

Глава 2

ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

2.1. Излучения на выходе радиопередающих устройств и их нормирование

Радиопередающее устройство (РПДУ), состоящее из радиопередатчика и антенно-фидерной системы, предназначено для генерации несущего гармонического колебания, его модуляции и излучения с помощью передающей антенны. Кроме основного (полезного) радиоизлучения, на выходе антенны РПДУ присутствуют неосновные (нежелательные) излучения. Эти излучения могут быть мешающими для приемников других РЭС, создавая им непреднамеренные помехи и ухудшая ЭМС РЭС. Классификация излучений на выходе антенны РПДУ и примерное распределение их спектральной плотности мощности представлены на рис. 2.1 и 2.2.



Рис. 2.1. Классификация излучений РПДУ

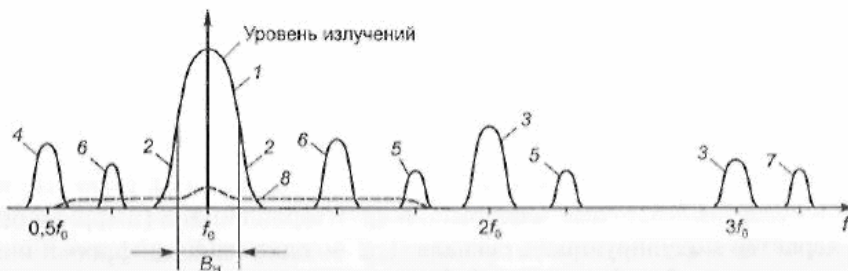


Рис. 2.2. Спектр плотности мощности радиоизлучений РПДУ:
1 — основного; 2 — внеполосного; 3 — на гармониках; 4 — на субгармониках;
5 — комбинационного; 6 — интермодуляционного; 7 — паразитного; 8 — шумового

Основное излучение занимает некоторую необходимую полосу частот (B_n), предназначенную для передачи полезного радиосигнала. Все другие (неосновные) излучения, расположенные за пределами основного (рабочего) участка радиочастотного спектра B_n , являются нежелательными. Эти излучения подразделяются на внеполосное, побочные и шумовые. Спектр внеполосного излучения непосредственно примыкает к необходимой полосе частот справа и слева. Спектры побочных излучений на гармониках, на субгармониках, на комбинационных частотах, паразитных и интермодуляционных колебаний удалены от частот основного канала излучения. Шумовое излучение занимает широкую полосу частот.

Необходимая полоса частот B_n определяется как минимальная по ширине полоса частот, обеспечивающая передачу данного сообщения с требуемой скоростью и качеством [1, 2]. Нормы на необходимую ширину полосы частот для различных типов сообщений (телеграфия, телефония, звуковое радиовещание и др.) и видов модуляции (амплитудная, угловая, импульсная) приведены в Регламенте радиосвязи (РР) [1]. Необходимая ширина полосы частот может определяться также расчетным путем в соответствии с рекомендациями МСЭ и формулами, указанными в соответствующих разделах рекомендаций [1, 2]. Например, в случае амплитудной модуляции несущей аналоговыми сигналами телефонии или звукового вещания необходимая ширина полосы радиозлучения

$$B_n = \begin{cases} 2F_n & \text{при двухполосной передаче;} \\ F_n - F_n & \text{при однополосной передаче и подавленной несущей,} \end{cases} \quad (2.1)$$

где F_n, F_n — нижняя и верхняя граничные частоты модулирующего сигнала.

Значения необходимой ширины полосы частот B_n для РЭС различного назначения приведены в РР и других документах [1, 2, 7].

По правилам РР излучения должны обозначаться в соответствии с их необходимой шириной полосы частот B_n и видом (классом) сигналов. Необходимая ширина полосы излучения указывается перед обозначением его класса и содержит три цифры и одну букву. Буква играет роль запятой, отделяющей целую часть от дробной в десятичной дроби, и указывает единицу измерения полосы частот. Значения необходимой ширины полосы B_n выражаются:

- от 0,001 до 999 Гц — в герцах (буква Н);
- от 1 до 999 кГц — в килогерцах (буква К);
- от 1 до 999 МГц — в мегагерцах (буква М);
- от 1 до 999 ГГц — в гигагерцах (буква Г).

Пример 1.

0,002 Гц = Н002	5 кГц = 5К00
0,3 Гц = Н300	15,5 кГц = 15К5
25,3 Гц = 25Н3	1,45 МГц = 1М45
410 Гц = 410Н	3,25 ГГц = 3Г25

Классификация излучений РПДУ. Излучения классифицируются, и их класс обозначается в соответствии с их основными и дополнительными характеристиками радиосигнала. Первый символ (буква) в обозначении указывает на тип модуляции несущей: А — амплитудная двухполосная; Н, R, J — амплитудная однополосная с разной степенью подавления несущей; F, G — угловая (частотная и фазовая) и др. Второй символ (цифра) в обозначении указывает на характер модулирующего сигнала: 1, 2 — один канал цифровой информации; 3 — один канал аналоговой информации; 7, 8 — два или более канала, содержащие цифровую (7) или аналоговую (8) информацию. Третий символ (буква) в обозначении указывает тип передаваемой информации: А, Б — телеграфия, Е — телефония (включая звуковое ра-

диовещание), F — телевидение и т.д. Четвертый символ содержит данные о сигнале (сигналах): В, С — двухпозиционный код с одинаковым числом элементов и одинаковой длительностью без исправления (В) и с исправлением (С) ошибок, G, J — передача звука вещательного (G) или коммерческого (J) качества; N — передача цветного телевизионного сигнала. Пятый символ указывает характер уплотнения: N — без уплотнения, F, T — частотное (F) или временное (T) уплотнение и др.

Например, полное обозначение класса излучения для двухполосного звукового радиовещания — 8K00A3EГN. Допускается также обозначать класс излучения в сокращенном виде с использованием первых трех символов, характеризующих его основные характеристики. Например, 2K70J3E — одноканальная однополосная телефония с подавленной несущей (J3E) и необходимой шириной полосы частот $B_{\text{н}} = F_{\text{в}} - F_{\text{н}} = 3 - 0,3 = 2,7$ кГц.

К параметрам основного излучения радиостанции в необходимой полосе частот относятся:

- несущая частота и ее отклонение, Гц;
- необходимая полоса частот, Гц;
- выходная мощность, Вт, дБВт;
- поверхностная плотность потока мощности, Вт/м², дБВт/м², для бортовых передатчиков спутниковых РЭС;
- вид и параметры модуляции;
- ослабление несущего колебания и подавление нерабочей боковой полосы, дБ, для однополосных РИДУ.

Присвоение частот передающим станциям. Передающим станциям разрешается излучать радиосигналы только в пределах определенной полосы частот, которая называется *присвоенной*. Частота, соответствующая середине присвоенной радиостанции полосы частот, называется *присвоенной частотой*. Операция *присвоения* — разрешение, выдаваемое Администрацией связи, ответственной за соблюдение РР, на использование радиочастоты или радиочастотного канала при определенных условиях. Присвоение и использование частот передающими станциями определяются правилами, изложенными в РР [1]. Для радиосигналов с двухполосной передачей присвоенная частота совпадает с несущей, а при однополосной передаче отличается от нее. Например, при однополосной передаче верхней боковой амплитудно-модулированного радиосигнала средняя частота радиоспектра

$$f_{\text{ср}} = f_{\text{н}} + F_{\text{в}}/2, \quad (2.2)$$

где $f_{\text{н}}$ — несущая частота, $F_{\text{в}}$ — верхняя граничная частота модулирующего сигнала.

В зависимости от значения верхней граничной частоты $F_{\text{в}}$ модулирующего сигнала средняя частота изменяется, что не позволяет использовать ее в качестве присвоенной. Поэтому для радиолиний с однополосной передачей нормируется разность между несущей и присвоенной частотами. Например, для морской и воздушной подвижных служб, где необходимая ширина полосы частот $B_{\text{н}} = F_{\text{в}} - F_{\text{н}} = 3000 - 300 = 2700$ Гц, установлена разность 1400 Гц для всех классов излучений с однополосной модуляцией (Н, R, J).

С учетом нестабильности частоты радиопередатчиков ширина присвоенной полосы частот $B_{\text{н}}$ должна превышать ширину необходимой полосы $B_{\text{н}}$ на удвоенную величину *абсолютного допустимого отклонения частоты* $\Delta f_{\text{доп}}$ в соответствии с выражением

$$B_{\text{н}} = B_{\text{н}} + 2\Delta f_{\text{доп}}. \quad (2.3)$$

Допустимое отклонение частоты радиопередатчика — это максимально допустимая величина отклонения $\Delta f_{\text{макс}}$ фактической средней частоты радиоизлучения станции от номинального значения присвоенной ей частоты [2]. Допустимое отклонение частоты — долгосрочная нестабильность, которую должен обеспечивать передатчик за все время его рабо-

ты. Расширение присвоенной полосы частот по отношению к необходимой на величину $2\Delta f_{\text{доп}}$ обеспечивает защиту от радиопомех в смежных (соседних) каналах, расположенных выше и ниже присвоенной полосы. Допустимые отклонения устанавливаются с учетом норм РР и зависят от принадлежности РЭС к определенной службе, диапазона частот и средней мощности РПДУ. Например, в соответствии с действующими нормами [2] допустимое отклонение рабочей частоты радиовещательных передатчиков для диапазонов НЧ, СЧ и ВЧ не должно превышать ± 10 Гц, а в диапазоне ОВЧ — ± 100 Гц. Для космических станций присвоенная полоса частот включает удвоенный максимальный доплеровский сдвиг частоты, который может наблюдаться по отношению к любой точке земной поверхности.

Внеполосное излучение — нежелательное радиоизлучение, являющееся, как и основное, результатом модуляции несущей f_0 передаваемым сообщением. Причинами появления внеполосного излучения могут быть [2, 3]:

- недостаточное подавление на входе модулятора составляющих спектра модулирующего сигнала, находящихся за пределами верхней граничной частоты $F_{\text{в}}$, обеспечивающей требуемое качество передачи (например, модуляция импульсами с излишне крутыми фронтами);
- наличие нелинейности амплитудной и фазовой характеристик тракта передатчика (усилителей, модулятора);
- применение модулирующих сигналов излишне большого уровня (явление перемодуляции) или ограничение их амплитуд; квантование и др.

В результате в спектре излучаемых станцией радиосигналов появляются составляющие, лежащие за пределами необходимой полосы частот, которые ухудшают ее ЭМС с другими РЭС, работающими в соседних каналах. Излучение, ширина которого не выходит за пределы необходимой ширины полосы радиочастот $B_{\text{н}}$, называют *совершенным* (оптимальным). На практике большинство радиостанций имеют несовершенное (неоптимальное) излучение из-за появления внеполосного радиоизлучения. Поэтому для оценки фактического (несовершенного) излучения введено понятие *занимаемой полосы* $B_{\text{зн}}$ радиочастот, за пределами которой излучается определенная доля β (например, $\beta = 1\%$) средней мощности радиостанции на присвоенной ей частоте f_0 (рис. 2.3).

В пределах занимаемой полосы в этом случае сосредоточено $100 - \beta = 99\%$ средней мощности излучения. При этом мощность радиопомех от внеполосных излучений станций, работающих в смежных (соседних) частотных каналах с данной, не превышает $\beta\%$ мощности сигнала в основном канале приема. Значение β устанавливается для каждого класса излучения и в большинстве случаев не превышает 0,5%.

На практике важно также иметь информацию о форме огибающей спектра и о скорости убывания спектральных составляющих внеполосного излучения за пределами необходимой полосы частот. С этой целью вводится понятие ширины полосы частот на уровне $-X$ дБ относительно уровня основного излучения, принятого за 0 дБ (B_X на рис. 2.3). За пределами полосы B_X интенсивность любых дискретных спектральных составляющих или спектральная плотность мощности внеполосного излучения ослаблена относительно уровня основного излучения (в полосе $B_{\text{н}}$ на рис. 2.3) не менее чем на X дБ. Обычно за нижний уровень измеряемой мощности принимается уровень, расположенный на 60 дБ ($X = -60$ дБ) ниже уровня основного излучения (0 дБ на рис. 2.3). Использование нескольких измерительных уровней ($X = -30, -40, -50$ и т.д.) позволяет контролировать форму и скорость убывания внеполосного излучения. Оценка занимаемой полосы частот по критерию относительного уровня $-X$ дБ для классов излучений АЗЕ, НЗЕ, РЗЕ, JЗЕ лучше и точнее характеризует спектр сигнала по сравнению с энергетическим критерием [2, 3].

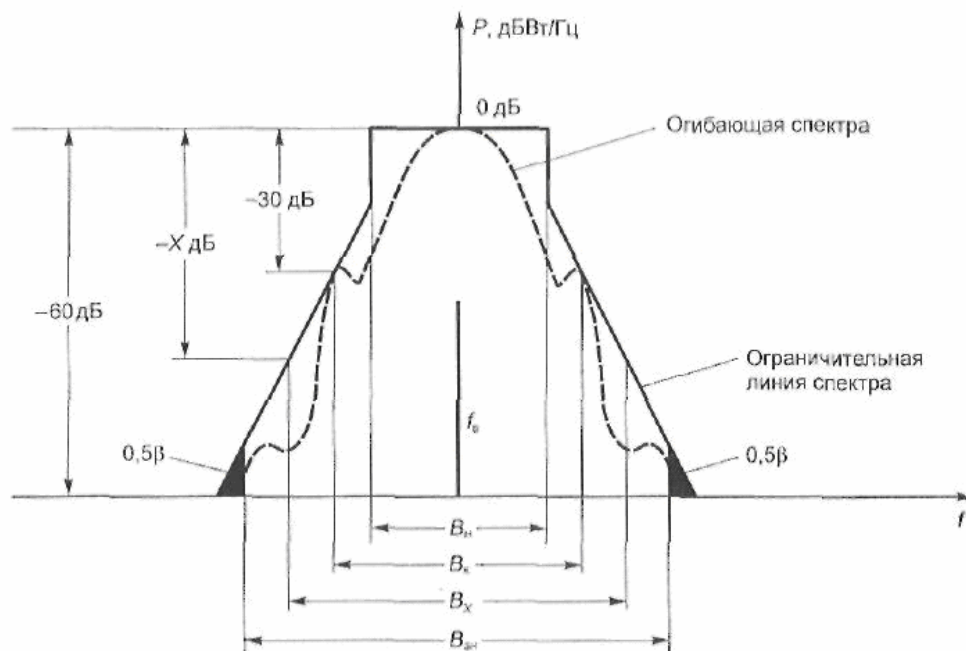


Рис. 2.3. Характеристики основного и внеполосного излучения РПДУ

Контроль и нормирование внеполосного излучения осуществляется с помощью *контрольной ширины полосы частот* излучения B_k , за нижним и верхним пределами которой любая спектральная составляющая ослаблена на 30 дБ (в 1000 раз) и более по отношению к максимальному значению излучаемой мощности. Значение контрольной ширины полосы частот используется при распределении и присвоении номинальных частот радиостанциям и при расчетах частотного разнеса между соседними станциями.

Линия, проходящая через допустимые значения уровней X излучения, называется *ограничительной* (уровни 0, -30, - X , -60 дБ на рис. 2.3). Она определяет верхнюю границу максимально допустимых значений составляющих спектра внеполосного излучения. Огибающая реального спектра мощности излучения не выходит за пределы установленной ограничительной линии. Значения ширины полос частот (B_n , B_k , B_x , $B_{ш}$) нормированы для различных классов излучения [1, 2, 7]. Пример норм на ширину полосы частот и внеполосные радиоизлучения для сигнала класса ЖЭ (радиопередатчики фиксированной службы) представлен в табл. 2.1 [2, 7].

Таблица 2.1. Пример норм на ширину полосы частот и внеполосные излучения

Класс излучения ЖЭ	Формулы для расчета			
	необходимой ширины полосы частот B_n , Гц	контрольной ширины полосы частот B_k , Гц	внеполосных радиоизлучений	
			на уровне - X дБ	ширины полосы B_x , Гц
Телефония, одна боковая полоса, подавленная несущая	$B_n = (F_в - F_н)$	$B_k = 1,15 B_n$	30	$1,15 B_n = B_k$
			35	$1,25 B_n = 1,09 B_k$
			40	$1,6 B_n = 1,39 B_k$
			50	$2,9 B_n = 2,52 B_k$
			60	$5,4 B_n = 4,7 B_k$

Измеренные значения контрольной ширины полосы частот B_x и внеполосных излучений B_x не должны более чем на 20% превышать нормируемые значения [2]. Наличие норм позволяет строить модели огибающей спектра мощности основного и внеполосного излучений, что необходимо при анализе ЭМС радиостанций.

При построении модели огибающая реального спектра аппроксимируется кусочно-линейной ограничительной линией вида, показанного на рис. 2.3 [2, 7]. При этом распределение мощности вблизи основного излучения представляется выражением [2, 7]

$$P(\Delta f) = P(\Delta f_i) + V_i \lg(\Delta f / \Delta f_i), \quad (2.6)$$

где $P(\Delta f_i)$ — уменьшение уровня мощности излучения при расстройке на Δf_i относительно уровня основного излучения (0 дБ), дБ; V_i — наклон огибающей ограничительной линии спектра в пределах i -го линейного участка аппроксимации, в интервале частот от Δf_i до Δf_{i+1} , дБ/дек.

Наклон ограничительной линии V_i (ее крутизна) характеризует скорость убывания мощности спектральных составляющих излучения:

$$V_i = [P(\Delta f_{i+1}) - P(\Delta f_i)] / \lg(\Delta f_{i+1} / \Delta f_i). \quad (2.7)$$

Пример 2. Требуется построить модель огибающей спектра мощности основного и внеполосного излучений для сигналов класса J3E (телефония, одна боковая полоса частот, подавленная несущая). Координаты контрольных точек ограничительной линии спектра приведены в табл. 2.1.

Решение. Ограничительная линия спектра при выделении верхней боковой полосы частот представлена на рис. 2.4.

Участок 1 огибающей по оси частот ограничен точками с координатами 0 и B_n . В пределах этого участка $P(\Delta f) = 0$ дБ и $V_1 = 0$ дБ/дек.

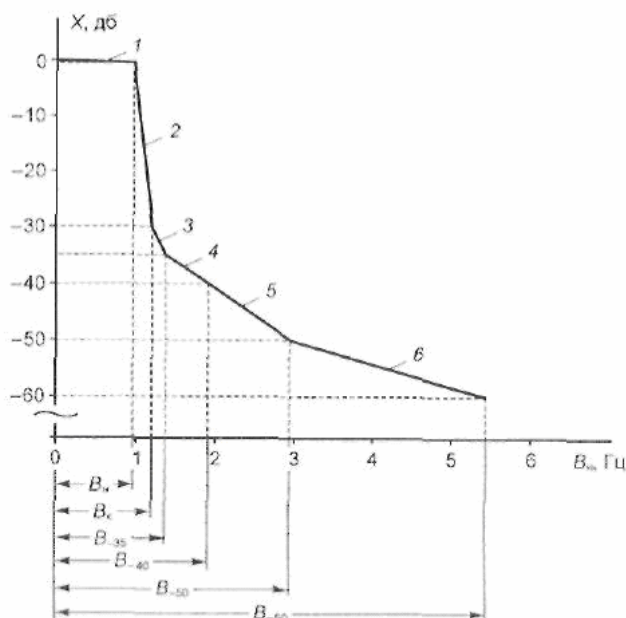


Рис. 2.4. Модель огибающей радиоизлучения класса J3E

Участок 2 огибающей ограничен точками с координатами $X_0 = 0$ дБ, $\Delta f_1 = B_n$ и $X_k = -30$ дБ, $\Delta f_2 = B_c = 1,15 B_n$. Скорость изменения огибающей (крутизну наклона) на этом участке получаем при подстановке координат граничных точек в уравнение (2.7):

$$V_2 = (X_k - X_0) / \lg(B_n / B_n) = -30 / \lg 1,15 = -500 \text{ дБ/дек.}$$

С учетом (2.6) уравнение огибающей на втором участке имеет вид

$$P(\Delta f) = -500 \lg(\Delta f / B_n) \text{ при } B_n \leq \Delta f \leq 1,15 B_n.$$

Участок 3 огибающей (см. рис. 2.4) ограничен точками с координатами $X_k = -30$ дБ, $B_k = 1,15 B_n$ и $X_l = -35$ дБ, $B_{35} = 1,25 B_n$. Крутизна наклона огибающей на этом участке

$$V_3 = (X_l - X_k) / \lg(B_{35} / B_k) = -135 \text{ дБ/дек.}$$

Уравнение для огибающей участка 3 будет

$$P(\Delta f) = P(B_k) + V_3 \lg(\Delta f / B_k) = -30 - 135 \lg(\Delta f / 1,15 B_n) = -22 - 135 \lg(\Delta f / B_n) \text{ при}$$

$$1,15 B_n \leq \Delta f \leq 1,25 B_n.$$

Выполняя аналогичные вычисления для участков 4, 5 и 6 огибающей и объединяя уравнения отдельных участков, получаем модель спектра мощности основного и внеполосного излучений класса J3E, представленную на рис. 2.4:

$$P(\Delta f) = \begin{cases} 0 & \text{при } |\Delta f| \leq B_n; \\ -500 \lg(\Delta f / B_n) & \text{при } B_n \leq |\Delta f| \leq 1,15 B_n; \\ -22 - 135 \lg(\Delta f / B_n) & \text{при } 1,15 B_n \leq |\Delta f| \leq 1,25 B_n; \\ -30,6 - 47 \lg(\Delta f / B_n) & \text{при } 1,25 B_n \leq |\Delta f| \leq 1,6 B_n; \\ -32 - 39 \lg(\Delta f / B_n) & \text{при } 1,6 B_n \leq |\Delta f| \leq 2,9 B_n; \\ -33 - 37 \lg(\Delta f / B_n) & \text{при } 2,9 B_n \leq |\Delta f| \leq 5,4 B_n. \end{cases}$$

Побочные излучения — нежелательные радиоизлучения, возникающие в результате любых нелинейных процессов в тракте формирования высокочастотных сигналов РПДУ, кроме процесса модуляции. К ним относятся все показанные на рис. 2.2 радиоизлучения, кроме основного, внеполосного и шумового. Интенсивность подобных излучений зависит от диапазона рабочих частот радиопередатчика, типа и режима работы активных элементов и др. [2, 3]. Уровень побочных излучений определяется по отношению к основному излучению в децибелах и должен соответствовать нормам РР [1] и другим директивным документам [2,7]. Например, средняя мощность любого побочного колебания на выходе телевизионного передатчика, работающего в I–III диапазонах, не должна превышать 1 мВт и –60 дБ от его номинальной пиковой мощности [2].

Радиоизлучения на гармониках — побочные излучения на частотах f_n , в целое число раз больших частоты f_0 основного излучения: $f_n = n f_0$, $n = 2, 3, \dots$. Причинами появления гармоник являются: 1) работа усилителя мощности передатчика с отсечкой анодного (коллекторного) тока; 2) нелинейность характеристик элементов радиотракта передатчика. Уровень гармоник на выходе зависит от многих факторов: особенностей схемы передатчика, качества фильтрации выходных цепей, рабочего режима активных приборов и др. [2, 3]. Амплитуды гармоник связаны со степенью нелинейности и обычно убывают с увеличением номера гармоники. Уровни гармонических составляющих имеют значительный разброс даже для однотипных передатчиков (до 10...20 дБ). При расчетах радиопомех, создаваемых гармониками, полагают, что уровни мощности помех распределены по нормальному закону около своего среднего значения и среднеквадратическое отклонение не зависит от номера гармоники.

Среднее значение уровня мощности излучения на частоте n -й гармоники, дБВт, можно выразить в виде [3]

$$P_1(f_n) = P_0(f_0) + V_r \lg f_n + A_r, \quad n \geq 2, \quad (2.8)$$

где $P_0(f_0)$ — уровень средней мощности основного излучения, дБВт; V_r — коэффициент, характеризующий скорость убывания спектра, дБ/дек; A_r — ослабление излучения на гармонике по отношению к основному, дБ.

Коэффициенты A_r , V_r можно рассчитать по статистическим данным измерений. В табл. 2.2 представлены усредненные экспериментальные результаты измерений для радиопередатчиков различных диапазонов волн [2, 3].

Таблица 2.2. Экспериментальные результаты измерений

Диапазон частот, МГц	V_r , дБ/дек	A_r , дБ
Менее 30	-70	-20
30...300	-80	-30
Более 300	-60	-40

Выражение (2.8) и данные табл. 2.2 позволяют рассчитать ожидаемый уровень средней мощности излучения радиопередатчика на определенной гармонике.

Например, в передатчике с выходной мощностью $P = 10$ Вт (10 дБВт), работающего на частоте 150 МГц, ожидаемый уровень средней мощности излучения на частоте второй гармоники

$$P_r(f_2) = 10 - 80 \lg 2 - 30 = 10 - 24 - 30 = -44 \text{ дБВт.}$$

Ослабление уровня мощности второй гармоники относительно уровня основного излучения составляет 54 дБ.

На рис. 2.5 представлены рекомендованные МСЭ нормы на допустимые уровни радиоизлучений на гармониках в зависимости от средней мощности основного излучения P_0 в диапазоне частот 10 кГц...960 МГц [2, 3].

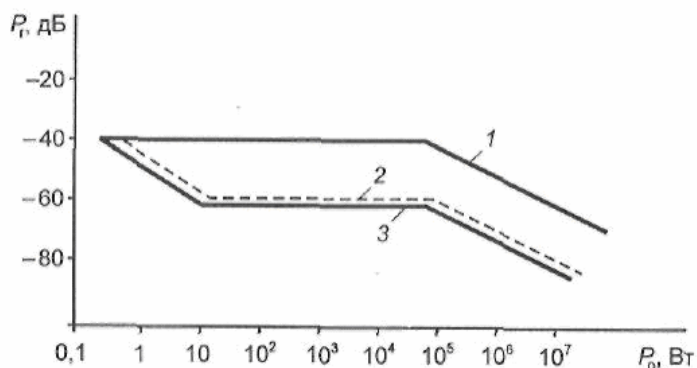


Рис. 2.5. Нормы излучения радиопередатчиков на гармониках: 1 — диапазон 10 кГц...30 МГц; 2 — 30...235 МГц; 3 — 235...960 МГц

Ослабление уровня гармоник в диапазоне ниже 30 МГц должно быть не менее 40 дБ относительно уровня основного излучения, а в диапазоне 30...960 МГц не менее 40...60 дБ (в зависимости от мощности основного излучения).

Радиоизлучения на субгармониках — побочное излучение на частотах $f_{ст}$, в целое число раз меньших частоты основного излучения: $f_{ст} = f_0/n$, $n = 2, 3, 4, \dots$ Эти излучения характерны для радиопередатчиков, в которых выходные радиосигналы формируются с помощью умножителей частоты. Хотя на выходе умножителей обычно стоит фильтр, выделяющий основное колебание с частотой f_0 , но вследствие недостаточного ослабления колебаний с частотами $f_n = f_0/n, 2f_0/n, 3f_0/n, \dots$ они попадают на вход усилителя мощности и с его выхода

поступают в антенно-фидерную систему. Оценку уровня излучения на субгармониках в диапазонах частот, указанных в табл. 2.2, можно осуществлять с помощью выражения (2.8) с использованием следующих значений: $V_{cr} = -20$ дБ/дек, $A_{cr} = -80$ дБ [3].

Комбинационное излучение — побочное радиоизлучение, возникающее в результате взаимодействия на нелинейных элементах РПДУ колебаний на частотах несущей или формирующих несущую частоту, а также гармоник этих колебаний [2, 3]. Они образуются в возбuditеле или синтезаторе частоты передатчика, когда рабочая частота формируется из одной или нескольких частот автогенератора или опорного кварцевого генератора. В синтезаторе сетка рабочих частот создается путем нелинейных преобразований нескольких колебаний с частотами f_1, f_2, f_3, \dots , находящихся обычно в декадном соотношении: $f_2 = 10f_1, f_3 = 10f_2, \dots$. В результате их смешивания появляются различные комбинационные составляющие с частотами $f_k = pf_1 \pm qf_2 \pm mf_3$ ($p, q, m = 1, 2, 3, \dots$), которые присутствуют на выходе синтезатора вместе с полезным колебанием рабочей частоты. Уровни комбинационных составляющих излучения на выходе радиопередающего устройства имеют наибольшее значение в полосе частот оконечного усилителя мощности и быстро убывают за ее пределами.

Оценку уровня средней мощности комбинационного излучения, дБВт, дает выражение [3]

$$P_k(f) = P_o(f_o) + V_k \lg(f_k/f_o) + A_k, \quad (2.9)$$

где $P_o(f_o)$ — уровень средней мощности основного излучения, дБВт; f_k — частота комбинационного излучения, Гц; V_k — коэффициент, характеризующий скорость убывания спектра, дБ/дек.; A_k — величина ослабления комбинационного излучения, дБ.

Для коротковолновых передатчиков при $1,001 < f_k/f_o < 1,1$, $V_k = -160$ дБ/дек, $A_k = -39$ дБ, вычисление по (2.9) дает общее ослабление уровня комбинационного излучения $-(40 \dots 46)$ дБ [3]. Уровни комбинационных излучений обычно меньше уровней излучений на гармониках.

Интермодуляционное излучение — побочное радиоизлучение, возникающее в результате воздействия на нелинейные элементы высокочастотного тракта радиопередающего устройства генерируемых колебаний и внешнего электромагнитного поля (от других передатчиков). Такая ситуация возможна при близком расположении антенн соседних радиостанций на ограниченной территории либо при работе передатчиков на общую диапазонную антенну. В [2, 3] отмечены две причины возникновения интермодуляционных колебаний: 1) мешающий сигнал поступает на оконечный каскад передатчика и усиливается вместе с полезным сигналом; 2) сигнал на частоте помехи изменяет параметры активного элемента во времени, что приводит к модуляции полезного сигнала на рабочей частоте и к появлению в спектре выходного сигнала передатчика интермодуляционных составляющих. При взаимодействии двух передатчиков с рабочими частотами f_1 и f_2 интермодуляционные составляющие возникают на частотах $f_n = pf_1 + nf_2$, $p, n = \pm 1, 2, 3, \dots$. Их число быстро увеличивается с ростом порядка интермодуляции $N = |p| + |n|$. Значения некоторых интермодуляционных частот приведены в табл. 2.3 [2].

Таблица 2.3. Интермодуляционные частоты

Порядок интермодуляции	2	3	5	7
Сочетание частот	$ f_1 \pm f_2 $	$2f_1 - f_2$ $2f_2 - f_1$	$3f_1 - 2f_2$ $3f_2 - 2f_1$	$4f_1 - 3f_2$

Мощность интермодуляционного колебания зависит от мощности мешающего передатчика, типа активных элементов в выходных каскадах, степени связи между передатчиками и от разности рабочих частот f_1 и f_2 . Интермодуляционные частоты четного порядка имеют

значительную расстройку относительно рабочей частоты передатчика, и поэтому их уровни сильно ослаблены фильтрующими системами. Составляющие 3-го порядка по частоте наиболее близки к частоте основного излучения и могут попадать в полосу пропускания выходного каскада. Они мало ослабляются избирательными цепями каждого передатчика и поэтому оказывают наибольшее мешающее действие. Составляющие 5-го и 7-го порядков также могут находиться в полосе усиления оконечных каскадов, но их мощность значительно меньше составляющих 3-го порядка. Основные меры по уменьшению интермодуляционных излучений состоят в улучшении фильтрации и уменьшении степени связи между передающими антеннами путем их рационального размещения.

Паразитное излучение — побочное радиоизлучение, возникающее в результате самовозбуждения радиопередатчика из-за паразитных связей в его каскадах. Паразитные колебания в усилительных и генераторных каскадах появляются, если выполняются условия самовозбуждения на частотах, определяемых параметрами цепи паразитной связи. Паразитные излучения могут возникать на частотах как ниже, так и выше частоты основного радиоизлучения. Их особенностью являются отсутствия кратности частоте основного радиоколебания. Мощность и значение частоты паразитного излучения трудно прогнозируемы и могут иметь значительный разброс даже в группе однотипных передатчиков.

Уровни побочных радиоизлучений нормируются РР и другими нормативными документами [1, 2]. За нормируемую величину мощности побочного излучения принимается средняя мощность, передаваемая от передатчика в антенно-фидерный тракт на частоте побочного излучения, выраженная в абсолютных и относительных единицах (по отношению к средней мощности передатчика в пределах необходимой ширины полосы). Приведенные в табл. 2.4 нормы установлены в зависимости от мощности передатчиков и от диапазона рабочих частот и должны выполняться для любой из рассмотренных выше составляющих побочных излучений [1, 2].

Таблица 2.4. Нормируемые уровни побочных излучений

Полоса частот	Средняя мощность	Нормируемые уровни побочных излучений
9 кГц...30 МГц 30...235 МГц	25 Вт и менее	-40 дБ; 50 мВт
	Более 25 Вт	-60 дБ; 1 мВт
235...960 МГц	25 Вт и менее	-40 дБ; 25 мкВт
	Более 25 Вт	-60 дБ; 20 мВт
960 МГц...17,7 ГГц	10 Вт и менее	100 мкВт
	Более 10 Вт	-50 дБ; 100 мкВт

Шумовое излучение — нежелательное радиоизлучение, обусловленное собственными шумами элементов передатчика и паразитной модуляцией несущей шумовыми процессами. Шумовые излучения характеризуются спектральной плотностью мощности (абсолютной или по отношению к уровню основного излучения) и шириной занимаемой полосы частот. Интенсивность шумовых излучений зависит от схемы передатчика, его назначения, диапазона частот применяемой элементной базы и отстройки Δf от частоты f_0 основного излучения. Для количественного описания шумовых излучений можно использовать выражение, аналогичное (2.8), (2.9) [3]:

$$P_m(\Delta f) = P_0(f_0) + V_m \lg(2\Delta f/B_m) + A_m, \quad (2.10)$$

где $P_m(\Delta f)$ — уровень мощности шумового излучения при отстройке на Δf от частоты основного излучения, дБВт; V_m — скорость убывания уровня шумового излучения, дБ/дек;

$A_{ш}$ — ослабление мощности шумового излучения в занимаемой полосе $B_{ш}$ относительно основного, дБ.

Для широко- и узкодиапазонных радиопередатчиков коэффициент $V_{ш}$ равен соответственно -3 и -15 дБ/дек, а $A_{ш} = -60 \dots -80$ дБ [3]. В основной полосе частот уровень шумов на $60 \dots 80$ дБ ниже уровня основного излучения, и поэтому шумы не влияют на качество принимаемого сигнала. Однако за пределами этой полосы, даже при расстройке на $\pm(5 \dots 10)$ МГц, шумовое излучение передатчика может создавать ощутимые помехи близко расположенным приемным устройствам других РЭС, работающим в соседних частотных каналах [2, 3]. Уменьшить эти помехи можно, удалив приемники на достаточно большое расстояние.