

Федеральное агентство по образованию Российской Федерации  
Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова

**Т. К. Артёмова  
А. С. Гвоздарёв  
Н. И. Фомичёв**

# **Электромагнитная совместимость**

*Задачник*

*Рекомендовано*

*Научно-методическим советом университета для студентов,  
обучающихся по направлениям магистратуры Радиофизика,  
Радиотехника, Телекоммуникации*

Ярославль 2012

УДК 621.396(076.1)  
ББК 3841–017я73–4  
А 86

*Рекомендовано  
Редакционно-издательским советом университета  
в качестве учебного издания. План 2011 года*

Рецензент  
кафедра радиофизики  
Ярославского государственного университета им. П. Г. Демидова

**Артёмова, Т. К.** Электромагнитная совместимость: задачник / Т. К. Артёмова, А. С. Гвоздарёв, Н. И. Фомичёв; Ярослав. гос. ун-т им. П. Г. Демидова. – Ярославль : ЯрГУ, 2012. – 56 с.

В задачнике собраны краткое изложение теоретического материала и авторские задачи по основным понятиям электромагнитной совместимости радиоэлектронных систем.

Рассматриваются характеристики излучения передатчиков, естественных и искусственных помех, модели потерь при распространении сигнала и помехи в канале, характеристики приёмников, влияние параметров антенн, эффекты воздействия помех. Разобраны критерии ЭМС и этапы оценки ЭМС. Предлагаются задачи и на обеспечение ЭМС простейшими способами, в том числе на этапе проектирования устройств, систем и сетей.

Предназначен для студентов, обучающихся по направлениям магистратуры 010800.68 Радиофизика, 210300.68 Радиотехника, 210400.68 Телекоммуникации (дисциплины «Электромагнитная совместимость», «Внутрисистемная совместимость ЭМС РТС», блок ДНМ, Б, М), очной формы обучения.

УДК 621.396(076.1)  
ББК 3841–017я73–4

© Ярославский государственный  
университет им. П. Г. Демидова,  
2012

# Введение

Задачник посвящён основным понятиям и моделям детерминированной теории ЭМС. Авторы рассматривают такие вопросы, как характеристики излучения передатчиков, естественных и искусственных помех, модели потерь при распространении сигнала и помехи в канале, характеристики приёмников, влияние параметров антенн, эффекты воздействия помех. Разобраны критерии ЭМС и этапы оценки ЭМС. Предлагаются также задачи на обеспечение ЭМС простейшими способами, в том числе на этапе проектирования устройств, систем и сетей.

Из-за ограниченного объёма задачника остались за пределами рассмотрела следующие вопросы ЭМС: статистический анализ помех, оценка вероятности превышения помехами допустимых уровней, обеспечение ЭМС конструкторскими, техническими и технологическими методами, оценка ЭМС при помощи программного обеспечения, распределение радиочастотного ресурса и оценка эффективности его использования, вопросы влияния некачественного питания и распространения помех по цепям управления на ЭМС устройств.

Задачи, требующие численного решения на ЭВМ, помечены значком \*.

## 1. Излучение передатчиков

### 1.1. Эффективная излучаемая мощность

Мощность может быть выражена в дБ относительно некоторой опорной мощности, обычно относительно Вт или мВт:

$$P[\text{дБм}] = 10 \lg \frac{P}{1 \text{ мВт}}. \quad (1.1)$$

Обратное преобразование:

$$P[\text{Вт}] = 10^{0,1P[\text{дБм}]}. \quad (1.2)$$

Потери в кабеле определяются погонным затуханием  $\alpha$  и длиной кабеля  $l$ :

$$L_{\kappa}[\text{дБ}] = \alpha \cdot l, \quad (1.3)$$

$$L_{\kappa}[\text{дБ}] = 10 \lg L_{\kappa},$$

$$L_{\kappa} = 10^{0,1 L_{\kappa}[\text{дБ}]}.$$

Полные потери в фидере складываются из потерь в джамперах  $L_{\text{Д}}$ , потерь в магистральном кабеле  $L_{\kappa}$ , потерь, вызванных рассогласованием антенны с фидерами  $L_p$ :

$$L_{\phi} = \sum L_{\text{Д}} + L_{\kappa} + L_p. \quad (1.4)$$

Потери  $L_p$  определяются тем, что на каждой фиксированной частоте, кроме прямой волны, несущей энергию от генератора к антенне и имеющей комплексную амплитуду  $\dot{U}_1$ , в фидере существует и обратная волна, возникающая в результате отражения от антенны и имеющая комплексную амплитуду  $\dot{U}_2$ . Эти волны имеют мощности  $P_1$  и  $P_2$  соответственно.

Рассогласование характеризуется также коэффициентом отражения:

$$\dot{K}_{\text{отр}} = \dot{U}_2 / \dot{U}_1 \quad (1.5)$$

и коэффициентом стоячей волны:

$$KCB = \frac{U_{\text{max}}}{U_{\text{min}}} = \frac{\dot{U}_1 + \dot{U}_2}{\dot{U}_1 - \dot{U}_2} = \frac{1 + \dot{K}_{\text{отр}}}{1 - \dot{K}_{\text{отр}}}, \quad (1.6)$$

$$\dot{K}_{\text{отр}} = \frac{KCB - 1}{KCB + 1}. \quad (1.7)$$

Коэффициент полезного действия соединения «фидер – антенна» определяется выражением:

$$\eta = \frac{P_1}{P_1 + P_2} = \frac{1}{1 + |\dot{K}_{omp}|}. \quad (1.8)$$

Потери рассогласования связаны с КПД выражением:

$$L_p = -10 \lg \eta. \quad (1.9)$$

Эффективная излучаемая мощность равна:

$$P_{эфф.изл.} = P_{подв.} \cdot G_{\max}, \quad (1.10)$$

где  $P_{подв.}$  – подводимая к антенне мощность:

$$P_{подв.}[\text{дБм}] = P[\text{дБм}] - L_{\phi}, \quad (1.11)$$

а  $G_{\max}$  – максимальный коэффициент усиления антенны. Коэффициент усиления антенны определяется его диаграммой направленности и меняется в зависимости от направления, характеризующегося углами сферической системы координат  $\theta$  и  $\varphi$ :

$$G(\theta, \varphi) = G_{\max} \cdot F^2(\theta, \varphi). \quad (1.12)$$

## 1.2. Частотные характеристики излучения передатчиков

Октава – интервал, для которого отношение граничных частот  $f_2 / f_1 = 2$ .

Декада – интервал, для которого отношение граничных частот  $f_2 / f_1 = 10$ .

Коэффициент прямоугольности частотной характеристики:

$$P_{\alpha} = \frac{\Delta f_{\alpha}}{\Delta f_{-3}}, \quad (1.13)$$

где  $\Delta f_{\alpha}$  – ширина полосы частот по уровню  $\alpha$  дБ от максимума,  $\Delta f_{-3}$  – ширина полосы частот по уровню  $-3$  дБ.

Частоты гармоник основной частоты  $f_0$  равны  $f_n = nf_0$ , частоты субгармоник –  $f_{sn} = f_0 / n$ .

Ширина полосы основного излучения (необходимая полоса) для систем, работающих на амплитудной модуляции (АМ), имеет вид:

$$B_n = \begin{cases} f_v - f_n, & \text{для ОБМ,} \\ 2f_v, & \text{для БАМ или полной АМ,} \end{cases} \quad (1.12)$$

где  $f_v$  и  $f_n$  – верхняя и нижняя граничные частоты модулирующего сигнала, БАМ – балансная амплитудная модуляция, ОБМ – однопольная модуляция с подавленной несущей.

Присвоенная полоса частот отличается от необходимой на величину удвоенной возможной максимальной долговременной нестабильности передатчика за всё время его работы или на удвоенную величину возможного максимального доплеровского сдвига  $\Delta f_{дон}$ :

$$B_{\Pi} = B_n + 2\Delta f_{дон}. \quad (1.13)$$

В соответствии с нормами  $2\Delta f_{дон}$  для радиовещательных передатчиков НЧ, СЧ, ВЧ диапазонов не должна превышать 10 Гц, ОВЧ диапазона – 100 Гц.

Вводится также  $B_k$  – контрольная ширина полосы частот, за пределами которой спектральные составляющие ослаблены на 30 дБ.

За пределами занимаемой полосы частот  $B_{зн}$  остаётся доля  $\beta = 0,5 \%$  (или некоторая другая, но обычно именно 0,5 %) средней мощности радиостанции на присвоенной частоте  $f_0$ . При этом мощность помех от внеполосных излучений станций, работающих в соседних с данной частотных каналах, не превышает  $\beta \%$  мощности сигнала в основном канале приёма.

При построении модели частотной характеристики передатчика огибающая реального спектра аппроксимируется кусочно-линейной ограничительной линией вида

$$P(\Delta f) = P(\Delta f_i) + A_i \lg \frac{\Delta f}{\Delta f_i}, \quad (1.14)$$

где  $P(\Delta f_i)$  – уменьшение уровня мощности излучения при расстройке на  $\Delta f_i$  относительно уровня основного излучения, дБ; а наклон огибающей ограничительной линии спектра в пределах  $i$ -го линейного участка аппроксимации в интервале частот от  $\Delta f_i$  до  $\Delta f_{i+1}$  имеет вид (в дБ/дек):

$$A_i = \frac{P(\Delta f_{i+1}) - P(\Delta f_i)}{\lg \frac{\Delta f_{i+1}}{\Delta f_i}} \quad (1.15)$$

и характеризует скорость убывания мощности спектральных составляющих излучения.

Комбинационное излучение – это побочное излучение на частотах  $f_k$ , получающихся в результате взаимодействия на нелинейном элементе передатчика колебаний, формирующих несущую, и их гармоник. Если сигнал частоты  $f_k$  создаётся путём нелинейного преобразования сигналов частот  $f_1$ ,  $f_2$  и  $f_3$ , то

$$f_k = |pf_1 \pm qf_2 \pm mf_3|, \quad p, q, m = 1, 2, \dots \quad (1.16)$$

Интермодуляционное излучение на частотах  $f_u$  возникает при взаимодействии близко расположенных передатчиков, например двух с частотами  $f_1$  и  $f_2$ :

$$f_u = |pf_1 \pm qf_2|, \quad p, q = 1, 2, \dots \quad (1.17)$$

Сочетание  $p + q$  называется порядком интермодуляции.

У комбинационных, интермодуляционных и шумовых излучений спектры описываются аналогично выражению (1.13).

Для отстроек частот  $\Delta f > B_{-3} / 2$  (за пределами основного канала передатчика) излучение можно моделировать при помощи выражения

$$M(\Delta f) = 60 \frac{\lg(2\Delta f / B_{-3})}{\lg \Pi_{-60}}. \quad (1.18)$$

### 1.3. Задачи для самостоятельного решения

1.1. Выразите мощность передатчика в дБм, если она равна:

а) 1 мВт,                  б) 10 Вт,                  в) 16 Вт,                  г) 10 мкВт.

1.2. Погонное затухание в кабеле на выбранной частоте равно 0,1 дБ/м. Определите потери в кабеле в дБ и размах, если его длина равна:

а) 1 м,                  б) 10 м,                  в) 30 м,                  г) 100 м.

1.3. Мощность передатчика 50 Вт, потери в каждом из джамперов 0,1 дБ, погонное затухание в кабеле на выбранной частоте 0,05 дБ/м, длина кабеля 30 м. Определите суммарные потери в фидере и мощность, подведённую к антенне, в Вт и дБм.

1.4. КСВ в питающем антенну кабеле равно 1,5. Определите потери на рассогласование, а также коэффициент отражения от антенны и КПД соединения «кабель – антенна».

1.5. Антенна соединена с передатчиком без магистрального кабеля, потерями в очень коротком соединительном кабеле можно пренебречь. К антенне поступает мощность 10 Вт, максимальный коэффициент усиления антенны 18 дБ, КСВ равен 1,5. Выразите максимальный коэффициент усиления в размах, определите потери мощности и эффективную излучаемую мощность в дБм и размах.

1.6. Диаграмма направленности антенны в горизонтальной плоскости круговая, в вертикальной – описывается законом  $F(\theta) = |\sin \theta|$ . Максимальная эффективная излучаемая мощность равна 20 дБм. Определите, какая эффективная мощность излучается в направлении 60 градусов к горизонту, к земле.

1.7. Квазимонохроматический передатчик работает на частоте 100 МГц. Определите частоты первых четырёх гармоник и субгармоник этого передатчика.

1.8. Номинальная мощность квазимонохроматического передатчика равна 10 Вт. Считая, что ослабление мощности на частотах гармоник и субгармоник определяется законом  $(n!)^2$ , где  $n$  – номер гармоники (субгармоники), определите мощность передатчика на первых четырёх гармониках и субгармониках. Постройте



спектральную плотность мощности сигнала, учитывая только эти компоненты спектра сигнала.

1.9. Ослабление мощности передатчика на частотах гармоник и субгармоник определяется законом  $(n!)^2$ , где  $n$  – номер гармоники (субгармоники). Определите номер гармоники (субгармоники), которую уже не надо принимать во внимание при анализе ЭМС в соответствии с критериями: учитываются компоненты, которые ослаблены не более чем на

- а) 60 дБ,            б) 80 дБ.

1.10. Основной сигнал передатчика – однотоновая амплитудная модуляция с несущей частотой 100 МГц и шириной спектра 100 кГц. Определите, что представляют собой: а) вторая гармоника; б) третья гармоника. Укажите, какие диапазоны частот они занимают. Найдите ширину спектров этих гармоник.

1.11. Номинальная мощность передатчика 20 Вт на частоте 850 МГц, полоса пропускания равна 1 МГц, внеполосное излучение не превышает –60 дБ. Определите мощность передатчика на частотах:

- а) 850,5 МГц,    б) 849,5 МГц,    в) 851 МГц,    г) 900 МГц.

1.12. Номинальная частота передатчика 10 ГГц, полоса пропускания 1 ГГц. За пределами полосы пропускания скорость спада огибающей спектра либо 30 дБ/октаву, либо 60 дБ/декаду. Найдите ослабление сигнала в обоих случаях для частоты 15 ГГц.

1.13. Определите для передатчика из задачи 1.6 ширину спектра а) по уровню –30 дБ; б) по уровню –60 дБ. Вычислите коэффициенты прямоугольности спектра  $P_{-30}$ ,  $P_{-60}$ .

1.14. Модулирующее излучение – сигнал, состоящий из первых трёх гармоник частоты 1 кГц. Определите необходимую полосу частот АМ-передатчика, если используется: а) полная амплитудная модуляция; б) балансная амплитудная модуляция; в) однополосная амплитудная модуляция с подавленной несущей.

1.15\*. Определите численно контрольную ширину полосы частот, если сигнал передатчика представляет собой прямоугольные импульсы длительностью 1 мкс. Указание: оценку проведите по огибающей спектра.

1.16\*. Определите численно занимаемую полосу частот для передатчика из задания 1.15, если а)  $\beta = 1\%$ ; б)  $\beta = 0,5\%$ .

1.17. Занимаемая полоса частот передатчика 1,2 ГГц определена при  $\beta = 0,5 \%$ . Определите максимальную мощность квазигибелой помехи в соседнем канале, если её мощность в основном канале приёма равна 1 мкВт.

1.18. Определите минимальную ширину присвоенной полосы частот радиовещательного передатчика, если номинальная частота равна 100 МГц, а необходимая полоса частот равна 2,7 кГц.

1.19. Зависимость огибающей спектра передатчика от расстройки частоты  $\Delta f$  протабулирована в таблице 1.1; а) постройте огибающую спектра; б) определите скорость спада огибающей на каждом из участков; в) запишите выражение для огибающей спектра.

Таблица 1.1

$\Delta f$ , ГГц	0,6	1,2	2,4
$\Delta P(\Delta f)$ , дБ	–3	–44	–80

1.20. Скорость спада огибающей спектра сигнала передатчика на одном из участков равна –500 дБ/дек. Выразите эту величину в дБ/октаву.

1.21. Сигнал передатчика частоты 20 ГГц получается путём нелинейных преобразований сигналов частот 2 и 10 ГГц. Определите, какие из комбинационных частот с  $m \leq 2$  и  $n \leq 2$  пройдут через широкополосный оконечный усилитель с полосой пропускания от 16 до 24 ГГц.

1.22. Передатчик CDMA работает на частоте 881,25 МГц и имеет полосу 1,2 МГц; передатчик EGSM – на частоте 889,6 МГц и имеет полосу 6 МГц. Определите, интермодуляционные колебания каких частот попадают в основные каналы передатчиков.

1.23. Первый передатчик работает на номинальной частоте  $f_1 = 1$  ГГц и имеет полосу 10 МГц, второй – на частоте  $f_2 = 1,5$  ГГц и имеет ту же полосу. Определите порядок интермодуляционных колебаний (из первых пяти порядков) и кратность частот  $f_1$  и  $f_2$ , проходящих через оконечный усилитель передатчика.

## 2. Учёт потерь на трассе распространения

### 2.1. Потери в свободном пространстве

Мощность на входе приёмной антенны

$$P_A = P_{эфф.изл.} - L, \quad (2.1)$$

где  $L$  – потери в канале.

Если сигнал с длиной волны  $\lambda$  распространяется в свободном пространстве на расстояние  $R$ , то

$$L_{св.пр.} = \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 = \left( \frac{4\pi fR}{c} \right)^2, \quad (2.2)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме.

Выражение (2.2) можем переписать в логарифмическом масштабе:

$$L_{св.пр.}[\text{дБ}] = 10 \lg L_{св.пр.} = 20 \lg \frac{4\pi R}{\lambda} = 20 \lg \frac{4\pi fR}{c} \quad (2.3)$$

или, выразив частоту в МГц, а расстояние – в километрах:

$$\begin{aligned} L_{св.пр.}[\text{дБ}] &= 20 \lg \frac{4\pi f[\text{МГц}] \cdot 10^6 R[\text{км}] \cdot 10^3}{c} = \\ &= 20 \lg \frac{40\pi}{3} + 20 \lg f[\text{МГц}] + 20 \lg R[\text{км}] = \\ &= 32,441 + 20 \lg f[\text{МГц}] + 20 \lg R[\text{км}]. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Для других трасс есть свои формулы потерь.

### 2.2. Потери в городской среде

Рассмотрим потери при распространении в городе для сетей подвижной радиосвязи. При этом используется модель Окамура – Хата – затухание сигнала при распространении в городских районах:

$$L_2 = 69,55 + 26,16 \lg f - 13,82 \lg h_{BC} - a(h_{AC}) + (44,9 - 6,55 \lg h_{BC}) \lg R, \quad (2.5)$$

где частота выражается в МГц, высоты подвеса антенн базовой  $h_{BC}$  и абонентской  $h_{AC}$  станций – в метрах, расстояние  $R$  между станциями – в км.

Выражения для зависимости от высоты абонентской станции отличаются для разных типов застройки:

для города средних размеров

$$a(h_{AC}) = (1,1 \lg f - 0,7) h_{AC} - 1,56 \lg f + 0,8, \quad (2.6)$$

для крупного города

$$a(h_{AC}) = 3,2(\lg 11,75 h_{AC})^2 - 4,97. \quad (2.7)$$

Для пригорода вместо (2.5) используют выражение

$$L_{приг} = L_2 - 21 \lg(f / 28)^2 - 5,4, \quad (2.8)$$

для сельской местности

$$L_{села} = L_2 - 4,78(\lg f)^2 + 18,33 \lg f - 40,94. \quad (2.9)$$

Модель Окамура – Хата имеет ограничения:

- частота сигнала от 100 до 1500 МГц;
- дальность связи от 1 до 100 км;
- высота подъёма антенны базовой станции от 30 до 200 м;
- высота подъёма антенны абонентской станции от 1 до 10 м.

## 2.3. Задачи для самостоятельного решения

2.1. Эффективная излучаемая мощность источника равна 20 дБм. Потери на трассе распространения на выбранной частоте составили 90 дБ. Определите: а) уровень сигнала на входе приёмной антенны в дБ и мкВт; б) сможет ли приёмник среагировать на такой сигнал, если чувствительность приёмника равна 1 нВт.

2.2. Определите величину потерь на трассе, при которых приёмник из задачи 2.1 воспримет сигнал источника из той же задачи.

2.3. Определите потери в свободном пространстве сигнала с частотой 30 ГГц при распространении на расстояние 1 км в размах и дБ.

2.4. Определите расстояние, на котором сигнал частоты 1 ГГц испытает ослабление 80 дБ.

2.5. Определите, как нужно изменить расстояние между приёмником и передатчиком, чтобы потери при распространении в свободном пространстве: а) уменьшились в 2 раза; б) уменьшились в 9 раз; в) уменьшились на 80 дБ; г) уменьшились на 40 дБ.

2.6. Сигнал частоты 3 ГГц принимается неким приёмником на максимальном расстоянии 1 км. Определите, какой должна быть частота, чтобы при прочих равных условиях тот же приёмник мог принять сигнал на расстоянии 10 км.

2.7. Мощность передатчика равна 40 дБм, потери в фидере 3 дБ, частота сигнала 1 ГГц, коэффициент усиления передающей антенны 18 дБ, приёмная антенна – ненаправленная. Определите уровень сигнала на выходе приёмной антенны (в Вт и дБм), если она расположена на расстоянии 500 м от антенны передатчика.

2.8. Мощность передатчика равна 60 дБм, потери в фидере 3 дБ, частота сигнала 100 МГц, коэффициент усиления передающей антенны 15 дБ, коэффициент усиления приёмной антенны 5 дБ. Определите уровень сигнала на входе приёмной антенны (в Вт и дБ), если она расположена на расстоянии 1 км от антенны передатчика.

2.9. Получите зависимость  $\Delta L[\text{дБ}](n)$  изменения затухания  $L[\text{дБ}]$  от коэффициента увеличения расстояния  $n = R_2 / R_1$ .

2.10. При расширении зоны обслуживания предельное расстояние приёмника от базовой станции увеличилось в а) 2; б) 10 раз. Определите, как нужно изменить при этом мощность передатчика, чтобы качество приёма осталось тем же.

2.11. При расширении зоны обслуживания предельное расстояние приёмника от базовой станции увеличилось в а) 2; б) 10 раз. Определите, как нужно изменить коэффициент усиления передающей антенны, чтобы качество приёма осталось тем же.

2.12. Помеха частоты 1 ГГц от антенны, подвешенной на высоте 30 м, принимается приёмником, расположенным на высоте

1 м на расстоянии 1 км от источника в городе средних размеров. Определите потери на трассе распространения.

2.13. Помеха частоты 0,9 ГГц от антенны, подвешенной на высоте 30 м, принимается приёмником, расположенным на высоте 5 м на расстоянии 5 км от источника в сельской местности. Определите потери на трассе распространения.

2.14. Помеха частоты 450 МГц от антенны, подвешенной на высоте 30 м, принимается приёмником, расположенным на высоте 50 м на расстоянии 1 км от источника в крупном городе. Определите потери на трассе распространения.

2.15. Помеха частоты 600 МГц от антенны, подвешенной на высоте 40 м, принимается приёмником, расположенным на высоте 40 м на расстоянии 3 км от источника в пригороде. Определите потери на трассе распространения.

### 3. Помехи

#### 3.1. Описание помех

Помехи описываются в зависимости от диапазона частот: на частотах выше 100 МГц они описываются средней мощностью, яркостной температурой, а их воздействие – эквивалентной шумовой температурой антенны, на частотах ниже 100 МГц – напряжённостью поля по электрической или магнитной составляющей в полосе частот 1 кГц.

Источники излучения характеризуются в радиодиапазоне яркостной температурой  $T_{\text{я}}$ , по которой можно определить шумовую температуру антенны:

$$T_{\text{ш.а.}} = \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega=4\pi} T_{\text{я}}(\theta, \varphi) G(\theta, \varphi) d\Omega, \quad (3.1)$$

где  $G(\theta, \varphi) = G_{\text{max}} F^2(\theta, \varphi)$  – угловое распределение коэффициента усиления антенны в соответствии с её диаграммой направленности  $F(\theta, \varphi)$ .

Шумовая температура антенны – температура сопротивления, равного входному сопротивлению приёмника, при котором на выходе приёмника выделяется та же мощность, что и от реального внешнего источника.

Обычно возникают два частных случая применения формулы (3.1):

а) если яркостная температура примерно постоянна в пределах главного лепестка диаграммы направленности антенны (это возможно для протяжённого источника, такого как галактика), то можно приближённо считать, что  $T_{ш.а.} \approx T_{я.}$ ;

б) если угловые размеры источника помехи малы по сравнению с шириной диаграммы направленности антенны (это приём излучения дискретных источников, например Солнца и планет), то телесный угол источника  $\Omega_u$  много меньше телесного угла антенны  $\Omega_a$  и можно считать, что  $T_{ш.а.} \approx T_{я.ср.} \frac{\Omega_u}{\Omega_a}$ , где  $T_{я.ср.}$  – сред-

нее значение яркостной температуры источника помехи, а эффективный телесный угол антенны можно найти как  $\Omega_a = \int_{4\pi} G(\theta, \varphi) d\Omega$ .

Мощность внешних широкополосных помех, создаваемая в нагрузке антенны, представляется в виде:

$$P_{ш.вх.} = k_B T_{ш.а.} B_{ш}, \quad (3.2)$$

где  $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Вт/(Гц·К),  $B_{ш}$  – эквивалентная шумовая полоса частот приёмника.

При помощи выражения, аналогичного выражению (3.2), можно представить и другие широкополосные (квазибелые) шумы, влияющие на приём. Таким образом, полная мощность шумов на входе приёмника отображается выражением:

$$P_{ш.вх.} = k_B T_{ш} B_{ш}, \quad (3.3)$$

где полная шумовая температура на входе приёмника отображает воздействие внешних помех (компонентой  $T_{ш.а.}$ ) и внутренних

шумов приёмника, возникающих в нелинейных элементах (компонентой  $T_{ш.пр.}$ , зависящей от типа и конструкции приёмника, см. рис. 3.1) и в линейных ( $T_{ш.ф.}$ ):

$$T_{ш} = T_{ш.пр.} + T_{ш.ф.} + T_{ш.а.}\eta_{\phi}, \quad (3.4)$$

где

$$T_{ш.ф.} = T_{\phi}(1 - \eta_{\phi}), \quad (3.5)$$

где  $T_{\phi}$  – термодинамическая температура фидера в кельвинах, а  $\eta_{\phi}$  – КПД антенно-фидерного тракта.

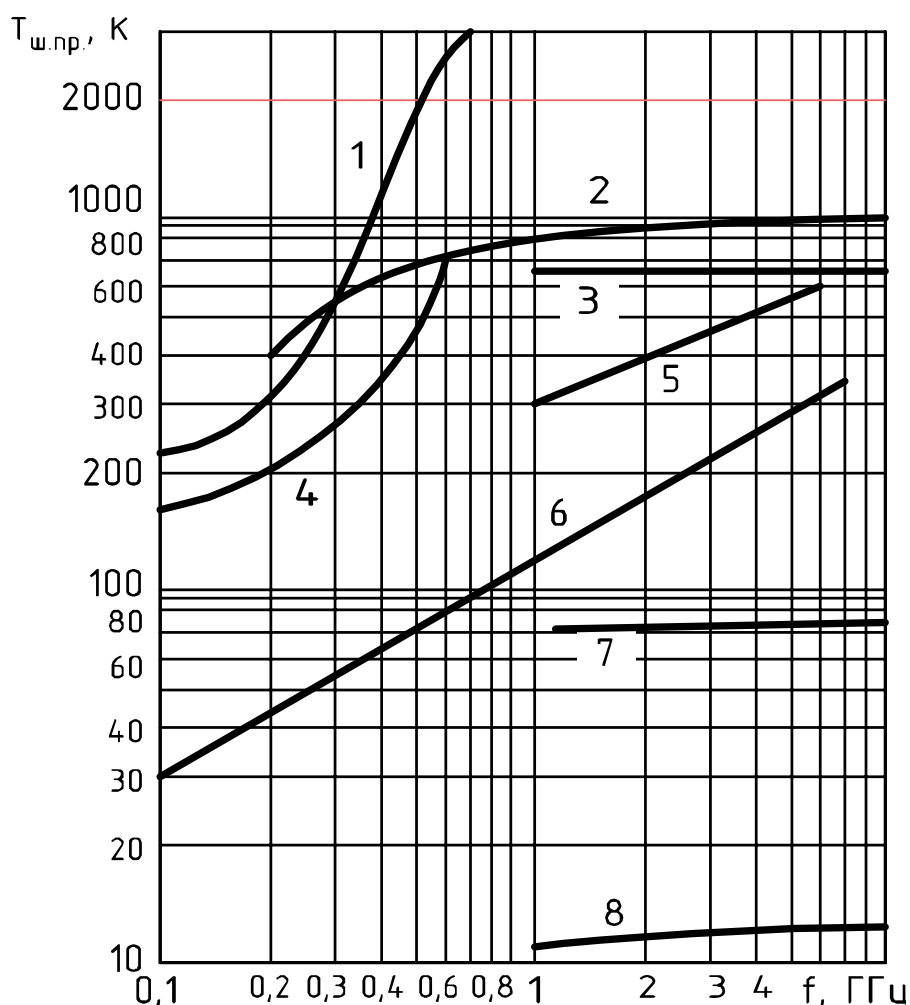


Рис. 3.1. Зависимость шумовой температуры приёмника от частоты для приемников с различными типами входных элементов: 1 – транзисторы; 2 – диодные смесители; 3 – туннельные диоды; 4 – электронные лампы; 5 – лампы бегущей волны; 6 – параметрические усилители; 7 – мазеры, охлаждаемые жидким азотом; 8 – мазеры, охлаждаемые жидким гелием



Напряжение ненаправленных (протяжённых) помех на входе согласованного приёмника (помехи считаются некогерентными, иначе надо брать не корень квадратный из полосы частот, а само значение полосы):

$$U_{\Pi} = 0,5 E_{\Pi} h_{\Pi} \sqrt{B_{\Sigma}}, \quad (3.6)$$

где  $h_{\Pi}$  – действующая длина приёмной антенны в метрах,  $B_{\Sigma}$  – рабочая полоса частот приёмника по основному каналу. Мощность таких помех на входе приёмника:

$$P_{ш.вх.} = \frac{U_{\Pi}^2}{2Z_{\phi}}, \quad (3.7)$$

где  $Z_{\phi}$  – волновое сопротивление фидера (равно характеристическому, если фидер имеет регулярную геометрию).

Выражение (3.3) с учётом (3.4) можно представить в виде:

$$P_{ш.вх.} = k_B T_{ш.пр.} B_{ш} \left( 1 + \frac{T_{ш.ф.}}{T_{ш.пр.}} + \eta_{\phi} \frac{T_{ш.а.}}{T_{ш.пр.}} \right), \quad (3.8)$$

где влияние внешних помех описывается отношением  $F_a = \frac{T_{ш.а.}}{T_{ш.пр.}}$ ,

которое можно выразить в дБ. Такое описание помех можно встретить, например, в [2].

### 3.2. Помехи естественного происхождения

На приём сигналов влияют четыре основных типа естественных помех.

**Шумы космического происхождения.** Они складываются:

– **из космического фона** (образующегося за счёт теплового излучения межзвёздного ионизированного газа и нетеплового излучения, возникающего в результате неравномерного движения заряженных частиц в межзвёздных магнитных полях), вносящего вклад вплоть до частот 1 ГГц. Радиояркостная температура, отображающая прямыми линиями верхнюю и нижнюю границы частотной зависимости космического фона, приведена на рис. 3.2;

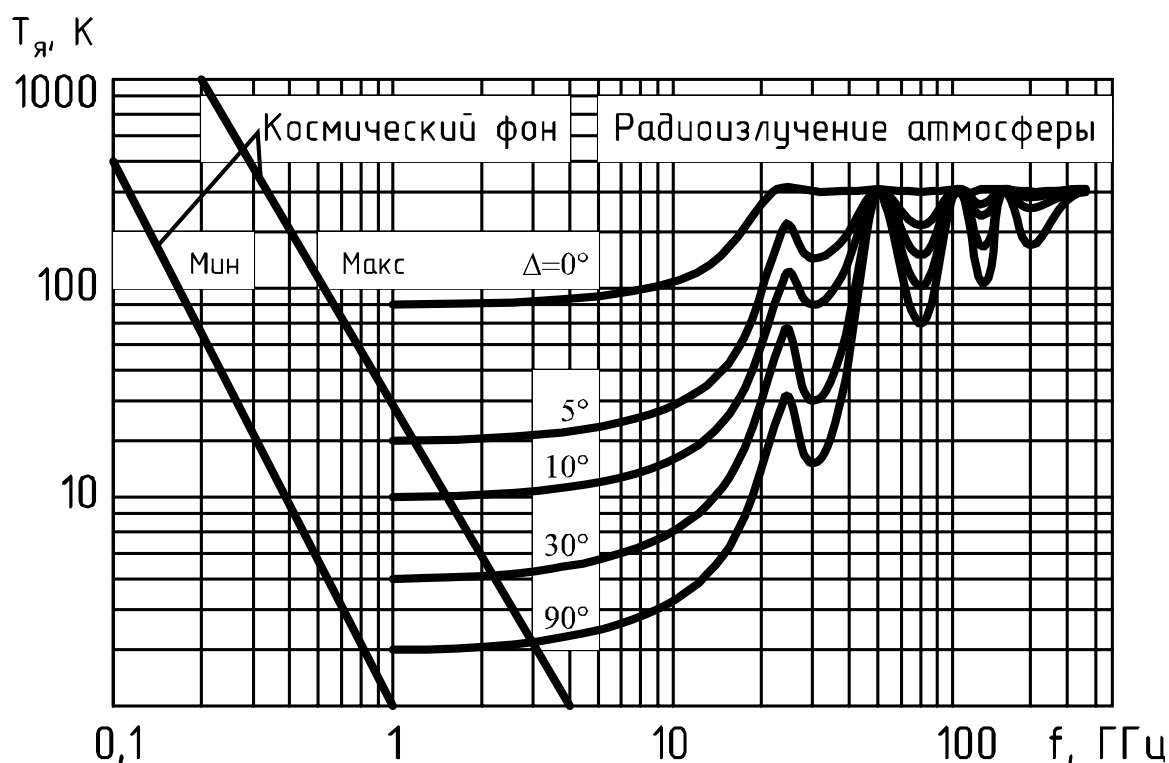


Рис. 3.2. Радиояркостная температура космического фона и атмосферных шумов

– **реликтового излучения**, заметного только при очень точных радиоастрономических излучениях и отображаемого температурой около 2,5 К;

– **излучения дискретных источников** – Солнца и других небесных тел. При этом различают помехи от активного (рис. 3.3, кривая 1) и пассивного (рис. 3.3, кривая 2) Солнца, а из небесных тел наибольшее влияние оказывают Юпитер (рис. 3.3, кривая 3), Венера (рис. 3.3, кривая 4) и Луна (рис. 3.3, кривая 5).

**Радиоизлучение атмосферы.** Оно обусловлено тепловым движением молекул и спонтанными переходами молекул из состояния с большими энергетическими уровнями в состояния с малыми энергетическими уровнями и зависит от толщи атмосферы в заданном направлении приёма и поэтому уменьшается с увеличением угла места антенны  $\Delta = \pi / 2 - \theta$ : при ориентации антенны в зенит  $\Delta = \pi / 2$  толщина атмосферы минимальна и радиояркостная температура излучения атмосферы тоже оказывается минимальной. Кривые частотной зависимости радиоизлучения атмосферы при различных углах места приведены на рис. 3.2.

**Радиоизлучение земной поверхности.** Оно описывается яркостной температурой

$$T_{я.з.} = T_3(1 - R^2), \quad (3.9)$$

где  $T_3$  – термодинамическая температура поверхности Земли, например 290 К, а  $R$  – коэффициент отражения от поверхности Земли.

**Атмосферные помехи.** Они обусловлены в первую очередь излучением, возникающим при грозовых разрядах атмосферного электричества. Разряд молнии является мощным источником излучения с широким непрерывным спектром частот.

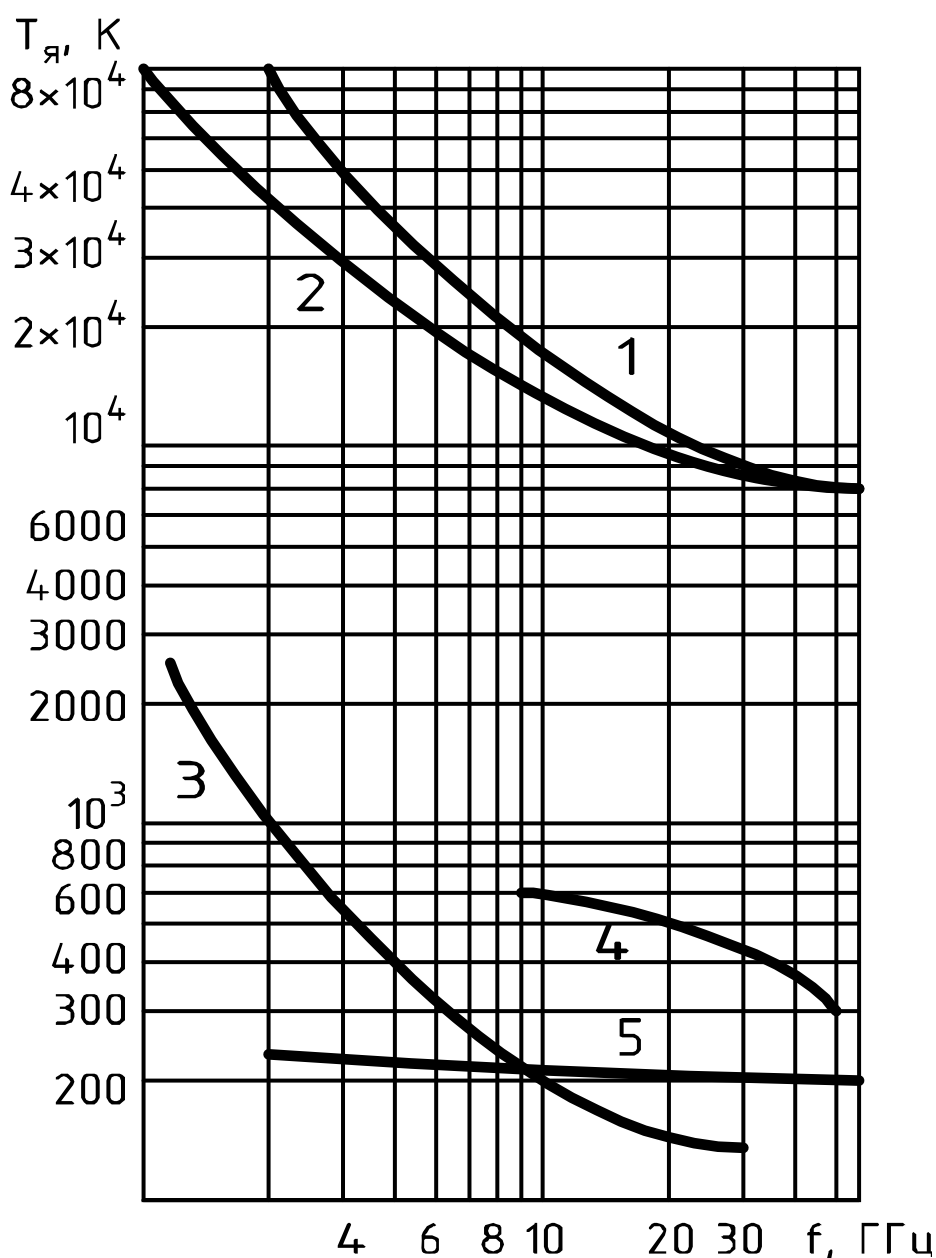


Рис. 3.3. Радиояркостьная температура небесных тел

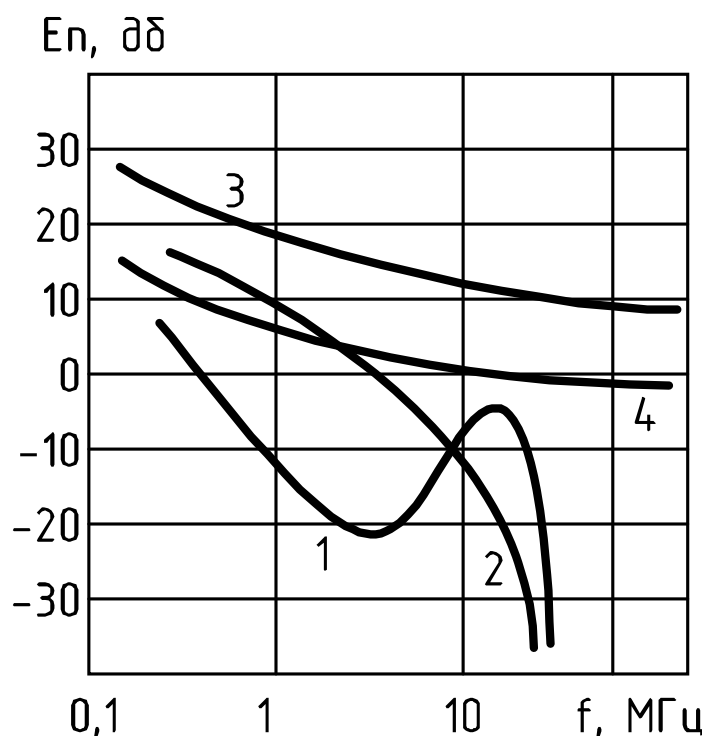


Рис. 3.4. Уровни атмосферных и индустриальных помех

Максимальная интенсивность излучения атмосферных помех соответствует области звуковых частот. В диапазоне радиоволн интенсивность излучения убывает примерно обратно пропорционально частоте и, следовательно, атмосферные помехи оказывают тем меньшее влияние на работу радиоприемных устройств, чем выше частота. Так как воздействие атмосферных помех проявляется в основном до 100 МГц, то они описываются напряженностью поля относительно 1 В/(м·Гц). На рис. 3.4 приведены усредненные данные, позволяющие оценивать порядок уровня атмосферных помех в средних широтах в дневное (кривая 1) и в ночное время (кривая 2).

### 3.3. Помехи искусственного происхождения

Это индустриальные и станционные помехи. Воздействие станционных рассматривается отдельно в соответствии со взаимным расположением источника помех и приемника, их технических характеристик.

Индустриальные же помехи обусловлены излучением промышленных, транспортных, бытовых и других электрических установок. Уровень индустриальных помех меняется в зависимости от насыщенности того или иного района электрическими установками, принятых мер по экранировке излучений и пр. Основ-

ной уровень помех от транспортных средств дают системы зажигания автомобилей. Такие помехи оказывают значительное воздействие на частотах от 1 до 300 МГц. Обычно промышленные помехи оценивают усреднёнными частотными зависимостями по категориям населённых пунктов: крупный город, большой город, пригород, село. Усредненные уровни помех этого вида в больших городах и пригородах можно оценить по кривым 3 и 4 на рис. 3.4. На частотах выше 10 МГц уровень помех от цепей зажигания автомобилей остаётся примерно постоянным до единиц ГГц, остальные помехи убывают.

### **3.4. Задачи для самостоятельного решения**

3.1. Классифицируйте следующие помехи в соответствии с классификацией, приведённой в [2]: а) сигнал РЛС аэропорта для мобильной станции (МС) GSM-900; б) сигнал одной МС CDMA другой МС CDMA; в) грозовой разряд приёмнику радиовещания; г) сигнал в цепи, включённой с заземлением близко к цепи рецептора.

3.2. Классифицируйте следующие помехи в соответствии с классификацией, приведённой в [2]: а) сигнал РЛС радиолокатора аэропорта; б) сигнал МС подвижной радиосвязи для цепей автомобиля; в) шум Галактики радиотелескопу, проводящему радиоастрономические наблюдения; г) искра контактной цепи троллейбуса Bluetooth-приёмнику на проигрывателе музыки.

3.3. Классифицируйте следующие помехи в соответствии с классификацией, приведённой в [2]: а) обобщённый фон города для базовой станции сотовой связи стандарта GSM-1800; б) сигнал многоканальной системы спутниковой связи медицинской аппаратуре; в) излучение линии электропередач для АМ-радиоприёмника; г) гармоники сетевого напряжения синхронному детектору; д) сигнал несущей АМ-сигнала радиопередатчика частоты 100 МГц звуковому каналу телевизионного приёмника.

3.4. Приёмник работает на частоте настройки 10 ГГц, ширина главного лепестка диаграммы направленности антенны 1 градус в обеих плоскостях, полоса пропускания приёмника равна 1 ГГц. Определите: а) яркостную температуру спокойного Солнца на частоте настройки; б) шумовую температуру антенны при приёме

шумов спокойного Солнца; в) мощность шумов Солнца на входе приёмника.

3.5. Приёмник такой же, как и в задаче 3.4. Определите: а) яркостную температуру активного Солнца; б) шумовую температуру активного Солнца; в) мощность шумов активного Солнца на входе приёмника; г) во сколько раз мощность шумов на входе приёмника при активном Солнце превышает аналогичную величину при спокойном Солнце.

3.6.\* Сверхширокополосный приёмник настроен на частоту 10 ГГц и имеет полосу 4 ГГц. Ширина главного лепестка диаграммы направленности антенны равна 5 градусов в обеих плоскостях. Определите численно: а) мощность шумов активного Солнца на входе приёмника; б) мощность шумов пассивного Солнца на входе приёмника.

3.7. Приёмник такой же, как в задаче 3.4. Определите: а) яркостную температуру Юпитера и Венеры; б) шумовую температуру антенны от излучения Юпитера и Венеры; в) мощность шумов, создаваемых излучением этих планет на входе приёмника; г) мощность шумов всех дискретных источников космического происхождения в дневное время.

3.9. Приёмник, настроенный на частоту 900 МГц, имеет полосу пропускания 6 МГц. Ширина диаграммы направленности антенны равна 120 градусов в горизонтальной плоскости, 10 градусов – в вертикальной плоскости, направление максимального приёма горизонтально. Определите: а) яркостную температуру источников помех естественного происхождения для этого приёмника; б) шумовые температуры антенны, отображающие воздействие этих помех; в) суммарную температуру антенны; г) суммарную мощность помех на входе приёмника.

3.10. Антенна приёмника ориентирована под углом 10 градусов к горизонту. Максимальный уровень боковых лепестков равен –20 дБ, коэффициент защитного действия антенна равен –40 дБ. Частота настройки приёмника 10 ГГц, ширина диаграммы направленности антенны 1,5 градуса в обеих плоскостях, полоса частот приёмника 100 МГц. Определите: а) шумовую температуру антенны и мощность шумов на входе приёмника от космического фона; б) шумовую температуру антенны и мощность шумов на входе приёмника от пассивного Солнца в мо-

мент, когда его излучение принимается задними лепестками диаграммы направленности антенны; в) шумовую температуру антенны и мощность шумов на входе приёмника от пассивного Солнца в момент, когда его излучение принимается боковыми лепестками диаграммы направленности антенны; г) шумовую температуру антенны и мощность шумов на входе приёмника от пассивного Солнца в момент, когда его излучение принимается главным лепестком диаграммы направленности антенны; д) оцените, какую степень защиты от этих помех даёт разворот антенны к источнику боковыми и задними лепестками.

3.11. Приёмник с настройкой на частоту 450 МГц имеет полосу 25 кГц. Определите: а) минимальный уровень помех от космического фона на входе приёмника; б) максимальный уровень помех от космического фона; в) сравните эти уровни с уровнями помех от радиоизлучения атмосферы, если направление максимального приёма антенны горизонтально; г) определите полную мощность помех на входе приёмника от распределённых источников естественного происхождения.

3.12. Определите, на каких частотах радиоизлучение атмосферы будет минимальным, если возможный диапазон частот – от 2 до 100 ГГц.

3.13. Коэффициент отражения от земной поверхности на некоторой частоте весенним днём равен 0,05. Определите для приёмника с полосой частот 10 кГц: а) яркостную температуру Земли как источника помех; б) шумовую температуру антенны, отображающую излучение Земли; в) мощность помех Земли на входе приёмника.

3.14. КПД фидера, работающего при нормальной температуре, равен 90 %. Определите его шумовую температуру.

3.15. Приёмник настроен на частоту 450 МГц и имеет полосу 25 кГц. Определите уровень его собственных шумов для следующих входных элементов: а) транзистор; б) диодный смеситель; в) электронная лампа; г) параметрический усилитель.

3.16. Для условий задачи 3.15 определите, какой выигрыш в соотношении «сигнал/шум» на выходе приёмника даёт по сравнению с транзистором применение других входных элементов.

3.17. Приёмник настроен на частоту 10 ГГц и имеет полосу пропускания 200 МГц. Определите уровень его собственных шу-

мов для следующих входных элементов: а) туннельный диод; б) мазер с охлаждением жидким азотом; в) мазер с охлаждением жидким гелием; г) лампа бегущей волны.

3.18. Для условий задачи 3.17 определите, какой выигрыш в соотношении «сигнал/шум» на выходе приёмника даёт по сравнению с туннельным диодом применение других входных элементов.

3.19. Приёмник с частотой настройки 10 ГГц и полосой 1 МГц, шириной диаграммы направленности антенны 2 градуса в обеих плоскостях имеет входным элементом туннельный диод. Определите, какую долю собственных шумов приёмника составляют шумы спокойного Солнца при попадании в главный лепесток антенны приёмника.

3.20. Транзисторный приёмник с частотой настройки 27 МГц и полосой 10 кГц имеет линейную антенну с действующей длиной 3 м. Определите: а) напряжение некогерентной атмосферной помехи в дневное время; б) напряжение некогерентной атмосферной помехи в ночное время; в) мощность шумов на входе приёмника днём и г) ночью, если волновое сопротивление фидера стандартное – 50 Ом.

3.21. Приёмник из задачи 3.20 подвергается действию промышленных помех в большом городе. Определите: а) напряжение некогерентных промышленных помех; б) мощность шумов от них на входе приёмника; в) насколько мощность шумов от промышленных помех в крупном городе выше, чем в пригороде.

3.22. Экстраполируя зависимости внутренних шумов приёмника, определите соотношение «помеха – шум» для приёмника из задачи 3.20 и а) промышленных помех большого города; б) дневных атмосферных помех; в) определите полную мощность внешних шумов при приёме в городе днём; г) полную мощность шумов на входе приёмника.

3.23. Приёмник на туннельном диоде имеет частоту настройки 10 ГГц, полосу пропускания 200 МГц, диаграмму направленности с шириной 2 градуса в обеих плоскостях, уровень боковых лепестков –20 дБ. Определите мощность шумов на входе приёмника для случаев: а) Солнце находится в секторе боковых лепестков; б) Солнце находится в секторе главного лепестка. Остальные источники отберите для анализа самостоятельно.



## 4. Характеристики приёмников

### 4.1. Чувствительность

Определяют два типа чувствительности приёмника.

Пороговая чувствительность  $P_{пор}$  – уровень входного сигнала, при котором отношение «сигнал – шум» на выходе равно 0 дБ.

Реальная чувствительность – уровень мощности входного сигнала  $P_{реал}$ , при котором соотношение «сигнал – шум» на выходе равняется заданной величине  $Q_{вых}$ . Её можно определить следующим образом:

$$P_{реал} = k_B T_0 B_{ш} \left( \frac{T_a}{T_0} + F_{ш} - 1 \right) F_{ш} Q_{вых}, \quad (4.1)$$

где  $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – постоянная Больцмана,  $T_0$  – абсолютная температура окружающей среды (зачастую берут 290 К),  $B_{ш}$  – ширина эффективной полосы шумов приёмника,  $F_{ш}$  – шум-фактор приёмника,  $T_a$  – эффективная шумовая температура антенны.

Динамический диапазон приёмника – отношение максимальной амплитуды сигнала на входе приёмника  $U_{с\max}$ , при которой нелинейные искажения равны допустимому значению, к его минимальной амплитуде  $U_{с\min}$ , определяемой реальной чувствительностью приёмника:

$$D = \frac{U_{с\max}}{U_{с\min}}. \quad (4.2)$$

### 4.2. Частотная избирательность приёмника по основному каналу

Ширина полосы пропускания приёмника по основному каналу определяется необходимой шириной полосы:

$$B_з = B_n + 2\Delta f_{пл}, \quad (4.1)$$

где отклонение частоты радиолinii от присвоенной  $\Delta f_{pl}$  складывается из нестабильности частот настройки передатчика  $\Delta f_T$  и приёмника  $\Delta f_R$ :

$$\Delta f_{pl} = \Delta f_T + \Delta f_R. \quad (4.2)$$

Математическая модель характеристики частотной избирательности приёмника представляет собой аппроксимацию кусочно-линейными отрезками:

$$S(\Delta f) = S(f_i) + C_i \lg \frac{\Delta f}{\Delta f_i}, \quad \Delta f_i < \Delta f < \Delta f_{i+1}, \quad (4.3)$$

где  $S(\Delta f)$  – величина ослабления сигнала при расстройке на  $\Delta f$  относительно центральной частоты усилителя промежуточной частоты (УПЧ), дБ, а наклон  $i$ -го участка равен:

$$C_i = \frac{S(\Delta f_{i+1}) - S(\Delta f_i)}{\lg \frac{\Delta f_{i+1}}{\Delta f_i}}. \quad (4.4)$$

С учётом коэффициента прямоугольности характеристики избирательности её модель можно записать в виде:

$$S(\Delta f) = \begin{cases} 0, & |\Delta f| \leq 0,5B_3, \\ \lg \frac{\Delta f}{B_{-60}}, & 0,5B_3 \leq |\Delta f| \leq 0,5B_{-60}. \end{cases} \quad (4.5)$$

### 4.3. Побочные каналы приёма

Будем считать, что входной сигнал частоты  $f_c$  проходит цепи ВЧ и после преобразования с сигналом гетеродина частоты  $f_c$  в смесителе поступает в канал промежуточной частоты

$f_{ПЧ} = |f_z - f_c|$  с шириной полосы частот  $B_{ПЧ}$ , а затем усиливается усилителем промежуточной частоты.

Сигнал (или помеха) попадает в полосу пропускания канала промежуточной частоты приёмника  $B_{ПЧ}$ , если

$$|pf_c \pm mf_z| = f_{ПЧ} \pm 0,5B_{ПЧ}, \quad (4.6)$$

где  $p, m = 0, 1, 2, \dots$  – номера гармоник сигнала и гетеродина соответственно. При этом образуется побочный канал порядка  $N = p + m$ . Центральные частоты побочных каналов определяются общим выражением:

$$f_{ПК} = \left| \frac{mf_z \pm f_{ПЧ}}{p} \right|. \quad (4.7)$$

Частоты важнейших побочных каналов получаются из (4.7) подстановкой конкретных пар значений  $m$  и  $p$ . Это:

– побочный канал на промежуточной частоте (получается при  $p = 1$  и  $m = 0$ )  $f_{ПЧ}$ ;

– побочный канал на зеркальной частоте (при  $p = 1$  и  $m = 1$ ):

$$f_z = f_c + f_{ПЧ} = f_c + 2f_{ПЧ}; \quad (4.8)$$

– комбинационные каналы приёма (на гармониках гетеродина, при  $p = 1, m = 2, 3, \dots$ ):

$$f_k = mf_z \pm f_{ПЧ}; \quad (4.9)$$

– побочные каналы на субгармониках сигнала ( $m = 1, p = 2, 3, \dots$ ):

$$\frac{f_z - f_{ПЧ}}{p} = \frac{f_0}{p}; \quad (4.10)$$

– побочные каналы на субгармониках зеркальной частоты ( $m = 1, p = 2, 3, \dots$ ):

$$\frac{f_2 + f_{ПЧ}}{p} = \frac{f_3}{p}, \quad (4.11)$$

– нелинейные побочные каналы (при  $p, m = 2, 3, \dots$ ):

$$f_{НПК} = \frac{mf_2 \pm f_{ПЧ}}{p}, \quad (4.12)$$

в том числе при одинаковых значениях  $m$  и  $p$  получаем  $f_{НПК} = f_2 \pm \frac{f_{ПЧ}}{p}$  (при  $p = 2$  такой канал называется полужеркальным).

#### 4.4. Характеристики антенн

Антенны характеризуются диаграммой направленности  $F(\theta, \varphi)$ , которая обычно представляется своими двумя главными сечениями – вертикальным  $F_\theta(\theta)$  и горизонтальным  $F_\varphi(\varphi)$ . Коэффициент усиления антенны также является функцией пространственных углов:

$$G(\theta, \varphi) = G_{\max} F^2(\theta, \varphi), \quad (4.13)$$

где  $G_{\max}$  – максимальный коэффициент усиления антенны.

К параметрам ЭМС антенн относятся ещё два коэффициента.

Коэффициент кроссполяризационной защиты антенны показывает ослабление излучения перекрёстной поляризации относительно основной:

$$XPD(\varphi) = G_{\text{осн}}(\varphi) - G_{\text{кросспол}}(\varphi). \quad (4.14)$$

Максимум для всех типов антенн наблюдается в главном направлении приёма.

Коэффициент защитного действия антенны характеризует разность коэффициентов усиления антенны в главном направлении ( $\varphi = 0$ ) и в обратном направлении, с задних лепестков ( $\varphi = 180$ ):

$$K_{з.д.} = G(\varphi = 0) - G(\varphi = 180). \quad (4.15)$$

## 4.5. Задачи для самостоятельного решения

4.1. Получите выражение (4.1), если для шума используется модель Найквиста, шум-фактор определяется как отношение  $F_{ш} = Q_{вх} / Q_{вых}$ , шум приёмника приводится ко входу и складывается с атмосферными шумами, которые выражаются эффективной шумовой температурой антенны  $T_a$ .

4.2. Шумовая температура антенны близка к температуре окружающей среды (290 К). Шум-фактор приёмника равен 10 дБ, эффективная полоса шумов приёмника равна 1 МГц. Требуемое отношение «сигнал – шум» на выходе приёмника 20 дБ. Определите реальную чувствительность приёмника.

4.3. Определите пороговую чувствительность приёмника из задачи 4.2.

4.4. Максимальный уровень сигнала на входе приёмника, при котором нелинейные искажения ещё допустимы, равен 1 Вт. Уровень реальной чувствительности – 1 пВт. Определите динамический диапазон приёмника: а) в дБ; б) в размах.

4.5. Необходимая полоса частот системы 25 кГц, нестабильность частоты передатчика и приёмника 100 Гц. Определите ширину полосы пропускания приёмника такой системы по основному каналу.

4.6. Частотная избирательность приёмника протабулирована и приведена в таблице 4.1; а) постройте характеристику избирательности; б) определите наклон всех её участков; в) запишите выражение для избирательности приёмника.

Таблица 4.1

$\Delta f$ , кГц	0	1,5	4,5	9
$S(\Delta f)$ , дБ	0	0	3	60

4.7. Определите величину избирательности приёмника из задачи 4.6 (номинальная частота настройки равна 100 МГц) на частотах: а) 100,003 МГц; б) 100,006 МГц; в) 99,997 МГц; г) 99,994 МГц.

4.8. Коэффициент прямоугольности характеристики избирательности приёмника равен 4, полоса по уровню 60 дБ равна

10 кГц, полоса частот основного канала равна 2,7 кГц. Определите избирательность при расстройках частоты: а) 1 кГц; б) 1,5 кГц; в) 5 кГц; г) 10 кГц.

4.9. Частота настройки приёмника 36 ГГц. Определите: а) частоту сигнала гетеродина (промежуточная частота – разностная, настройка гетеродина – нижняя); б) центральную частоту побочного канала на промежуточной частоте; в) центральную частоту зеркального канала.

4.10. Для приёмника из задачи 4.9 определите центральные частоты: а) первых пяти комбинационных каналов приёма; б) первых трёх нелинейных побочных каналов.

4.11. Для приёмника из задачи 4.9 определите каналы, чьи частоты попадают в полосу 1,5 полосы пропускания тракта промежуточной частоты (равной 800 МГц) в окрестности промежуточной частоты.

4.12. Скорость изменения частотной избирательности на одном из участков характеристики избирательности равна 60 дБ/окт. Выразите эту величину в дБ/дек.

4.13. Скорость изменения частотной избирательности на одном из участков характеристики избирательности равна 120 дБ/окт. Определите полное изменение избирательности на участке, если его протяжённость 0,5 дек.

4.14. Частота гетеродина 5 ГГц, частота зеркального канала 5,1 ГГц. Определите: а) промежуточную частоту; б) частоту сигнала; в) тип настройки гетеродина.

4.15. Необходимая для передачи некоторого сигнала полоса частот равна 2,9 МГц, ширина полосы основного канала приёмника – 3 МГц. На какую величину нестабильности частоты передатчика и приёмника рассчитана система? Указание: считать нестабильность передатчика и приёмника одинаковой.

4.16. Для задачи 4.9 определите частоты побочных каналов: а) на субгармониках сигнала; б) на субгармониках зеркальной частоты.

4.17. Гетеродин имеет нижнюю настройку на частоту 881 МГц, промежуточная частота равна 0,25 МГц. Определите частоту настройки приёмника и частоту зеркального канала.

4.18. Для приёмника из задачи 4.17 определите те же величины для случая верхней настройки гетеродина.

4.19. Определите, какие побочные каналы отсутствуют у гетеродинного приёмника по сравнению с супергетеродинным.

4.20. Частота настройки приёмника 36 ГГц, промежуточная частота равна 2 ГГц, настройка гетеродина нижняя, полоса частот тракта промежуточной частоты равна 800 МГц. Определите порядки побочных каналов на субгармониках сигнала и субгармониках зеркальной частоты, пересекающихся с каналом промежуточной частоты.

4.21. Сигнал передатчика с антенной, имеющей максимальный коэффициент усиления 1,5 и диаграмму направленности  $F(\theta, \varphi) = |\sin(\theta)|$ , принимается приёмником с изотропной антенной. Определите ослабление суммарного коэффициента усиления двух антенн  $\Delta G$  за счёт влияния диаграммы направленности, если угол между линией, соединяющей антенны, и вертикалью равен: а) 0; б) 30 градусов; в) 45 градусов; г) 90 градусов.

4.22. Сигнал передатчика с антенной, имеющей максимальный коэффициент усиления 1,5 и диаграмму направленности  $F(\theta, \varphi) = |\sin(\theta)|$ , принимается приёмником с такой же вертикальной антенной. Определите ослабление суммарного коэффициента усиления двух антенн  $\Delta G$  за счёт влияния диаграммы направленности, если угол между линией, соединяющей антенны, и вертикалью равен: а) 0; б) 30 градусов; в) 45 градусов; г) 90 градусов.

4.23. Коэффициент защитного действия антенны приёмника равен 30 дБ. Мощность сигнала, принимаемого антенной с направления максимального приёма, равна на выходе антенны – 60 дБм. Определите мощность помехи на выходе антенны, если помеха с той же плотностью потока мощности, что и сигнал, поступает с задних лепестков.

4.24. В направлении (45,45) коэффициент усиления антенны приёмника на основной поляризации равен 18 дБ, на кроссполяризации равен 3 дБ. Считая, что на основной поляризации принимается сигнал, а на кроссполяризации – помеха, определите: а) коэффициент кроссполяризационной защиты в этом направлении; б) соотношение «сигнал – помеха» на выходе антенны, если на входе оно равно 0 дБ.

## 5. Эффекты воздействия помех

Помехи, преобразуясь в нелинейных элементах приёмника, взаимодействуя с полезным сигналом и друг с другом, порождают различные негативные эффекты: блокирование, перекрёстные искажения, интермодуляцию различных порядков. Эти эффекты проявляются по-разному в гетеродинном и супергетеродинном приёмниках, при этом считается, что смесители работают в линейном режиме и нелинейные эффекты возникают в первую очередь в усилителях. В гетеродинном приёмнике это один усилитель – высокой частоты – УВЧ, а в супергетеродинном – два: УВЧ и усилитель промежуточной частоты – УПЧ. Для теоретического анализа предполагают, что вольт-амперная характеристика (ВАХ) рабочего элемента этих усилителей представляется в виде степенной аппроксимации: третьей степени для УВЧ и четвёртой – для УПЧ. Для анализа более тонких эффектов берут аналогично пятую и шестую степени. Анализ проводится на гармонических сигналах или сигналах с амплитудной модуляцией.

### 5.1. Блокирование

Блокирование – это уменьшение амплитуды полезного сигнала и соответствующее уменьшение отношения «сигнал/шум» на выходе приёмника в результате действия на его вход помехи с частотой, не совпадающей с частотами основного и побочных каналов приёма.

Пусть полезный сигнал и помеха являются гармоническими и могут быть записаны в виде:

$$u_c(t) = U_c \cos \omega_c t, \quad u_{\Pi}(t) = U_{\Pi} \cos \omega_{\Pi} t, \quad (5.1)$$

тогда напряжение на входе нелинейного элемента является суммой  $u_{вх} = u_c + u_{\Pi}$  и на выходе элемента УВЧ составляющая тока первой гармоники полезного сигнала имеет вид:

$$i_{1вх} = U_c \left( b_1 + \frac{3}{4} b_2 U_c^2 + \frac{3}{2} b_3 U_{\Pi}^2 \right) \cos \omega_c t, \quad (5.2)$$



а на выходе элемента УПЧ:

$$i_{ПЧ_{вых}} = U_c U_z \left( b_2 + \frac{3}{2} b_4 U_z + 3b_4 U_{II}^2 \right) \cos \omega_{ПЧ} t, \quad (5.3)$$

где  $U_z$  – амплитуда напряжения гетеродина, а  $b_1, b_2, b_3, b_4$  – коэффициенты аппроксимации ВАХ.

Эффект блокирования полезного сигнала характеризуется коэффициентом блокирования, который представляет собой отношение изменения амплитуды выходного тока этого сигнала при блокировании к амплитуде этого же тока в отсутствие блокирования. Для УВЧ коэффициент блокирования записывается в виде:

$$K_{\text{бл УВЧ}} = \frac{\Delta I_{\text{вых}}}{I_{\text{вых}}} \approx -\frac{3b_3}{2b_1} U_{II}^2, \quad (5.4)$$

для УПЧ – в виде:

$$K_{\text{бл УПЧ}} = \left( \frac{\Delta I_{\text{вых}}}{I_{\text{вых}}} \right)_{ПЧ} \approx -3 \frac{b_4}{b_2} U_{II}^2. \quad (5.5)$$

Знак «минус» указывает на то, что амплитуда полезного сигнала в результате блокирования уменьшается. При количественной оценке коэффициентов блокирования берётся их абсолютная величина. Полное блокирование соответствует  $K_{\text{бл}} = 1$ .

Блокирование не возникает в нелинейном каскаде, если амплитудная функция передачи сигнала имеет линейный или квадратичный характер или скорость нарастания уровня выходного сигнала изменяется быстрее, чем константа. Если же амплитудная функция передачи сигнала имеет вид функции с насыщением, как бы отстающей от прямой пропорциональности, то блокирование имеет место.

Если блокирование возможно в двух каскадах, то коэффициенты блокирования складываются в дБ.

На коэффициент блокирования накладываются ограничения, что ведёт к наличию порогового уровня помехи, называемого «порогом блокирования», – максимально допустимого напряжения помехи, вызывающей блокирование  $(U_{П.доп.})_{\text{бл}}$ .

Свойство приёмника принимать полезный сигнал в присутствии сильной помехи до порога блокирования характеризуется динамическим диапазоном по блокированию в дБ:

$$D_{\text{бл}} = 20 \lg \frac{(U_{\text{П.доп.}})_{\text{бл}}}{U_{\text{с.мин}}}, \quad (5.6)$$

где  $U_{\text{с.мин.}}$  – минимальное напряжение полезного сигнала, соответствующее чувствительности приёмника.

## 5.2. Перекрёстные искажения

Перекры́стные искажения полезного сигнала – это искажения спектра сигнала на выходе приёмника при действии на входе модулированной помехи, частота которой не совпадает с частотами основного и побочных каналов приёма.

Анализ проводят в предположении, что и полезный сигнал, и помеха являются амплитудно-модулированными и напряжение на входе нелинейного элемента является суммой  $u_{\text{вх}} = u_{\text{с}} + u_{\text{П}}$ :

$$u_{\text{вх}} = u_{\text{с}} + u_{\text{П}} = U_{\text{с}} (1 + m_{\text{с}} \cos \Omega_{\text{с}} t) \cos \omega_{\text{с}} t + U_{\text{П}} (1 + m_{\text{П}} \cos \Omega_{\text{П}} t) \cos \omega_{\text{П}} t, \quad (5.7)$$

где  $m_{\text{с}}, m_{\text{П}}$  – коэффициенты амплитудной модуляции сигнала и помехи.

Перекры́стные искажения оцениваются коэффициентами перекры́стных искажений: в УВЧ

$$K_{\text{пер. УВЧ}} = \frac{(\Delta I_{\text{вых}})_{\Omega_{\text{П}}}}{(I_{\text{вых}})_{\Omega_{\text{с}}}} \approx -3 \frac{b_3 m_{\text{П}}}{b_1 m_{\text{с}}} U_{\text{П}}^2, \quad (5.8)$$

в УПЧ:

$$K_{\text{пер. УПЧ}} \approx -6 \frac{b_4 m_{\text{П}}}{b_2 m_{\text{с}}} U_{\text{П}}^2. \quad (5.9)$$

При ограничении величины коэффициента перекры́стных искажений получим максимально допустимое напряжение помехи,

вызывающей перекрёстные искажения допустимой величины – порог перекрёстных искажений  $(U_{П.доп.})_{пер.}$ .

По этой помехе тоже вводится динамический диапазон приёмника:

$$D_{пер.} = 20 \lg \frac{(U_{П.доп.})_{пер.}}{U_{с.мин.}}. \quad (5.10)$$

Если перекрёстные искажения возможны в двух нелинейных элементах приёмника, то коэффициенты складываются в дБ.

### 5.3. Интермодуляция

Интермодуляция – это эффект возникновения помех на выходе приёмника при действии на его входе двух и более помех, частоты которых  $(f_1, f_2, \dots)$  находятся вне основного и побочных каналов приёма.

В процессе интермодуляции в основной канал приёма или в канал промежуточной частоты могут попадать комбинационные частоты. При аппроксимации ВАХ нелинейного элемента степенным полиномом третьего порядка это будут интермодуляционные составляющие третьего порядка, при аппроксимации пятой степенью – пятого порядка и т. д. Общий критерий возможного наличия таких помех – это степень близости комбинационной частоты к частоте настройки или к промежуточной частоте:

$$|mf_1 \pm nf_2| \leq f_0 \pm B_з / 2, \quad (5.11)$$

$$|mf_1 \pm nf_2| \leq f_{ПЧ} \pm B_{ПЧ} / 2, \quad (5.12)$$

где  $f_0$  – частота настройки приёмника,  $f_{ПЧ}$  – промежуточная частота;  $B_з$  – полоса частот основного канала приёма,  $B_{ПЧ}$  – полоса частот канала промежуточной частоты.

Для супергетеродинного приёмника основной эффект дают интермодуляционные помехи третьего порядка. Порядок помех определяется как

$$N = m + n. \quad (5.13)$$

При анализе на вход нелинейного элемента подают сумму двух помех, имитируемых гармоническими (для простоты) сигналами частот  $f_1$  и  $f_2$  с амплитудами  $U_1$  и  $U_2$ . При этом в спектре тока возникают интермодуляционные составляющие второго порядка (одна) и третьего (две, на разных частотах). Соответственно эффект интермодуляции третьего порядка характеризуют двумя коэффициентами интермодуляции – отношением амплитуд  $I_{инт}$  каждой из интермодуляционных составляющих тока, вычисленной в отсутствие полезного сигнала, к амплитуде тока полезного сигнала  $I_{с.мин.}$ , вычисленной в отсутствие помех. Для УВЧ коэффициент имеет вид:

$$K_{инт.УВЧ} = \frac{I_{инт.}}{I_{с.мин.}} \quad (5.14)$$

и равняется

$$K_{инт.УВЧ1} = \frac{-3b_3U_1^2U_2}{4b_1U_{с.мин.}}, \quad K_{инт.УВЧ2} = \frac{-3b_3U_2^2U_1}{4b_1U_{с.мин.}}. \quad (5.15)$$

Часто оценку коэффициента интермодуляции производят при равенстве амплитуд мешающих сигналов  $U_1 = U_2 = U_{II}$ . Для этого случая приведём коэффициент интермодуляции для УПЧ:

$$K_{инт.УПЧ} = \frac{-3b_4U_{II}^3}{2b_2U_{с.мин.}}. \quad (5.16)$$

Накладывая ограничения на коэффициент интермодуляции, получим пороговое значение помехи, рождающей интермодуляцию,  $(U_{II.доп.})_{инт.}$ . Тогда можно определить динамический диапазон по этому виду помех:

$$D_{инт.} = 20 \lg \frac{(U_{II.доп.})_{инт.}}{U_{с.мин.}}. \quad (5.17)$$

Если интермодуляция возможна в двух нелинейных элементах приёмника, то коэффициенты складываются в дБ. Часто требуют, чтобы коэффициент интермодуляции не превышал единицы, а при строгом равенстве его единице можно определить порог интермодуляции и динамический диапазон по ней экспериментально.

## 5.4. Задачи для самостоятельного решения

5.1. Коэффициенты ВАХ УВЧ равны  $b_1 = 1$ ,  $b_2 = 0,1$ ,  $b_3 = 0,01$ . Определите, может ли возникнуть эффект блокирования в таком усилителе.

5.2. Коэффициенты ВАХ УВЧ равны  $b_1 = 1$ ,  $b_2 = -0,1$ ,  $b_3 = -0,01$ , напряжение помехи 1 мкВ. Определите: а) коэффициент блокирования в УВЧ; б) изменение амплитуды выходного тока полезного сигнала под действием блокирования, если номинальная амплитуда этого тока равна 1 мкА; в) коэффициент блокирования в отсутствие блокирования; г) напряжение помехи, вызывающее 100-процентное блокирование полезного сигнала.

5.3. Коэффициенты ВАХ УПЧ равны  $b_1 = 1$ ,  $b_2 = 0,01$ ,  $b_3 = -0,01$ ,  $b_4 = -0,001$ , напряжение помехи равно 1 мВ. Определите: а) коэффициент блокирования в УПЧ; б) изменение амплитуды выходного тока сигнала промежуточной частоты под действием блокирования, если номинальная амплитуда этого тока равна 1 мкА; в) коэффициент блокирования в отсутствие блокирования; г) напряжение помехи, вызывающее 100-процентное блокирование сигнала промежуточной частоты.

5.4. В приёмнике ВАХ УВЧ имеет параметры УВЧ из задачи 5.1, а ВАХ УПЧ – УПЧ из задачи 5.3. Определите итоговый коэффициент блокирования при напряжении помехи 1 мВ.

5.5. Эффект блокирования в приёмнике может возникнуть только в УВЧ. Коэффициенты ВАХ УВЧ равны  $b_1 = 1$ ,  $b_2 = -0,1$ ,  $b_3 = -0,01$ . Определите допустимый уровень помехи блокирования, если нормативное значение коэффициента блокирования равно 3 дБ.

5.6. Два приёмника – коротковолновый магистральный и радиостанции сухопутной подвижной связи – допускают блокиро-

вание только в УВЧ, причём амплитудные характеристики усилителей имеют одинаковые коэффициенты. Коэффициент блокирования магистрального приёмника находится на пределе норматива и равен 3 дБ, аналогично коэффициент блокирования для радиостанции – 6 дБ. Определите, как соотносятся допустимые уровни помех блокирования для этих приёмников.

5.7. Приёмник построен, как в задаче 5.4. Напряжение помехи на входе приёмника равно 1 мВ. Напряжение помехи на входе канала промежуточной частоты равно 1 мкВ. Определите итоговый коэффициент блокирования: а) в процентах; б) в дБ.

5.8. Чувствительность приёмника равна 0,1 мВ, динамический диапазон по блокированию равен 80 дБ, коэффициенты ВАХ УВЧ равны  $b_1 = 1$ ,  $b_2 = -0,1$ ,  $b_3 = -0,01$ , блокирование возможно только в УВЧ. Определите уровень помехи на входе приёмника, действующей по основному каналу, которая ещё не нарушает требования ЭМС.

5.9. Чувствительность приёмника 1 мкВ, коэффициент блокирования равен нормативу 3 дБ, блокирование возможно только в УВЧ, коэффициенты ВАХ УВЧ равны  $b_1 = 1$ ,  $b_2 = -0,1$ ,  $b_3 = -0,01$ . Определите динамический диапазон по блокированию.

5.10. ВАХ УВЧ имеет коэффициенты  $b_1 = 1$ ,  $b_2 = -0,5$ ,  $b_3 = -0,01$ . Коэффициент амплитудной модуляции полезного сигнала равен 0,7. Помеха представляет собой АМ-сигнал с модуляцией 0,5 и амплитудой несущей 1 мВ. Определите коэффициент перекрёстных искажений.

5.11. ВАХ УПЧ имеет коэффициенты  $b_1 = 1$ ,  $b_2 = -0,1$ ,  $b_3 = -0,01$ ,  $b_4 = 0,05$ . Коэффициенты амплитудной модуляции сигнала и помехи равны, амплитуда несущей в спектре помехи равна 1 мВ. Определите коэффициент перекрёстных искажений.

5.12. В приёмнике УВЧ имеет параметры УВЧ из задачи 5.10, а УПЧ – параметры УПЧ из задачи 5.11. Определите итоговый коэффициент блокирования при амплитуде несущей в спектре помехи 1 мВ и равенстве коэффициентов амплитудной модуляции сигналов и помех.

5.13. Коэффициенты перекрёстных искажений двух различных приёмников одного класса при воздействии одних и тех же помехи и сигнала равны: первого 3 дБ, второго – 4 дБ. Определит-

те, как соотносятся допустимые уровни помех перекрёстных искажений этих приёмников.

5.14. Допустимый уровень напряжения помехи, рождающей перекрёстные искажения, равен 2 В, чувствительность приёмника соответствует напряжению 1 мкВ. Перекрёстные помехи возможны только в УВЧ, коэффициенты ВАХ УВЧ равны  $b_1 = 1$ ,  $b_2 = -0,1$ ,  $b_3 = -0,01$ , коэффициенты амплитудной модуляции сигнала и помехи равны друг другу. Определите: а) динамический диапазон по перекрёстным искажениям; б) коэффициент перекрёстных искажений.

5.15. Чувствительность приёмника соответствует напряжению 1 мкВ, перекрёстные искажения возможны только в УВЧ приёмника, имеющем ВАХ с коэффициентами:  $b_1 = 1$ ,  $b_2 = -0,5$ ,  $b_3 = -0,01$ . Коэффициенты амплитудной модуляции сигнала и помехи равны друг другу, допустимый коэффициент перекрёстных искажений равен 3 дБ. Определите: а) допустимый уровень помехи; б) динамический диапазон по перекрёстным искажениям.

5.16. Коэффициенты амплитудной модуляции сигнала и помехи равны друг другу. Определите, как соотносятся коэффициенты блокирования и перекрёстных искажений: а) в УВЧ; б) в УПЧ.

5.17. Допустимые коэффициенты перекрёстных искажений и блокирования для некоторого приёмника равны друг другу. Определите, как соотносятся друг с другом пороги блокирования и перекрёстных искажений. Считайте, что коэффициенты амплитудной модуляции сигнала и помехи равны друг другу.

5.18. Приёмник имеет частоту настройки 1 ГГц и полосу пропускания 1,2 МГц. Основная помеха имеет частоту 0,9 ГГц. Определите частоту второй помехи, при совместной обработке с которой в цепях приёмника первая порождает эффекты интермодуляции третьего порядка.

5.19. Приемник имеет промежуточную частоту 100 кГц и полосу пропускания тракта промежуточной частоты, равную 10 кГц. Основная помеха имеет частоту 85 кГц. Определите частоты второй помехи, при совместной обработке с которой в цепях промежуточной частоты приёмника первая порождает интермодуляцию третьего порядка.

5.20. Чувствительность приёмника соответствует напряжению 1 мкВ, помехи с амплитудами 1 и 2 мВ рожают интермодуляцию третьего порядка в УВЧ приёмника, имеющего ВАХ с коэффициентами  $b_1 = 1$ ,  $b_2 = -0,5$ ,  $b_3 = -0,01$ . Определите коэффициент интермодуляции.

5.21. Две помехи с равными амплитудами 10 мВ воздействуют на высокочастотную часть приёмника, имеющего чувствительность 1 мкВ. Коэффициенты ВАХ УВЧ  $b_1 = 1$ ,  $b_2 = -0,2$ ,  $b_3 = -0,05$ . Определите коэффициент интермодуляции третьего порядка.

5.22. Коэффициенты интермодуляции третьего порядка в некотором приёмнике под действием некоторой помехи равны 2 и 3 дБ в УВЧ и УПЧ соответственно. Определите итоговый коэффициент интермодуляции.

5.23. Две помехи с равными амплитудами действуют на приёмник из задачи 5.21. Допустимое значение коэффициента интермодуляции равно 1. Определите порог интермодуляции третьего порядка в УВЧ.

5.24. Для приёмника из задачи 5.21 и допустимого коэффициента интермодуляции третьего порядка, равного единице, определите динамический диапазон по интермодуляции в УВЧ.

5.25. На гетеродинный приёмник воздействуют поочерёдно одна и две помехи одинаковой амплитуды. Определите, как соотносятся: а) коэффициент интермодуляции и коэффициент блокирования; б) динамические диапазоны по интермодуляции и блокированию.

5.26. Определите, какой порядок в степенной аппроксимации ВАХ усилителей надо принимать во внимание, чтобы проанализировать интермодуляционные помехи пятого порядка: а) в УВЧ; б) в УПЧ.

5.27. Расставьте гетеродинные приёмники с заданными коэффициентами ВАХ по возрастанию уровня допустимых помех: а)  $b_1 = 1$ ,  $b_3 = -0,01$ ; б)  $b_1 = 1$ ,  $b_3 = 0,02$ ; в)  $b_1 = 1$ ,  $b_3 = -0,5$ ; г)  $b_1 = 1$ ,  $b_3 = -0,1$ .

5.28. Расставьте супергетеродинные приёмники с заданными коэффициентами ВАХ по возрастанию уровня допустимых помех в



тракте промежуточной частоты: а)  $b_2 = -0,5$ ,  $b_4 = 0,1$ ; б)  $b_2 = -0,2$ ,  $b_4 = -0,2$ ; в)  $b_2 = -0,1$ ,  $b_4 = 0,01$ ; г)  $b_2 = -0,5$ ,  $b_4 = -0,01$ .

5.29. Гетеродинный приёмник с чувствительностью 1 мкВ. ВАХ УВЧ имеет коэффициенты  $b_1 = 1$ ,  $b_2 = -0,5$ ,  $b_3 = -0,05$ . Определите минимальную величину напряжения помехи, при которой рождается один из эффектов – блокирование, перекрёстные искажения, интермодуляция.

## 6. Оценка электромагнитной совместимости

### 6.1. Критерии ЭМС

Один из критериев ЭМС определяется по защитному отношению.

Защитное отношение по высокой частоте – минимально допустимое (пороговое) отношение мощности полезного сигнала к мощности помехи на входе приёмника, которое позволяет получить на его выходе заданное качество полезного сигнала:

$$Q_{м.доп.} = \left( \frac{P_c}{P_n} \right)_{вх.пр.доп.} = (C/\Pi)_{вх.пр.доп.} \quad (6.1)$$

или в дБ:

$$q_{м.доп.} = 10 \lg Q_{м.доп.} \quad (6.2)$$

Критерий ЭМС при этом записывается в виде:

$$q > q_{м.доп.} \quad (6.3)$$

Качество сигнала связано с отношением «сигнал – шум» на выходе приёмника или на входе демодулятора. Например, для цифровых систем связи с М-позиционной фазовой модуляцией для обеспечения высокого качества требуется обеспечить коэффициент ошибок BER не более  $10^{-6}$ .

Номинальное отношение мощности сигнала к мощности шума на входе демодулятора  $\rho_{ном}$  обеспечивает заданное качество

(BER не более  $10^{-6}$ ) при идеальном канале. С его помощью защитное отношение при помехе от одного источника определяется выражением:

$$q_{м.доп.} = \rho_{ном} + 20 - 10 \lg a . \quad (6.4)$$

При этом предполагается, что наличие помехи с мощностью, составляющей процент  $a$  мощности шумов на входе демодулятора ( $a$  нормируется), не ухудшает качества.

Если на ширине спектра полезного сигнала размещается  $N$  помех одинаковой мощности, то защитное отношение увеличивается в  $N$  раз:

$$q_{м.доп.N} = \rho_{ном} + 20 - 10 \lg a + 10 \lg N . \quad (6.5)$$

Неидеальность канала учитывается наличием энергетических потерь:

$$\Delta = 3 + 0,7 \log_2 M , \quad (6.6)$$

где  $M$  – число уровней манипуляции фазы радиосигнала. Энергетические потери показывают, на какую величину нужно увеличить соотношение «сигнал – шум» на входе демодулятора в реальном канале по сравнению с идеальным, чтобы получить на его выходе то же качество сигнала.

$$\rho'_{ном} = \rho_{ном} + \Delta . \quad (6.7)$$

Если помеха широкополосная, а полезный сигнал реализует частотное разделение каналов без перекрытия полос, то спектр помехи можно считать квазибелым в пределах одного канала и использовать следующие выражения. Для аналоговой помехи:

$$q_{м.доп.} = \rho'_{ном} + 20 - 10 \lg a + g_n(0) + 10 \lg \frac{\Delta f_{сигн}}{F_{ном}} , \quad (6.8)$$

где  $g_n(0)$  – максимальная величина нормализованной спектральной плотности мощности помехи,  $\Delta f_{\text{сигн}}$  – ширина полосы одного канала полезного сигнала,  $F_{\text{ном}}$  – ширина спектра помехи.

Для цифровой помехи типа ИКМ-ФМ:

$$q_{\text{м.доп.}} = \rho'_{\text{ном}} + 20 - 10 \lg a + 10 \lg \frac{\Delta f_{\text{сигн}}}{\beta R}, \quad (6.9)$$

где  $\frac{1}{\beta R}$  – максимальная относительная величина спектральной плотности мощности цифровой помехи, а отношение  $\frac{\Delta f_{\text{сигн}}}{\beta R}$  определяет долю мощности помехи, попадающую в полосу пропускания одного канала.

Соотношение «сигнал – помеха» можно получить из соотношений «сигнал – шум» и «помеха – шум», выраженных в дБ:

$$C / П = C / Ш - П / Ш. \quad (6.10)$$

В процессе оценки ЭМС возникают ситуации, когда приёмник выходит из линейного режима для помехи, и тогда рождаются нелинейные эффекты, такие как блокирование, перекрёстные искажения, интермодуляция. Пороги этих явлений, а также коэффициенты блокирования, перекрёстных искажений, интермодуляции являются параметрами ЭМС.

## 6.2. Амплитудная оценка помехи

Оценка ЭМС производится в несколько этапов.

На первом этапе оценивается превышение мощностью помехи на входе приёмника собственных шумов приёмника – соотношение «сигнал – шум»  $IM = 10 \lg(P_{\text{П}} / P_{\text{ш}})$ :

$$IM = P_A - P_{\text{ш}}, \quad (6.11)$$

где мощность помехи на входе приёмника  $P_A$  на этапе амплитудной оценки определяется без учёта доли попадания мощности помехи в каналы приёмника:

$$P_A = P_T - L_{T\phi} + G_{T\max} - \Delta G_T - L + G_{R\max} - \Delta G_R - L_{R\phi}, \quad (6.12)$$

где обозначены  $P_T$  – мощность передатчика источника помехи,  $L_{T\phi}$  – потери в антенно-фидерном тракте передатчика,  $G_{T\max}$  – максимальный коэффициент усиления антенны передатчика,  $\Delta G_T$  – уменьшение коэффициента усиления антенны передатчика в направлении, отличном от направления максимального излучения,  $L$  – потери на трассе распространения,  $G_{R\max}$  – максимальный коэффициент усиления антенны приёмника,  $\Delta G_R$  – уменьшение коэффициента усиления антенны приёмника в направлении, отличном от направления максимального приема,  $L_{R\phi}$  – потери в антенно-фидерном тракте приёмника. Мощность передатчика и другие параметры в этой формуле являются функциями частоты, таким образом, величина  $P_A$  отражает частотные характеристики передатчика, антенно-фидерных трактов, антенн и канала распространения.

Оценка производится для всех пар «источник – рецептор» по четырём сочетаниям:

- основное излучение источника помехи – основной канал приёма рецептора (ОО);
- основное излучение источника помехи – побочный канал приёма рецептора (ОП);
- побочное излучение источника помехи – основной канал приёма рецептора (ПО);
- побочное излучение источника помехи – побочный канал приёма рецептора (ПП).

Сначала оценивается ситуация ОО, и если при этом  $IM < 0$ , то остальные три сочетания для этой пары «источник – рецептор» можно не рассматривать, т. к. высока вероятность, что в них требования ЭМС выполняются. Отобранные для дальнейшего анализа пары и сочетания, в которых  $IM > 0$ , оценивают более деталь-

но на следующих этапах – частотной оценки, детальной оценки (в этом задатнике не рассматривается) и комплексной оценки.

### 6.3. Частотная оценка помехи

На этом этапе для отобранных пар и сочетаний уточняются значения соотношения «сигнал – шум» с учётом частотной характеристики приёмника. Представляя величину  $P_A(f)$  как спектральную плотность мощности мешающего сигнала в абсолютных величинах, можно найти часть мощности помехи в полосе определённого канала приёмника.

Пусть частоты  $f_1$  и  $f_2$  ограничивают полосу пропускания основного канала приёмника, тогда мощность помехи в основном канале приёма составит:

$$P'_A = 10 \lg \int_{f_1}^{f_2} 10^{0,1P_A(f)} df. \quad (6.13)$$

Если помеха узкополосная по сравнению с приёмником с центральной частотой  $f_{\Pi}$  и шириной основного излучения  $B_T$  и проходит по основному каналу приёма

$$(\Delta f = |f_c - f_{\Pi}| \leq (B_T + B_R) / 2,$$

где  $f_c = f_0$  – частота полезного сигнала, т. е. частота настройки приёмника, а  $B_R = B_3$  – присвоенная полоса частот основного канала приёмника), то частотную коррекцию делать не требуется – помеха проходит всей основной мощностью. Если же помеха широкополосная, то интеграл (6.13) можно приближённо вычислить:

$$P'_A = P_A - 10 \lg \frac{B_R}{B_T}. \quad (6.14)$$

В случае импульсной помехи с частотой следования  $F_C$  можно использовать выражения:

$$P_A' = \begin{cases} P_A - 20\lg(B_R / B_T), & F_C < B_R < B_T, \\ P_A - 20\lg(F_C / B_T), & B_R < F_C. \end{cases} \quad (6.15)$$

#### 6.4. Комплексная оценка помехи

На этом этапе определяется окончательное значение оценки соотношения «сигнал – шум», определяются соотношения «сигнал/(шум+помеха)» и выраженные в удобной форме показатели ухудшения качества работы системы в присутствии данной помехи – т. е. не только определяется, обеспечена ЭМС или нет, но и указывается, к чему приводит данный уровень ЭМС.

Значения соотношения «сигнал/(шум+помеха)», при которых помеха считается недопустимой, для различных видов полезного сигнала на выходе приёмника приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1

Вид полезного сигнала на выходе приёмника	Соотношение «сигнал/(шум+помеха)», при котором помеха считается недопустимой, дБ
Изображение	<15
Цифровая информация	<10
Данные для телетайпа	5
Речь	0

#### 6.4. Задачи для самостоятельного решения

6.1. Определите, могут ли излучения станций спутникового радиовещания, основное излучение которых находится в полосе частот 11,8 – 12,0 ГГц, создавать помехи радиоастрономическим наблюдениям, которые проводятся в полосе 23,6 – 24,0 ГГц.

6.2. Полезный сигнал модулирован по фазе цифровым потоком со скоростью 10 Мбит/с, а мешающий радиосигнал – потоком со скоростью 2 Мбит/с. Тип модуляции 4ФМ. Определите: а) номинальное отношение «сигнал – шум» на входе демодулятора; б) величину энергетических потерь, вызванных неидеальностью канала; в) защитное отношение, если для данного типа модуляции в идеальном канале  $\rho_{ном}$  равно 14 дБ, а процент  $a$  равен 6.

6.3. Определите защитное отношение для системы из задачи 6.2, если количество мешающих сигналов будет равно 1.

6.4. Чувствительность приёмника равна  $-100$  дБм. Определите, какие источники отбираются для дальнейшей оценки: а) мощность помехи на выходе приёмника равна  $-50$  дБм; б)  $-100$  дБм; в)  $-110$  дБм.

6.5. Спектр помехи на выходе антенны имеет аппроксимацию: постоянный уровень в полосе частот от  $440$  до  $460$  МГц, затем линейное ослабление со скоростью  $20$  дБ/дек. Определите мощность помехи на входе приёмника, имеющего частоту настройки  $900$  МГц и полосу пропускания  $6$  МГц.

6.6. Некогерентная помеха из задачи 6.5 действует на вход приёмника с частотой настройки  $900$  МГц и полосой пропускания  $1,2$  МГц. Определите мощность помехи на входе приёмника.

6.7. Уровень когерентной помехи на входе приёмника  $-50$  дБм, уровень полезного сигнала  $-30$  дБм, чувствительность приёмника равна  $-100$  дБм. Выигрыш при обработке в демодуляторе равен  $20$  дБ, шум-фактор приёмника  $10$  дБ. Определите соотношение «сигнал/(помеха+шум)» на выходе приёмника.

6.8. Определите соотношение «сигнал/(помеха+шум)» на выходе приёмника из задачи 6.7, где помеха, однако, некогерентная.

6.9\*. Частота настройки приёмника равна  $27$  МГц, полоса пропускания  $-100$  кГц. Помеха – сигнал с центральной частотой  $20$  МГц и амплитудной модуляцией пачками из восьми одинаковых импульсов длительностью  $1$  мкс каждый (длительности паузы и импульса равны), максимальный уровень в спектре помехи на выходе антенны приёмника равен  $1$  мВт. Определите мощность помехи на входе приёмника.

6.10. Избирательность приёмника вне полосы пропускания, равной  $1$  МГц в окрестности частоты  $1$  ГГц, аппроксимируется линейной зависимостью со скоростью спада  $200$  дБ/дек. Мощность узкополосной помехи на выходе антенны равна  $-60$  дБм. Определите уровень узкополосной помехи на частоте  $1,2$  ГГц на выходе преселектора приёмника.

6.11. Огибающая спектра гармоник передатчика с частотой настройки  $2$  ГГц аппроксимируется линейной зависимостью со скоростью спада  $40$  дБ/окт, а восприимчивость приёмника на каналах гармоник частоты настройки  $1$  ГГц – со скоростью спа-

дания 30 дБ/окт. Уровень центральной компоненты в спектре помехи на входе приёмника равен  $-20$  дБм, уровень полезного сигнала в основном канале – 10 дБм. Затухание в канале на всех частотах равно 10 дБ. Определите и занесите в таблицу: а) уровень восприимчивости на каналах гармоник частоты настройки; б) уровень помехи на этих частотах; в) уровень полезного сигнала на гармониках; г) мощность помех на входе этих каналов; д) соотношение «сигнал – помеха» для восьми гармоник частоты настройки приёмника.

6.12. Мощность передатчика (помехи) равна 40 дБм, длина фидера 30 м, погонное затухание фидера 0,1 дБ/м, КСВ равен 1,5, уровень боковых лепестков антенны передатчика в направлении на рецептор равен 10 дБ, потери на трассе 100 дБ, уровень боковых лепестков приёмной антенны – 5 дБ, антенно-фидерный тракт такой же, как у источника помехи. Определите мощность помехи на входе приёмника.

6.13. Мощность передатчика 40 дБм по основному каналу и  $-40$  дБ для неосновного излучения. Затухание в фидере передатчика составляет 3 дБ, потери на трассе 100 дБ, уровень боковых лепестков антенны передатчика в направлении на приёмник равен 10 дБ, уровень боковых лепестков приёмной антенны – 5 дБ, затухание в приёмном антенно-фидерном тракте 3 дБ, чувствительность приёмника равна  $-100$  дБм. Полоса основного излучения передатчика равна 6 МГц, полоса частот приёмника – тоже 6 МГц; а) оцените соотношения «помеха – шум» для всех четырёх сочетаний на этапе амплитудной оценки помехи; б) определите, какие сочетания нужно отобрать для дальнейшего анализа.

6.14. Имеются четыре сочетания источников помех и рецепторов. Определите, нужна ли частотная коррекция для этих сочетаний и если да, то какая: а) импульсная помеха с частотой следования 1 кГц, полоса частот передатчика 25 кГц, полоса частот приёмника 25 кГц; б) импульсная помеха с частотой следования 100 кГц, полоса частот приёмника 25 кГц, полоса частот передатчика 25 кГц; в) шумоподобная помеха, частотный разнос равен 10 кГц, полосы частот передатчика и приёмника – по 25 кГц; г) шумоподобная помеха, частотный разнос равен 50 кГц, полосы частот передатчика и приёмника – по 25 кГц.



6.15. Для условия задачи 6.7 определите, для каких видов полезного сигнала на выходе помеха будет являться допустимой.

6.16. Для условия задачи 6.8 определите, для каких видов полезного сигнала на выходе помеха будет являться допустимой.

## 7. Обеспечение ЭМС

### 7.1. Частотно-территориальное планирование

Если при расчёте или измерении оказывается, что критериальная величина (напряжение помехи, соотношение «сигнал – помеха» или другие) не соответствует требованиям, тогда для обеспечения ЭМС требуется принять меры – организовать пространственный разнос источника и рецептора, организовать их частотный разнос, поставить вносящие ослабление помехи экраны и другие.

Для определения необходимой величины пространственного разноса при проектировании радиосистем получают критериальную величину в виде зависимости от расстояния, например, вида (2.4), накладывают условие ЭМС и определяют отсюда значение расстояния, на котором критерий ЭМС соблюдается.

Для определения необходимой величины частотного разноса выполняют численно расчёт уровня помехи на входе определённого канала, накладывают критерий ЭМС и подбирают такой разнос, при котором требования ЭМС выполняются.

### 7.2. Экранирование

Эффективность действия экрана теоретически обычно определяют по отношению к плоской волне при помощи экранного затухания:

$$S_э = 20 \lg \frac{E_1}{E_2}, \quad S_м = 20 \lg \frac{H_1}{H_2}, \quad (7.1)$$

где  $E_1$  и  $H_1$  – напряжённости поля на внешней стороне экрана,  $E_2$  и  $H_2$  – напряжённости поля на внутренней стороне экрана или обратной ему величины – эффективности экранирования.

Эффективность экранирования проволочных антенн типа диполя плоским экраном толщины  $d$  может приближённо быть записана:

$$\mathcal{E}_{пл} \approx \begin{cases} 60\pi\sigma d, & d/\delta < 0,1, \\ \frac{\delta}{2\sqrt{2}d} e^{d/\delta}, & d/\delta > 0,1, \end{cases} \quad (7.2)$$

где удельная проводимость материала  $\sigma$  приведена в таблице 7.1, а коэффициент  $A$  в выражении для глубины проникновения в вещество  $\delta = A/\sqrt{f}$  – в таблице 7.2.

Таблица 7.1

Вещество	Удельная проводимость, См/м
Медь	$5,9 \cdot 10^7$
Алюминий	$3,6 \cdot 10^7$
Сталь	$1,0 \cdot 10^7$

Таблица 7.2

Вещество	$A, \text{м} \cdot \text{Гц}^{1/2}$
Медь	$6,6 \cdot 10^{-2}$
Алюминий	$8,4 \cdot 10^{-2}$
Сталь	$1,6 \cdot 10^{-2}$

Задачи расчёта экранов решаются приближённо, при этом для большинства экранов в выражения входят формулы (7.2) для плоского экрана.

Эффективность экранирования длинной симметричной линии цилиндрическим экраном радиуса  $R$  на длине волны  $\lambda$  определяется формулой:

$$\mathcal{E}_л = 0,16 \frac{\lambda}{R} \mathcal{E}_{пл}. \quad (7.3)$$

Эффективность экранирования рамки с током замкнутым экраном с эффективным радиусом  $R$  имеет вид:

$$\mathcal{E}_p = \mathcal{E}_0 + 4,2 \frac{R}{\lambda} \mathcal{E}_{пл}, \quad (7.4)$$

где эффективность экранирования по постоянной составляющей

$$\mathcal{E}_0 = 1 + \frac{0,66 \mu d}{R}. \quad (7.5)$$

Здесь  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость материала. Для стали часто берут  $\mu = 100$ , хотя есть сплавы и с большим, и с меньшим значением. На высоких частотах  $\mathcal{E}_0$  в (7.4) становится значительно меньше второго слагаемого.

### 7.3. Задачи для самостоятельного решения

7.1. Уровень помехи на входе приёмника равен  $-10$  дБм, фон пренебрежимо мал, порог начала нелинейных эффектов в приёмнике равен  $-20$  дБм, уровень чувствительности приёмника равен  $-100$  дБм, мощность полезного сигнала равна  $-70$  дБм. Определите, на сколько требуется ослабить помеху, чтобы: а) её уровень не превышал порога нелинейности; б) чтобы соотношение «сигнал/(помеха+шум)» на входе приёмника было больше 10 дБ.

7.2. Считать антенны передатчика и приёмника находящимися в свободном пространстве. Помеха действует по основному каналу, её частота равна 1 ГГц. Определите, какой пространственный разнос обеспечит выполнение требований задачи 7.1.

7.3. Уровень помехи на входе приёмника равен 3 дБм, фон пренебрежимо мал, порог начала нелинейных эффектов в приёмнике равен 0 дБм, уровень чувствительности приёмника равен  $-120$  дБм, мощность полезного сигнала равна  $-30$  дБм. Определите, на сколько требуется ослабить помеху, чтобы: а) её уровень не превышал порога нелинейности; б) чтобы соотношение «сигнал/(помеха+шум)» на входе приёмника было больше 0 дБ.

7.4. Считать антенны передатчика и приёмника находящимися в свободном пространстве. Помеха действует по основному каналу, её частота равна 900 МГц. Определите, какой пространственный разнос обеспечит выполнение требований задачи 7.3.

7.5. Определите, какой частотный разнос позволит обеспечить ослабление помехи из задачи 6.5 не ниже 80 дБ.

7.6\*. Специально мешающий некогерентный сигнал создаётся узкополосным передатчиком частоты 1001 МГц, расположенным на расстоянии 0,5 км от рецептора в городе со средней застройкой и имеющим антенну с коэффициентом усиления 15 дБ. Мощность передатчика равна 10 Вт, КПД антенно-фидерного тракта 90 %. Рецептор имеет настройку на частоту 1 ГГц, полоса пропускания приёмника 6 МГц, коэффициент усиления антенны 15 дБ. Высота подвеса антенн одинакова и равна 20 м. Чувствительность приёмника равна  $-100$  дБм. Мощность передатчика полезного сигнала равна 10 Вт, коэффициент усиления антенны 15 дБ, уровень боковых лепестков приёмника равен  $-20$  дБ, источник сигнала находится на расстоянии 0,5 км от приёмника на высоте подвеса 20 м, КПД антенно-фидерного тракта 90 %. Излучение источника помех принимается боковыми лепестками диаграммы направленности антенны рецептора. Определите: а) соотношение «сигнал – шум» на входе приёмника; б) соотношение «помеха – шум» на выходе приёмника; в) соотношение «сигнал/(помеха+шум)» на выходе приёмника; г) какое расстояние между источником помех и рецептором обеспечит ЭМС при критерии «сигнал/(помеха+шум)» больше 30 дБ; д) какое расстояние между источником и приёмником сигнала при неизменном положении источника помех обеспечит тот же критерий ЭМС.

7.7. Требуется ослабить мощность помехи путём экранирования в 10000 раз. Определите величину экранного затухания.

7.8. Плоский экран из стали имеет толщину 3 мм. Определите экранное затухание на частоте 100 МГц.

7.9. Экран из задачи 7.8 применили для защиты от узкополосной помехи частоты 1 ГГц. Определите, на сколько дБ экран ослабляет уровень помехи.

7.10. Устройство с текущими по корпусу токами частоты 450 МГц заключают в оболочку с эквивалентным радиусом 40 см из стали толщиной 3 мм. Определите, на сколько дБ ослабляется излучение такого источника помех.

7.11. Провода симметричной линии, работающей на частоте 10 кГц, заключают в медную оболочку радиусом 1 см и толщи-

ной 1 мм. Оцените, на сколько ослабляется помеховое излучение линии.

7.12. Требуется ослабить излучение проводов, работающих на частоте 10 кГц, на 60 дБ. Имеется лист алюминия толщиной 3 мм. Определите, каков должен быть радиус трубки экрана, в который сворачивают этот лист.

7.13\*. Требуется ослабить излучение катушки индуктивности на частотах около 50 кГц на 50 дБ. Определите толщину стального экрана, из которого можно было бы сделать экранирующую оболочку радиуса 5 см.

7.14\*. Для проведения испытаний на ЭМС помещение требуется защитить от проникновения помех извне: обшить листами экранирующего материала. Основные помехи имеют уровень 10 дБм и сосредоточены около частоты 100 МГц. Необходимо обеспечить уровень помех не выше –100 дБм. Оцените, сколько требуется листов из стали толщины 2 мм.

## Литература

1. Регламент радиосвязи. – М., 2008.
2. Князев, А. Д. Элементы теории и практики обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств / А. Д. Князев. – М. : Радио и связь, 1984.
3. Управление радиочастотным спектром и электромагнитная совместимость радиосистем: учеб. пособие / под ред. М. А. Быховского. – М. : Эко-Трендз, 2006.
4. Уайт, Д. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи / Д. Уайт. – М. : Сов. радио, 1977. – Т. 1.
5. Шапиро, Д. Н. Основы теории электромагнитного экранирования / Д. Н. Шапиро. – М. : Энергия, 1975.
6. Грудинская, Г. П. Распространение радиоволн / Г. П. Грудинская. – М. : Высшая школа, 1975.

## Оглавление

<b>Введение.....</b>	<b>3</b>
<b>1. Излучение передатчиков .....</b>	<b>3</b>
1.1. Эффективная излучаемая мощность .....	3
1.2. Частотные характеристики излучения передатчиков .....	5
1.3. Задачи для самостоятельного решения.....	8
<b>2. Учёт потерь на трассе распространения.....</b>	<b>11</b>
2.1. Потери в свободном пространстве.....	11
2.2. Потери в городской среде .....	11
2.3. Задачи для самостоятельного решения.....	12
<b>3. Помехи.....</b>	<b>14</b>
3.1. Описание помех .....	14
3.2. Помехи естественного происхождения .....	17
3.3. Помехи искусственного происхождения .....	20
3.4. Задачи для самостоятельного решения.....	21
<b>4. Характеристики приёмников .....</b>	<b>25</b>
4.1. Чувствительность .....	25
4.2. Частотная избирательность приёмника по основному каналу..	25
4.3. Побочные каналы приёма .....	26
4.4. Характеристики антенн.....	28
4.5. Задачи для самостоятельного решения.....	29
<b>5. Эффекты воздействия помех.....</b>	<b>32</b>
5.1. Блокирование .....	32
5.2. Перекрестные искажения.....	34
5.3. Интермодуляция .....	35
5.4. Задачи для самостоятельного решения.....	37
<b>6. Оценка электромагнитной совместимости .....</b>	<b>41</b>
6.1. Критерии ЭМС.....	41
6.2. Амплитудная оценка помехи.....	43
6.3. Частотная оценка помехи .....	45
6.4. Комплексная оценка помехи .....	46
6.4. Задачи для самостоятельного решения.....	46
<b>7. Обеспечение ЭМС .....</b>	<b>49</b>
7.1. Частотно-территориальное планирование .....	49
7.2. Экранирование.....	49
7.3. Задачи для самостоятельного решения.....	51
<b>Литература .....</b>	<b>54</b>

Учебное издание

**Артёмов** Татьяна Константиновна  
**Гвоздарёв** Алексей Сергеевич  
**Фомичёв** Николай Иванович

## **Электромагнитная совместимость**

### *Задачник*

Редактор, корректор М. Э. Левакова  
Верстка И. Н. Иванова

Подписано в печать 17.02.2012. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бум. офсетная. Гарнитура "Times New Roman".  
Усл. печ. л. 3,25. Уч.-изд. л. 2,43.  
Тираж 45 экз. Заказ

Оригинал-макет подготовлен  
в редакционно-издательском отделе  
Ярославского государственного университета  
им. П. Г. Демидова.

Отпечатано на ризографе.

Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова.  
150000, Ярославль, ул. Советская, 14.