде точки внутри некоторого  $n$ -мерного прямоугольного параллелепипеда со сторонами  $Dx_1, Dx_2, \dots, Dx_n$ , координаты которой будут определяться параметрами  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Если в зоне досягаемости исследуемого приёмника действует  $N$  источников излучения, то внутри такого параллелепипеда будет  $N$  точек.

Координаты каждой точки будут случайны, а плотность заполнения неравномерна и описывается  $n$ -мерной плотностью распределения  $\omega_n(x_1, x_2, \dots, x_n)$  параметров  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .

Для большинства практических случаев параметры  $x_1, x_2, \dots, x_n$  независимы друг от друга, что объясняется двумя основными факторами:

– неэнергетические параметры независимы по своей физической природе и методу формирования;

– диапазоны изменения параметров считаются узкими, т.е.  $Dx \ll x$ , а для независимых параметров  $n$ -мерную плотность распределения параметров можно представить как произведение одномерных плотностей по отдельным параметрам  $\omega_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = \omega(x_1) \omega(x_2) \dots \omega(x_n)$ .

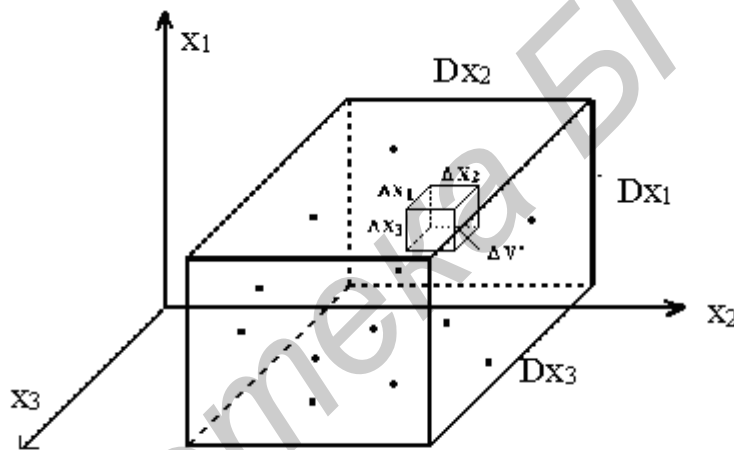


Рис. 3. Распределение случайных точек в  $n$ -мерном параллелепипеде

В рассматриваемом  $n$ -мерном параллелепипеде (рис. 3), общий объём которого

$$V = Dx_1 Dx_2 \dots Dx_n = \prod_{i=1}^n Dx_i, \quad (1)$$

можно выделить относительно малый объём  $\Delta V' \ll V$ , охватывающий точку  $(x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$  с ребрами, параллельными осям координат. По каждой из осей этот объём будет занимать отрезок  $\Delta X'_i$ , а сам объём

$$\Delta V' = \Delta X'_1 \Delta X'_2 \dots \Delta X'_n = \prod_{i=1}^n \Delta X'_i \quad (2)$$

можно представить как обобщенную полосу пропускания  $n$ -мерного фильтра, состоящего из  $n$  фильтров по отдельным параметрам с полосой пропускания  $\Delta X_i$ . Будем считать, что все фильтры идеальные, т.е. имеют прямоугольную характеристику избирательности. Таким образом, в обобщённом объёме  $V$ , за-

полненной системой случайных точек с распределением  $\omega_n(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , с помощью  $n$  мерного фильтра выделена обобщенная полоса прозрачности.

Среднее число сигналов  $N_{cp}$ , попадающих в обобщенную полосу пропускания, можно определить по формуле

$$N_{cp} = N \Delta V' \omega_n(x'_1, x'_2, \dots, x'_n) = N \prod_{i=1}^n \Delta X'_i \omega(x'_i). \quad (3)$$

Для обобщенной полосы пропускания можно применить распределение Пуассона:

$$V_k = \frac{1}{k!} e^{-z} z^k, \quad (4)$$

где  $V_k$  — вероятность того, что событие  $A$ , вероятность появления которого равна  $p$ , в  $n$  опытах появится ровно  $k$  раз,  $z = n \cdot p$ .

В нашем случае под событием  $A$  подразумевается попадание помехи в обобщенную полосу прозрачности, тогда  $z$  — среднее число сигналов в объеме  $\Delta V'$ , т.е.  $z = N_{cp}$ .

Распишем данную формулу:

$$\begin{aligned} V_k &= \frac{1}{k!} \exp(-N \Delta V' \omega_n(x'_1, x'_2, \dots, x'_n)) \times (N \Delta V' \omega_n(x'_1, x'_2, \dots, x'_n))^k = \\ &= \frac{1}{k!} \exp(-N \prod_{i=1}^n \Delta X'_i \omega(x'_i)) (N \prod_{i=1}^n \Delta X'_i \omega(x'_i))^k. \end{aligned} \quad (5)$$

С помощью данного выражения можно найти ряд важных вероятностей:

– вероятность того, что в объеме  $\Delta V'$  не будет ни одного излучения

$$V_0 = \exp(-N \prod_{i=1}^n \Delta X'_i \omega(x'_i)); \quad (6)$$

– вероятность того, что в объеме  $\Delta V'$  будет только одно излучение

$$V_1 = \exp(-N \prod_{i=1}^n \Delta X'_i \omega(x'_i)) (N \prod_{i=1}^n \Delta X'_i \omega(x'_i)); \quad (7)$$

– вероятность того, что в объеме  $\Delta V'$  будет не более одного излучения

$$V_{\leq 1} = \exp(-N \prod_{i=1}^n \Delta X'_i \omega(x'_i)) (1 + N \prod_{i=1}^n \Delta X'_i \omega(x'_i)). \quad (8)$$

По смыслу  $V_0$  характеризует ЭМС системы в целом и называется вероятностью ЭМС. Ее значение зависит от ЭМО, параметров РПрУ и эффективности мешающего воздействия помех на полезный сигнал, а следовательно, на возможность выполнения радиосистемы своих функций.

Эта вероятность характеризует отсутствие помех на выходе приемника, в котором нет полезного сигнала и позволяет исключить из рассмотрения отношение сигнал/шум, что существенно упрощает методику исследования.

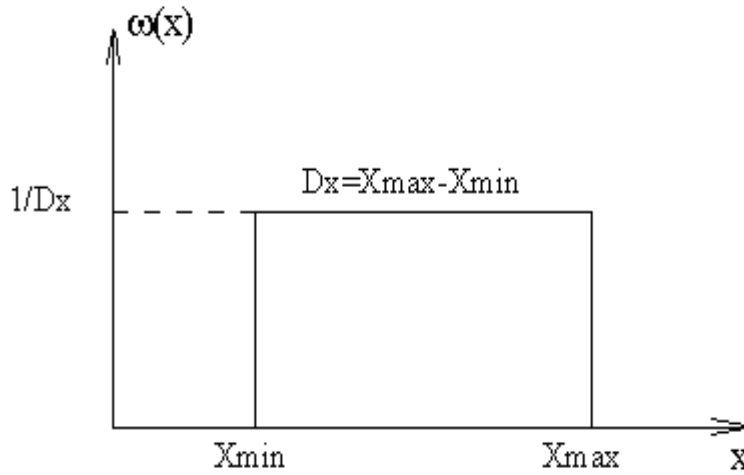


Рис. 4. Равномерный закон распределения

Как правило, распределение неэнергетических параметров внутри их диапазонов изменения можно описать равномерным законом  $\omega_n(x) = 1/Dx$  (рис. 4), при этом формула для  $V_0$  существенно упростится:

$$V_0 = \exp\left(-N \prod_{i=1}^n \Delta X'_i / Dx_i\right), \quad (9)$$

если селекция проводится только по одному параметру, то

$$V_0 = \exp(-N \Delta X' / Dx). \quad (10)$$

Описание плотности распределения энергетических параметров нельзя свести только к равномерному закону, это может быть частным случаем, причем довольно редким. Ограничим рассмотрение этого вопроса ситуацией, когда помеха РПрУ наводится одним источником со случайным местоположением.

Для плотности потока мощности в точке приёма известно выражение

$$\Pi = \frac{P_{\text{изл}} G_{\text{изл}} y(\varphi, \varepsilon)}{4\pi R^2}, \quad (11)$$

где  $P_{\text{изл}}$  — мощность излучения,  $G_{\text{изл}}$  — коэффициент усиления излучающей антенны,  $y(\varphi, \varepsilon)$  — нормированная, снятая по мощности диаграмма направленности (ДН) передающей антенны.

Перепишем данную формулу в следующем виде:  $\Pi = AP_3/R^2$ , где  $P_3 = P_{\text{изл}}$ ,  $G_{\text{изл}} y(\varphi, \varepsilon)$  — эквивалентная мощность излучения источника,  $A=1/4\pi$ . Более кратко запишем  $\Pi = xy$ , где  $x = AP_3$ ,  $y = 1/R^2$ .

Для нахождения распределения  $\omega(\Pi)$  надо знать распределения  $\omega(x)$  и  $\omega(y)$ . Рассмотрим два упрощенных случая.

*Случай 1.* Предположим, что все источники излучений имеют одинаковую эквивалентную мощность ( $P_3 = \text{const}$ ) и распределены равномерно (рис. 5) в плоском кольце, ограниченном радиусами  $R_{\text{max}}$  и  $R_{\text{min}}$ . Найдём для данного случая распределение  $\omega(R)$ . Площадь кольца  $\delta S = 2\pi R_1 \delta R$ . Среднее число источников на этой площади  $\Delta N = 2\pi r_1 \delta R$ , где  $\rho$  — плотность источников излучения. Если весь интервал  $D_R = R_{\text{max}} - R_{\text{min}}$  разбить на равные части, число которых



$h = D_R / (\delta R)$ , то плотность вероятностей найдем как предел  $\omega(R) = \lim_{\delta R \rightarrow 0} (\Delta N / (\delta R)) = \beta R$ , где  $\beta$  — нормирующий множитель.

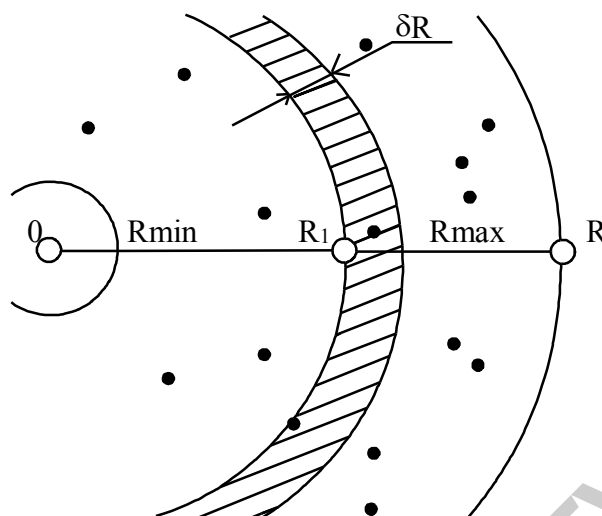


Рис. 5. Равномерное по площади расположение источников помех

После нормировки получим

$$\omega(R) = 2R / (R_{\max}^2 - R_{\min}^2), \quad (R_{\min} \leq R \leq R_{\max}).$$

Зная  $\omega(R)$ , нетрудно рассчитать  $\omega(\Pi)$  по формуле, известной из теории вероятностей,

$$\omega(\Pi) = \beta_1 \omega(R) / \left| \frac{d\Pi}{dR} \right|. \quad (12)$$

Определив производную  $d\Pi/dR = \beta_2 / R^2$  ( $\beta_1, \beta_2$  постоянные коэффициенты) и проведя соответствующие подстановки и преобразования, получим:

$$\omega(\Pi) = \frac{\Pi_{\max} \Pi_{\min}}{\Pi_{\max} - \Pi_{\min}} \cdot \frac{1}{\Pi^2} \quad (\Pi_{\min} \leq \Pi \leq \Pi_{\max}), \quad (13)$$

как правило,  $\Pi_{\max} \gg \Pi_{\min}$ , тогда

$$\omega(\Pi) = \Pi_{\min} / \Pi^2 \quad (\Pi_{\min} \leq \Pi \leq \Pi_{\max}). \quad (14)$$

Нас в основном будет интересовать распределение мощности

$$\omega(P) = \frac{P_{\max} P_{\min}}{P_{\max} - P_{\min}} \cdot \frac{1}{P^2} \quad (P_{\min} \leq P \leq P_{\max}). \quad (15)$$

*Случай 2.* Предположим, что все источники излучения находятся на одинаковой дальности, тогда плотность распределения дальностей будет описываться дельта-функцией  $\omega(R) = \delta(R - R_{cp})$  ( $R_{\min} \leq R \leq R_{\max}$ ). Таким образом,  $\omega(\Pi)$  будет зависеть от распределения  $\omega(P_3)$ . Эквивалентная мощность относится к величинам с большим динамическим диапазоном, для которых часто постулируют равномерно-логарифмическое распределение (распределение Шеннона):

$$\omega(\Pi) = \frac{1}{\Pi \ln(\Pi_{\max} / \Pi_{\min})} \quad (\Pi_{\min} \leq \Pi \leq \Pi_{\max}). \quad (16)$$

Для мощности сигнала запишем

$$\omega(P) = \frac{1}{P \ln(P_{\max} / P_{\min})} \quad (P_{\min} \leq P \leq P_{\max}). \quad (17)$$

В общем случае, применяя формулу  $\Pi = xy$ , при известных  $\omega(x)$  и  $\omega(y)$  можно воспользоваться известным выражением

$$\omega(y) = \int_0^{\infty} \omega(x) \omega(y/x) \frac{dx}{|x|}. \quad (18)$$

Мы рассмотрели два случая распределения мощности сигналов  $\omega(P)$  в зависимости от распределения дальностей  $\omega(R)$  и в обоих случаях получили, что распределение мощности описывается гиперболическим законом, только с разными показателями степени. В общем виде гиперболический закон распределения для мощностей записывается следующим образом:

$$\omega(P) = \beta / P^m \quad (P_{\min} \leq P \leq P_{\max}), \quad (19)$$

где  $\beta$  — нормировочный коэффициент,

$$\beta = \begin{cases} \frac{(m-1)P_{\max}^{m-1}P_{\min}^{m-1}}{P_{\max}^{m-1} - P_{\min}^{m-1}} & (m \neq 1) \\ \frac{1}{\ln(P_{\max} / P_{\min})} & (m = 1) \end{cases}. \quad (20)$$

Нормировочный коэффициент  $\beta$  рассчитывается из условия нормировки

$$\int_{-\infty}^{\infty} \omega(x) dx = 1. \quad (21)$$

Гиперболический закон является трехпараметрическим, его параметрами являются  $P_{\max}$ ,  $P_{\min}$  и степень  $m$  (рис. 6).

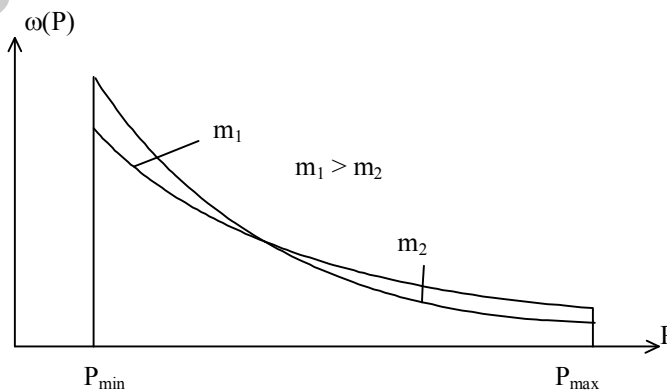


Рис. 6. Гиперболический закон распределения при различных значениях  $m$

Понятно, что кроме гиперболического закона распределения могут применяться и другие. Все зависит от конкретной ситуации.

Энергетическую оценку ЭМС следует увязывать с отношением сигнал/помеха, от которого зависят большинство ТТХ системы. В реальных условиях на РПрУ воздействуют различного рода помехи, отличающиеся по своим временным, спектральным и другим характеристикам, влияние которых на РПрУ при одинаковых мощностях различно. Для устранения этого многообразия помех в исходных моделях ЭМО в [2] вводится понятие шумового эквивалента. Под шумовым эквивалентом непреднамеренной помехи понимается отношение реальной мощности данной помехи к мощности «белого» шума, попадающего в полосу РПДУ, при котором их влияние на тактико-технические характеристики радиосистемы одинаково, т.е.  $P_p = \eta P_{ш}$ ,  $P_p$  — реальная мощность помехи,  $P_{ш}$  — мощность шума, вызывающего такое же воздействие, как и непреднамеренная помеха мощностью  $P_p$ . Тогда шумовой эквивалент  $\eta = P_p / P_{ш}$ . Таким образом, под мощностью помехи мы подразумеваем не ее реальную мощность, а эквивалентную. Общую мощность помех на входе приемника можно определить как сумму

$$P_{п} = P_{ш} + P_{м.с}, \quad (22)$$

где  $P_{ш}$  — мощность собственных шумов,  $P_{м.с}$  — мощность мешающих сигналов.

Первое слагаемое в этой формуле является величиной детерминированной, т.е. в приемнике всегда имеются шумы, уровень которых практически не изменяется. Значение второго слагаемого — величина случайная и может во много раз превышать уровень собственных шумов и приводить к частичной либо полной потере работоспособности системы, однако вероятность такого события, как правило, мала. Для нормальной работы приемника мощность полезного сигнала должна в  $a$  раз превышать мощность собственных шумов  $P_o = aP_{ш}$ , а в условиях действия помех в  $a$  раз превышать суммарную мощность помех

$$P'_o = a(P_{ш} + P_{м.с}) = P_o + a P_{м.с}. \quad (23)$$

Коэффициентом непреднамеренных помех называется число  $K_{нп}$ , которое показывает, во сколько раз в среднем надо повысить порог приема в условиях воздействия непреднамеренных помех, чтобы сохранить превышение порогового уровня сигнала над помехой таким же, каким оно было до воздействия непреднамеренных помех. Исходя из определения получаем

$$K_{нп} = P'_o / P_o = 1 + P_{м.с} / P_{ш}. \quad (24)$$

С учетом электромагнитной обстановки и селективных свойств приемника получим

$$K_{нп} = 1 + N \frac{P_{ср}}{P_{ш}} \prod_{i=1}^n \Delta X_i \omega(x'_i) \quad (25)$$

Как видно из формулы, коэффициент непреднамеренных помех определяется не только параметрами приемника, в данном случае мощностью собственных шумов  $P_{ш}$  и полосами пропускания по отдельным параметрам  $\Delta X_i$ , а также параметрами ЭМО, средней мощностью помех  $P_{ср}$  и плотностью распределения

вероятности их неэнергетических параметров  $\omega(x_i)$ . Чем меньше влияние оказывают помехи на работу радиосистемы, тем меньше  $K_{\text{нп}}$ , поэтому меры по снижению  $K_{\text{нп}}$  являются мерами улучшения ЭМС.

### 3. ОЦЕНКА ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ПАРАМЕТРОВ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН

Математическая статистика — раздел математики, изучающий закономерности случайных явлений или процессов на основании регистрации, систематизации и обработки результатов наблюдений или измерений [5].

Статистические методы исследования, базирующиеся на рассмотрении экспериментальных данных о тех или иных совокупностях объектов, применяются в самых различных областях знаний (физика, экономика, медицина и др.) и могут преследовать разные цели. Однако можно указать следующие три основные задачи математической статистики:

- оценка неизвестной функции распределения или плотности вероятности. Эта задача обычно формулируется так. В результате независимых измерений случайной величины  $x$  получены следующие ее конкретные значения  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ . Требуется оценить неизвестную функцию распределения  $F(x)$  случайной величины  $x$  или ее плотность вероятности  $\omega(x)$ , если  $x$  — непрерывная случайная величина. Эту задачу можно распространить на многомерные функции распределения и плотности вероятности;
- оценка неизвестных параметров закона распределения. Пусть на основании физических или общетеоретических соображений можно заключить, что случайная величина  $x$  имеет функцию распределения определенного вида, зависящую от нескольких параметров, значения которых неизвестны. На основании наблюдений величины  $x$  нужно оценить значения этих параметров;
- статистическая проверка гипотез. Обычно эта задача формулируется следующим образом. Пусть на основании некоторых соображений можно считать, что функция распределения исследуемой случайной величины  $x$  есть  $F(x)$ . Спрашивается, совместимы ли наблюдаемые значения с гипотезой, что случайная величина  $x$  действительно имеет распределение  $F(x)$ .

Чтобы получить представление о распределении наблюдений, поступают следующим образом. На первом этапе производят многократное измерение случайной величины, получая простой статистический ряд (табл. 1).

Таблица 1

$i$ — номер измерения	1	2	3	.....	$r$
Результат измерения	$x_1$	$x_2$	$x_3$	.....	$x_r$

Однако статистический материал в виде простого статистического ряда при большом числе измерений трудно обозрим, по нему практически невозможно оценить закон распределения исследуемого параметра  $x$ .

Поэтому для визуальной оценки закона распределения исследуемой случайной величины  $x$  производят группировку данных.

Область экспериментальных значений случайной величины разбивают на  $r$  обычно одинаковых интервалов длины  $\Delta x$  и вычисляют частоту попадания случайной величины  $x$  в  $i$ -й интервал. В результате получаем сгруппированный статистический ряд следующего вида (табл. 2).

Таблица 2

Интервал $\Delta x_i$	$\Delta x_1$	$\Delta x_2$	$\Delta x_3$	.....	$\Delta x_r$
Частость $v_i = \frac{k_i}{r}$	$v_1$	$v_2$	$v_3$	.....	$v_r$

Частость в данном случае характеризует вероятность попадания случайной величины  $x$  в  $i$ -й интервал.

Используя данные табл. 2, можно определить все числовые характеристики случайной величины, наиболее важными из которых являются математическое ожидание (среднестатистическое значение) и дисперсия.

$$m_x = \sum_{i=1}^r x_i \cdot v_i, \quad (26)$$

$$\sigma_x^2 = \sum_{i=1}^r (x_i - m_x)^2 \cdot v_i, \quad (27)$$

где  $x_i$  — значение случайной величины, соответствующее середине  $i$ -го интервала.

Относительная плотность точек в каждом интервале определяется как отношение частоты попадания в этот интервал  $v$  к его длине  $\Delta x$  (табл. 3):

$$p_i = \frac{v_i}{\Delta x} = \frac{k_i}{r\Delta x}, \quad i = 1, 2, \dots, r, \quad (28)$$

где  $k_i$  — число экспериментальных точек в  $i$ -м интервале,  $v_i = k_i/r$ .

Таблица 3

Интервал $\Delta x_i$	$\Delta x_1$	$\Delta x_2$	$\Delta x_3$	.....	$\Delta x_r$
Плотность $p_i = \frac{v_i}{\Delta x}$	$p_1$	$p_2$	$p_3$	.....	$p_r$

Подсчитанные таким образом значения можно представить графически в виде ступенчатой кривой: по оси абсцисс откладывают соответствующие интервалы и на каждом из них, на основании, строится прямоугольник, высота которого равна относительной плотности  $p_i$ . Полученная ступенчатая кривая называется гистограммой. Гистограмма частот статистического ряда представлена на рис. 7.

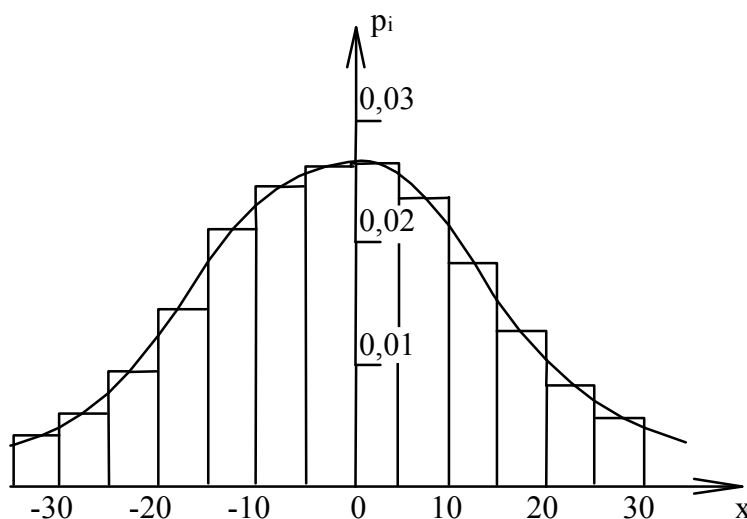


Рис. 7. Гистограмма частот статистического ряда

Гистограмма дает наглядное представление о распределении наблюдаемых значений на числовой оси. По ней можно определить частоту попадания наблюдаемых значений в любой интервал числовой оси. Очевидно, что все величины  $p_i$  неотрицательны, причем суммарная площадь под гистограммой равна единице:

$$\sum_{i=1}^r p_i \Delta x = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r k_i = 1. \quad (29)$$

При заданном числе наблюдений  $r$  гистограмма, составленная на основе группировки с достаточно малыми интервалами, обычно многовершинная и не отражает наглядно существенных свойств распределения. С другой стороны, группировка по слишком крупным интервалам может привести к потере ясного представления о характере распределения и к грубым ошибкам при вычислении других характеристик распределения.

Для выбора оптимальной длины интервалов, т.е. такой длины частичных интервалов, при которой статистический ряд не будет очень громоздким и в нем не исчезнут особенности исследуемой случайной величины, рекомендуют формулу

$$\Delta x = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{1 + 3,2 \ln r}, \quad (30)$$

где  $r$  — объем выборки,  $\Delta x$  — длина интервала.

Количество интервалов выбирается, как правило, обычно не меньше 5 и не больше 15.

Аналогично строится гистограмма в двухмерном случае, когда рассматривается распределение данных на плоскости (например, при анализе рассеивания при стрельбе или бомбометании). Разбив часть плоскости, занятую экспериментальными точками, на прямоугольники и подсчитав число точек в каждом прямоугольнике, можно определить соответствующие относительные

плотности точек как отношение частоты попадания в прямоугольник к его площади.

Во многих случаях возникает необходимость аппроксимации экспериментально полученной гистограммы подходящим аналитическим выражением, представляющим собой некоторый теоретический закон распределения или плотность вероятности, которые должны удовлетворять двум обязательным условиям: неотрицательности и нормировки. Эта операция называется выравниванием статистических данных. При этом естественно стремятся к тому, чтобы такая аппроксимация (выравнивание) в определенном смысле была наилучшей.

Имеется много разнообразных способов и приемов подбора распределений для экспериментальных данных и невозможно выделить какой-либо из них. Успех в значительной степени определяется накопившимся опытом в этом деле. Однако можно дать некоторые общие рекомендации.

Обычно аппроксимация гистограммы является не самоцелью, а производится для получения каких-либо выводов о физическом механизме изучаемого явления или процесса или же для выполнения последующих расчетов. Исходя из этого, прежде всего, необходимо принять решение — аппроксимировать ли гистограмму дискретным или непрерывным распределением (плотностью вероятности). После этого производится качественное сопоставление характера построенной гистограммы с графиком различных теоретических распределений (дискретных или непрерывных) и по близости их поведения останавливаются на каком-либо одном из наиболее подходящих.

В зависимости от решаемой задачи характер и степень близости поведения следует понимать по-разному: иногда можно ограничиться хорошим совпадением в центральной области (области больших вероятностей), а иногда (например, в теории обнаружения сигналов) нужно стремиться к хорошему совпадению на «крыльях» закона распределения (в области малых вероятностей).

## 4. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ НЕПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ

### 4.1. Общие сведения об измерении параметров помех

В состав приборов для измерения параметров радиопомех (в том числе и непреднамеренных радиопомех) входят: измеритель радиопомех и одно или несколько измерительных устройств, обеспечивающих измерение напряжения, напряженности поля, мощности и тока помех [3]. Измерительными устройствами являются эквиваленты сети и пробники, измерительные антенны, поглощающие клещи и токосъемники.

Измерители радиопомех (ИРП) градуируются в эффективных значениях синусоидального напряжения, выраженных в децибелах относительно 1 мкВ, 1 мкВ/м или мкА.

В общем виде структурная схема любого измерителя радиопомех (рис. 8) состоит из входного устройства (ВУ), первого аттенюатора (Ат1), усилителя высокой частоты (УВЧ), преобразователя частоты (ПрЧ), второго аттенюатора

(Ат2), усилителя промежуточной частоты (УПЧ), детектора (Д) квазипикового (пикового) и эффективного значений, вольтметра (В) и оконечного устройства (ОУ).

ИРП представляет собой высококачественный измерительный радиоприемник супергетеродинного типа с одним, двумя и более преобразователями частоты.

Входное устройство (ВУ) служит для подключения к источнику радиопомех.

При измерении напряжения радиопомех входным устройством является эквивалент сети или пробник (для измерения напряжения), измерительная антенна (для измерения напряжения поля), поглощающие клещи (для измерения мощности) и токосъемник (для измерения тока).

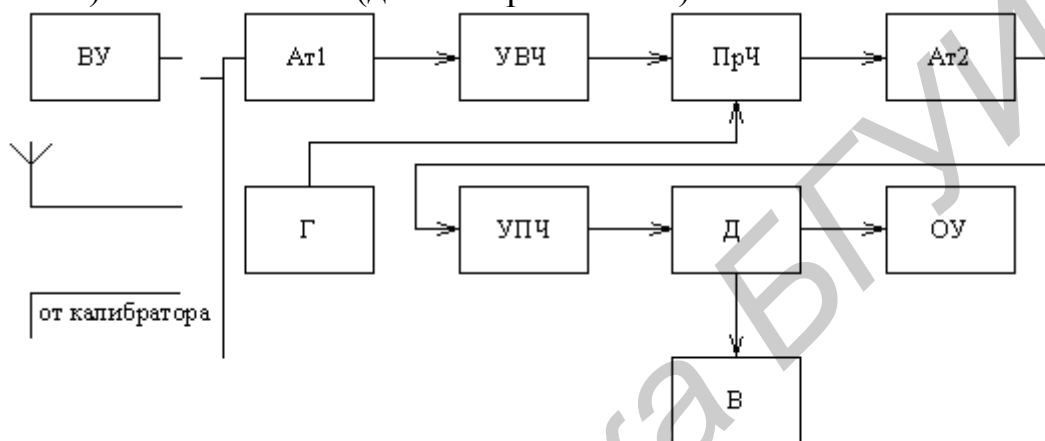


Рис. 8. Структурная схема измерительного приемника

Измерительный сигнал с ВУ поступает по высокой частоте на аттенюатор Ат1, который служит делителем напряжения и согласующим элементом при подключении к высокочастотному (ВЧ) тракту калибратора. Назначение остальных элементов такое же, как и у обычных супергетеродинных приемников.

Наличие двух делителей сигналов (Ат1, Ат2) обусловлено тем, что при делении измеряемого напряжения только по ВЧ неделимыми остаются шумы, возникающие на входе УВЧ, что может привести к дополнительным погрешностям в измерении. При делении напряжения сигнала по промежуточной частоте (ПЧ) создается опасность перегрузки каскадов УВЧ, что ведет к нарушению их линейности и недопустимым погрешностям. Поэтому деление напряжения измеряемого сигнала производят по ПЧ (Ат2), снижая шумы каскадов УВЧ. Затем регулируют напряжение аттенюаторами ВЧ (Ат1), добиваясь работы высокочастотного тракта в линейном режиме, а затем вновь регулируют по ПЧ.



## 4.2. Измеритель радиопомех SMV 6.1

Селективный микровольтметр SMV 6.1 предназначен для измерения ВЧ напряжений в полосе 0,1 ... 30 МГц и является супергетеродинным приемником, диапазон которого перекрывается с помощью восьми поддиапазонов.

На первом и втором поддиапазонах приемник работает с одним, на третьем и четвертом — с двумя, на пятом-восьмом — с тремя преобразователями частоты. Данные о значении промежуточных частот на различных диапазонах приведены в табл. 4.

Таблица 4

Поддиапазоны	Частота, МГц	Преобразование частоты	1-я ПЧ	2-я ПЧ	3-я ПЧ
1, 2	0,1 – 0,63	1-кратное	66,66 кГц		
3, 4	0,63 – 3,7	2-кратное	366,66 кГц	66,66 кГц	
5, 6, 7, 8	3,7 – 30	3-кратное	2,8 МГц	366,66 кГц	66,66 кГц

В состав ИРП SMV 6.1 может входить измерительная антенна типа FMA 6.2.

В общем случае структурная схема ИРП типа SMV 6.1 соответствует структурной схеме ИРП, приведенной на рис. 8, но имеется ряд особенностей, связанных с измерением параметров ИРП в диапазоне 0,1 ... 30 МГц. Размещение основных органов управления ИРП SMV 6.1 на передней панели изображено на рис. 9.

Входное сопротивление прибора без внутреннего высокочастотного ослабления равно 75 Ом, с внутренним высокочастотным ослаблением — 50, 60 или 75 Ом. Допустимое максимальное входное напряжение при сопротивлении 75 и 60 Ом равно 134 дБ/мкВ, при сопротивлении 50 Ом — 132,4 дБ/мкВ.

ИРП SMV 6.1 имеет выходы для подключения антенного усилителя, самописца, головных телефонов, осциллографа ( $U \geq 0,5$  В,  $R = 14$  кОм), а также выход генератора ( $U_{\text{вых}} = 100$  мВ,  $R = 75$  Ом) частотных меток, следующих с частотой 100 или 500 кГц. Прибор имеет входы точной внешней частоты 1 МГц.

ИРП SMV 6.1 питается от сети переменного тока напряжением  $220/110 \pm 10$  % с частотами от 48 до 62 Гц или от батареи напряжением 12 В. При питании от сети потребляемая мощность 18 В. А при питании от батареи ток нагрузки 0,3 А.

Антенна измерительная типа FMA 6.2 предназначена для работы в качестве входного устройства (преселектора) в составе ИРП SMV 6.1 для измерения и контроля напряженности электромагнитного поля полезных сигналов и радиопомех в полосе 0,1 ... 30 МГц.

Антенна состоит из высокочастотного блока, трех ферритовых стержней и штыря длиной 1 м. Антенна может быть удалена от радиоприемника на расстояние до 10 м и может монтироваться на установочной площадке или штативе. Настройка антенны автоматическая.

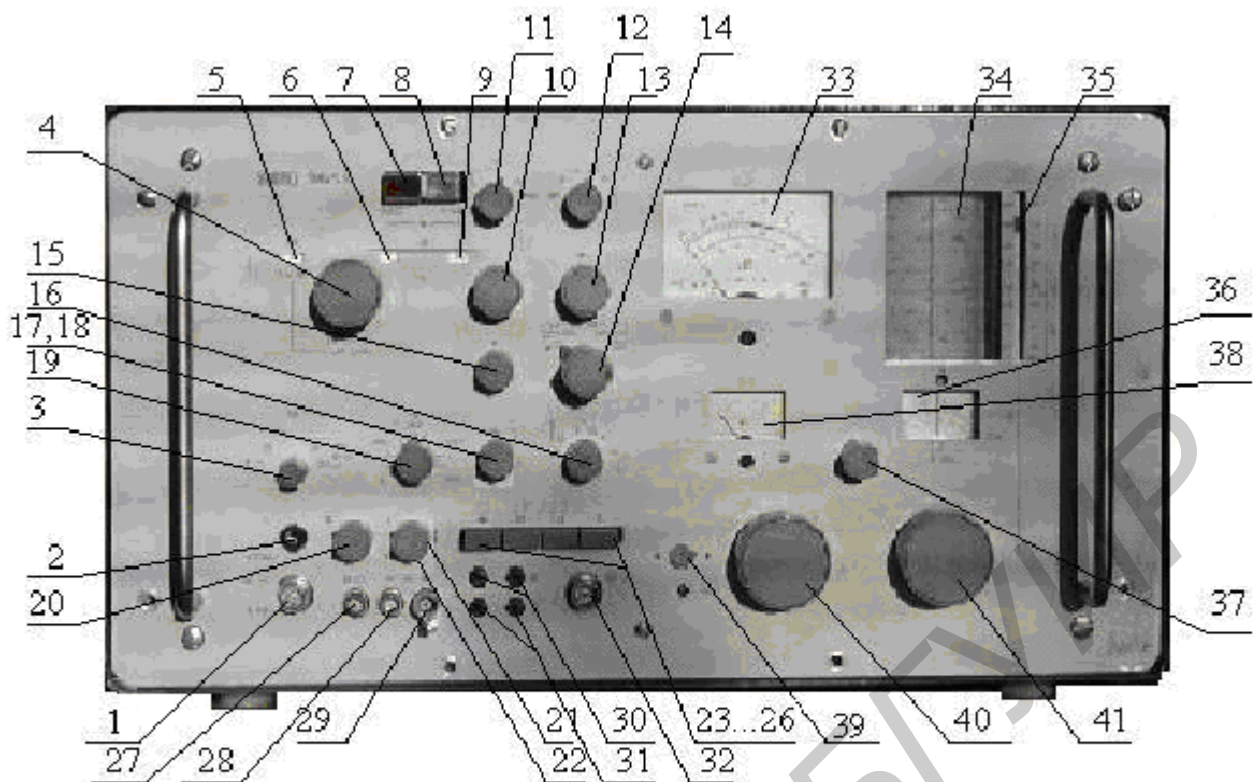


Рис. 9. Размещение основных органов управления ИПР SVM 6.1 на передней панели

1 - вход ВЧ, 2 - соединительное гнездо 12 В для питания антенного усилителя, 3 - переключатель входного сопротивления, 4 - переключатель диапазона измерения и ослабления аттенюатора, 5 - шкала максимального показания затухания ПЧ, 6 - показания диапазона измерения "дБ относительно 1 мкВ", 7, 8 - включение питания (7 - от сети, 8 - от источника 12В), 9 - показание делителя ВЧ 1 дБ, 10 - переключатель затухания: в положение "10 Г" включается затухание 10 дБ и через (29) могут подаваться частотные метки, 11 - переключатель ширины полосы пропускания, 12 - переключатель вида показания ИПР <III> -линейно-растянутое, lin -линейное, log - логарифмическое (квазипиковое пиковое напряжение), 13 - регулятор  $\nabla$  II "калибровка 11", 14 - переключатель "измерение - калибровка", 15 - регулятор "калибровка 1" ( $\nabla$  I) для установки напряжения калибровочного генератора, 16 - переключатель синхронизации, 17, 18 - точная настройка калибровочного генератора, 19 - управление вращением антенны при подключенной антенне FMA-6.2, 20 - точная настройка антенны при подключенной антенне FMA-6.2, 21 - регулятор громкости, 22 - регулятор компенсационного напряжения при измерении пикового напряжения "P", 23 - кнопка для подключения индикаторного прибора 33 при калибровке, 24 - кнопка включения калибровочного генератора, 25 - кнопка A1 для включения гетеродина A1, 26 - кнопка для подключения 12 В, 27 - гнездо для подключения осциллографа, 28 - гнездо для подачи напряжения свипирования для 3-го гетеродина, 29 - гнездо для подачи частотных меток, 30 гнездо для подключения самописца, 31 гнездо для подключения головных телефонов, 32 - выход напряжения калибровочного генератора, 33 - индикаторный прибор, 34 - калибровка диапазонов измерения частот сигналов и помех, 35 - указатель диапазона частот, 36 - шкала для контроля точной настройки, 37 - регулятор точной настройки частоты, 38 - индикаторный прибор контроля синхронизации, 39 - тормоз инерционного привода, 40 - управление инерционным приводом установки частоты, 41 - переключатель диапазонов частот.

Блок антенны состоит из высокочастотной части, приводов для переключения поддиапазонов частот, управляющей части, приводов электродвигателей для автоматической настройки частоты и вращения антенны, поворотной антенной головки для крепления ферритовых стержней и органов управления и настройки.

Ферритовая антенна вставляется в антенную головку. Антенная головка экранирована для предотвращения антенного эффекта. Контакты ферритовых антенн соединены через систему контактных колец с высокочастотной частью.

Три антенных стержня соответствуют следующим диапазонам:

- Ферритовая антенна 1 — диапазоны 1–3.
- Ферритовая антенна 2 — диапазоны 4 и 5.
- Ферритовая антенна 3 — диапазоны 6–8.

Настройка антенны осуществляется автоматически при настройке частоты приемника. При дистанционном вращении ферритовой антенны от SMV 6.1 направление на источник помех определяется дистанционно по шкале на передней панели ИРП.

Диапазон частот 0,1 ... 30 МГц перекрывается восемью поддиапазонами. Настройка частоты ручная и автоматическая, время настройки 200 с. Вращение антенны ручное и автоматическое, угол поворота равен 360°.

Напряжение питания 12 В, ток нагрузки 100 ... 120 мА.

Магнитная составляющая электромагнитного поля измеряется с помощью ферритовых стержней, принцип действия которых в антенном блоке соответствует принципу работы рамочных антенн.

Для измерения электрической составляющей используется штырь длиной 1 м.

## 5. ПОДГОТОВКА ИЗМЕРИТЕЛЯ РАДИОПОМЕХ SMV 6.1 К РАБОТЕ

Число НРП и их параметры оценивают в условиях, когда на входе радиоприемника наряду с полезным сигналом действуют мешающие излучения.

После включения питания ИРП с помощью переключателя частотных диапазонов устанавливается измерительный диапазон частот.

Перед началом измерений производится калибровка селективного микровольтметра в режиме измерения напряжений с линейным отсчетом, применяемого для точных измерений напряжения и напряженности поля.

### Калибровка ИРП SMV 6.1

Калибровка уровня измеряемых сигналов производится в два этапа: калибровка I «▼ I» и калибровка II «▼ II».

При калибровке I устанавливается напряжение генератора на номинальную величину, а при калибровке II устанавливается усиление промежуточной частоты.

Общий порядок работы с прибором SMV 6.1

**ВНИМАНИЕ.** Прибор подключен к сети 220 В 50 Гц.

Включать прибор красной кнопкой 7. После включения прибор готов к эксплуатации.

**УСТАНОВКА ЧАСТОТЫ.** Переключение и установка частотных диапазонов осуществляется с помощью переключателя 42. Индикация диапазона осуществляется появлением указателя темного цвета на шкале 35.


Частота устанавливается инерционным приводом 41, который может при необходимости тормозиться и фиксироваться регулируемым тормозом 40.

**ПРИМЕЧАНИЕ.** С помощью ручки 38 можно произвести расстройку установленной частоты в диапазоне частот 3 и 4 на 15 кГц, а в диапазоне частот 5–8 на 10 кГц. Отсчет осуществляется по шкале 37, причем нижняя шкала предназначена для диапазонов 3, 4, а верхняя — для диапазонов 5–8.

Если расстройка не требуется, то эта шкала должна находиться на «0».

Калибровка уровня калибровочного генератора и усилителя промежуточной частоты:

а) Установить переключатель 14 в положение «Cal ▼». Нажать кнопку 23 калибровки I и установить стрелку индикаторного прибора 33 с помощью регулятора 15 калибровки I на калибровочную метку «▼ I» и выключить кнопку калибровки 23.

б) Установить переключатель синхронизации «≈» 16 в положение  и произвести настройку калибровочного генератора 17, 18, чтобы на приборе 33 получить максимальное отклонение стрелки прибора.

Проконтролировать синхронизацию с помощью прибора 39 и интерференционного свиста, для чего нажать на кнопку 25.

Включить регулятор  громкости 21.


Установить стрелку индикаторного прибора 33 с помощью регулятора калибровки 13 на калибровочную метку «▼ II» при положении переключателя 11 ширины полосы «9 кГц».

## 6. ЗАДАНИЯ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Задание 1. Подготовить ИРП типа SMV 6.1 к работе.

Задание 2. Провести измерение напряжений сигналов и ИРП в указанном преподавателем диапазоне. Результаты измерений оформить в виде табл. 5.

### Общие указания

Для выполнения измерений установить переключатель 14 «измерение-калибровка» в положение , а переключатель 12 рода работ — в положение «log».

В этом случае отсчет показаний производится по логарифмической шкале прибора 33 в пределах диапазона градуировки шкалы от –20 дБ до +20 дБ.

### Выполнение измерений

Установить переключатель синхронизации 16 в положение .

## ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА ОСЛАБЛЕНИЯ И ДИАПАЗОНА АМПЛИТУД ИЗМЕРЯЕМЫХ СИГНАЛОВ

Переключателем диапазона измерения 4 включается один делитель промежуточной частоты и два делителя высокой частоты при следующей последовательности коммутационных операций:

делитель промежуточной частоты (5x10 дБ);

делитель высокой частоты 1 (6x10 дБ);

делитель высокой частоты II (5x10 дБ).

При проведении измерений необходимо следить, чтобы стрелка прибора 33 находилась в пределах шкалы, регулируя величину ослабления с помощью переключателя 4.

Переключатель ослабления 4, 5 установить в положение 50 дБ, плавно перестраивая ИРП в пределах исследуемого диапазона, определить на слух и по изменению показаний прибора 33 появление сигналов и помех. После появления сигнала или НРП остановить перестройку ИРП, определить частоту  $f_i$  сигнала, а затем, изменяя положение переключателей программ 4 и 6, при необходимости калиброванного генератора 9, установить показание стрелки прибора 33 в пределах шкалы.

Индикаторный прибор 33 откалиброван в «дБ» относительно 1 мкВ. Измеренное напряжение определяется как сумма установленных величин в «дБ» на шкалах 5, 6, 9 и показанию индикаторного прибора 33.

Шкалы 5, 6, 9 и 33 отградуированы в «дБ» относительно 1 мкВ ( $0 \text{ дБ} \cong \cong 1 \text{ пкВ}$ ).

При необходимости с помощью регулировки точной расстройки уточняется частота помехи (сигнала), затем уточняется значение суммарной величины аттенюаторов и производится окончательный отсчет.

Значение частоты сигнала (помехи)  $f_i$  записывается в таблицу. При наличии на контролируемой частоте нескольких сигналов и помех в графе «характеристика НРП» указывается каждый из различимых на слух сигналов или помех. Пример записи приведен в табл. 5.

Таблица 5

№ измерения	Частота НРП, МГц	Уровень помехи, дБ	Характеристика НРП	Примечание
1	0,9	12	Сигнал	
2	1,1	23	Шум, помеха	
...	...	...	...	
85	1,83	4	Помеха	
...	...	...	...	
90	1,97	9	Помеха	

При наличии колебаний стрелки индикаторного прибора из-за интерференции измеряемых сигналов рекомендуется брать среднее значение между максимальным и минимальным значениями отклонений.

Задание 3. По результатам измерений построить гистограммы частот напряжений и частот НРП.

Задание 4. Пользуясь результатами измерений, методами математической статистики и методическими указаниями к данному разделу:

- 1) определить  $P_{\min}$ ,  $P_{\text{ср}}$ ,  $P_{\max}$ ;
- 2) рассчитать вероятность ЭМС  $V_0$  с учетом числа  $N$  мешающих сигналов, проникающих на выход приемника по основному каналу без учета нелинейных явлений;
- 3) определить коэффициент непреднамеренных помех  $K_{\text{нп}}$ .

## 7. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

1. Структурную схему ИРП SMV 6.1.
2. Таблицу измерений напряжений НРП (табл. 5).
3. Интервальный статистический ряд.
4. Гистограммы частот напряжений и частот для диапазона частот, в котором проводились измерения.
5. Значения  $P_{\min}$ ,  $P_{\text{ср}}$ ,  $P_{\max}$ .
6. Расчеты и результаты расчетов вероятностей ЭМС  $V_0$ .
7. Выводы.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Чем оценивается ЭМО в точке расположения рецептора НРП?
2. Что такое неэнергетические и энергетические параметры селекции НРП?
3. Характеристика законов распределения неэнергетических параметров.
4. Характеристика законов распределения мощности НРП.
5. Определение вероятности обеспечения ЭМС.
6. Определение коэффициента непреднамеренных помех  $K_{\text{нп}}$ .
7. Понятие о шумовых эквивалентах.
8. Принципы обработки статистических данных.
9. Свойства и порядок построения гистограммы частот случайных величин.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Евтухин Г.Н. Статистическая оценка воздействия непреднамеренных помех на рецепторы: Метод. руководство к лабораторной работе по курсу «Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств». — Мн.: МРТИ, 1992. — 45 с.
2. Апович А.Ф. Статистическая теория электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. — Мн.: Наука и техника, 1981. — 215 с.
3. Михайлов А.С. Измерение параметров ЭМС РЭС. — М.: Связь, 1980. — 200 с.
4. Герасимович А.И., Матвеева Я.И. Математическая статистика. — Мн.: Выш. шк. 1978. — 200 с.
5. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Радио и связь, 1982. — 624 с.

Библиотека БГУИР

Учебное издание

**СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ  
НЕПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ НА РЕЦЕПТОРЫ**

Методическое руководство  
к лабораторной работе  
по курсу «Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств»  
для студентов специальностей «Радиотехника» и «Радиоэлектронные системы»  
дневной, вечерней и заочной форм обучения

Составитель  
**Кереселидзе Евгений Владимирович**

Редактор Т.Н. Крюкова  
Корректор Е.Н. Батурчик  
Компьютерная верстка Т.В. Шестакова

---

Подписано в печать 03.05.2003.  
Печать офсетная.  
Уч.- изд. л. 1,2.

Формат 60x84 1/16.  
Гарнитура «Таймс».  
Тираж 150 экз.

Бумага офсетная.  
Усл. печ. л. 1,51.  
Заказ 40.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».  
Лицензия ЛП № 156 от 30.12.2002.  
Лицензия ЛВ № 509 от 03.08.2001.  
220013, Минск, П. Бровка, 6.