

УДК 621.396.621

ИЗМЕРЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ РАДИОПОМЕХ

Э.Ф. Хамадулин

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.
test-center@vniiftri.ru

В настоящее время измерение импульсных радиопомех является актуальной задачей. При изучении методов и средств измерений в области ЭМС приходится пользоваться как классическими терминами, так и определением ЭМС, не получившими широкого распространения. В результате традиционные методы измерения радиопомех (анализ в частотной области) оказались неэффективными в случае измерения различных импульсных радиопомех, и в последнем случае необходимы измерения параметров помех во временной области.

Ключевые слова: импульсные радиопомехи, электромагнитная совместимость, спектральная плотность, амплитудно-вероятностное распределение.

THE MEASUREMENT OF PULSED RADIO INTERFERENCE

E.F. Khamadulin

FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region
test-center@vniiftri.ru

Currently, the measurement of pulsed radio interference is a critical task. When studying methods and measurement instruments in the field of EMC, one has to use both classical terms and EMC definition that are not widely used. As a result, the traditional methods of measuring radio interference (analysis in the frequency domain) were ineffective in the case of measuring various pulsed radio interference, and in the latter case, measurements of the interference parameters in the time domain are necessary.

Key words: pulse radio interference, electromagnetic compatibility, spectral density, amplitude-probability distribution.

Импульсные помехи представляют особый, но типичный для ЭМС случай, когда радиопомехи представляют серию импульсов, следующих друг за другом через неравные промежутки. Указанные импульсы могут отличаться по амплитуде и длительности в сотни раз [1].

Целью данной статьи является обоснование применения новых методов измерений с использованием спектральной плотности импульсов (СП) и амплитудно-вероятностного распределения (АВР).

Виды импульсных радиопомех приведены на рис. 1.

Проблема обеспечения оценки импульсных радиопомех имеет ряд отличий от стандартных методов измерений [1].

Предлагается использовать методы и аппаратуру для измерения радиопомех с использованием вероятностных распределений параметров радиопомех и определения условного коэффициента пиковости (КП).

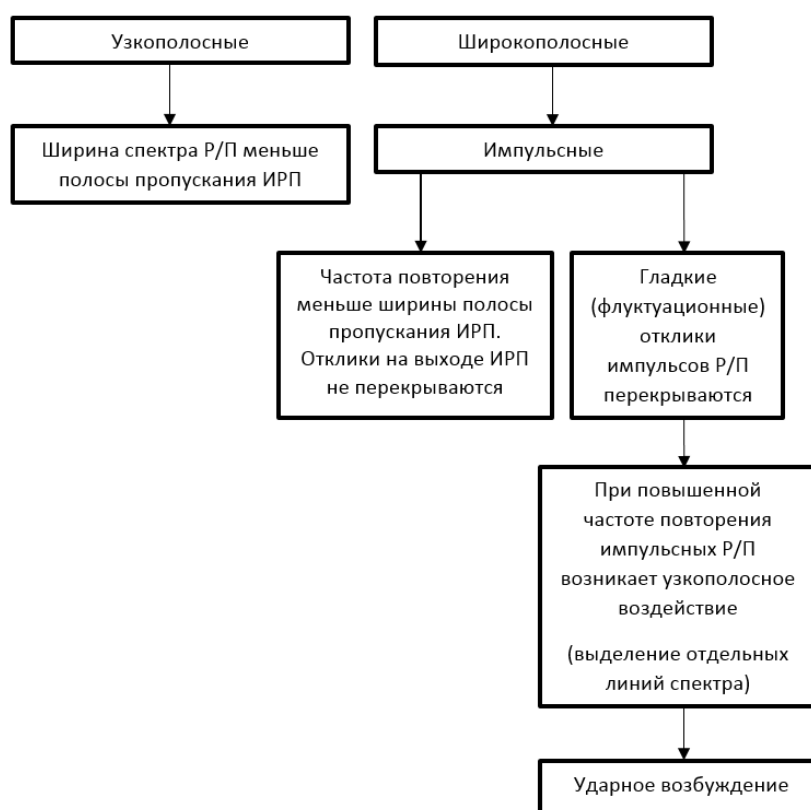


Рис. 1. Виды импульсных радиопомех

Другое направление, описанное в [2, 3], основанное на определении спектральной плотности (СП) импульсов, может быть использовано для оценки параметров импульсных радиопомех. Указанные методы позволяют проводить более детальное изучение структуры импульсных помех и дают объективные методы оценки указанных помех. Как следует из ГОСТ Р 51318.16.1.6, таблица 6, примечание 1, применяемые ранее процедуры оценки могут привести к ошибке измерения.

Указывается неэффективность использования методов и норм измерения квазипиковых (QP) и средних (AV) параметров интенсивности (напряжения, напряжённости, мощности) для оценки мешающего действия радиопомех.

Спектральная плотность $S(j\omega)$ функции $f(t)$ получается в результате прямого преобразования Фурье. Так же как и коэффициенты ряда Фурье, спектральная плотность является комплексной величиной. Под действием входного импульса со спектральной плотностью $\Phi(f_0)$ на выходе избирательного усилителя получается отклик [1]:

$$U(t) = \frac{1}{2} \Phi(f_0)[f(t) \cdot g(t)], \quad (1)$$

где $U(t)$ — амплитудное значение напряжения, В; $\Phi(f_0)$ — спектральная плотность, В/Гц; $g(t)$ — импульсная характеристика.

Из формулы (1) видно, что когда на вход ИРП подаётся периодическая последовательность импульсов, ИРП измеряет СП импульсов с зависящим от частоты повторения весовым коэффициентом

$$A(f) = \frac{U(t)}{\Phi(t)},$$

где $A(f)$ — амплитудное соотношение, Гц.

При сложившейся традиции абсолютное значение коэффициента $A(f)$ нормируется на одной частоте повторения, обычно равной 100 Гц, которое называется амплитудным соотношением. Для остальных частот повторения нормируется отношение коэффициентов в форме зависимости

$$20 \log_{10} \frac{A(100)}{A(f)}$$

неудачно называется «импульсной характеристикой».

Широкополосные импульсные помехи представляют собой особый, но типичный для ситуации ЭМС случай, когда спектр на входе избирательного устройства шире полосы прозрачности и практически равномерен в этой полосе. В этом случае более удобна импульсная характеристика устройства, а испытательный сигнал может быть охарактеризован одним числом в частотной области — абсолютным значением спектральной плоскости (СП) в полосе пропускания. По этой причине разработка методов испытания избирательных приёмных устройств и, прежде всего, измерителей радиопомех по импульсам привела к формированию несколько своеобразного направления в радиоизмерениях, то есть к измерению абсолютного значения спектральной плотности импульсов.

В большинстве случаев в настоящее время радиопомехи могут представлять серию импульсов, следующих друг за другом через равные и неравные промежутки, а сами импульсы могут отличаться по амплитуде и длительности в сотни раз. В общем случае интервал между импульсами может быть больше длительности сигнала радиопомехи на выходе измерителя радиопомех (ИРП), но в то же время частота повторений импульсов должна быть примерно в три раза меньше ширины полосы пропускания ИРП.

Амплитуда импульсов помехи зависит в основном от ширины полосы пропускания ИРП на уровне 0,5 (максимального значения частотной характеристики ИРП). Для измерения различных видов радиопомех, в том числе импульсных, для калибровки ИРП применяется более общая характеристика [1, 4] «амплитудное соотношение (A)»:

$$A = \frac{U}{\Phi},$$

где U — среднеквадратическое значение синусоидального напряжения на частоте 100 Гц, измеренное ИРП; Φ — спектральная плотность напряжения импульса на входе ИРП.

В общем случае A зависит от f (частота повторений регулярных измеряемых импульсов). Отношение $A(100)$ в форме $A(100) / A(\Phi)$ определяется как «импульсная характеристика».

Контроль АС и «импульсной характеристики» позволяет проверить одновременно правильность полосы пропускания ИРП, характеристик детектора ИРП, запас линейности ИРП при измерении импульсных радиопомех.

Характеристики интенсивности радиопомех определяются в основном видом устройства (рецептора), на которое действует помеха, оказывающая «мешающее» действие на функционирование рецептора.

В связи с появлением других источников радиопомех и с интенсивным развитием различных импульсных устройств, особенно цифровых, потребовалось освоение более широкого диапазона частот, а практика измерений радиопомех сохранилась с некоторыми техническими изменениями, соответствующими частотному диапазону. В связи с этим появились проблемы измерения импульсных, случайных видов радиопомех. Наиболее кардинальный подход к измерению интенсивности радиопомех установлен в стандарте MIL-STD-464A «*Electromagnetic Environmental effect*» [3], в котором понятие «индустриальная помеха» заменено на понятие «электромагнитные эффекты от окружающей среды». Цель данного сообщения — предложить методы измерения интенсивности радиопомех в терминах «индустриальная помеха» в соответствии с возникающими в последнее время проблемами.

Для рецепторов импульсных помех измерения с использованием «квазипикового детектора» потеряли физический смысл. Детектор «среднего значения», который рекомендован для применения в ряде стандартов, имеет практический смысл для радиопомех в виде амплитудно-модулированной синусоидальной помехи.

Для анализа поведения различных типов детекторов при измерении параметров интенсивности импульсных радиопомех проведены расчёты АС, приведённые на рис. 2, 3.

На рисунке 2 приведены следующие обозначения:

- а) F — частота импульсов;
- б) P — пиковое значение;
- в) $A = U / \Phi$ — амплитудное соотношение, где U — отчёт по ИР;
- г) QP — квазипиковое значение;
- д) AV — среднее значение;
- е) RmS — эффективное значение.

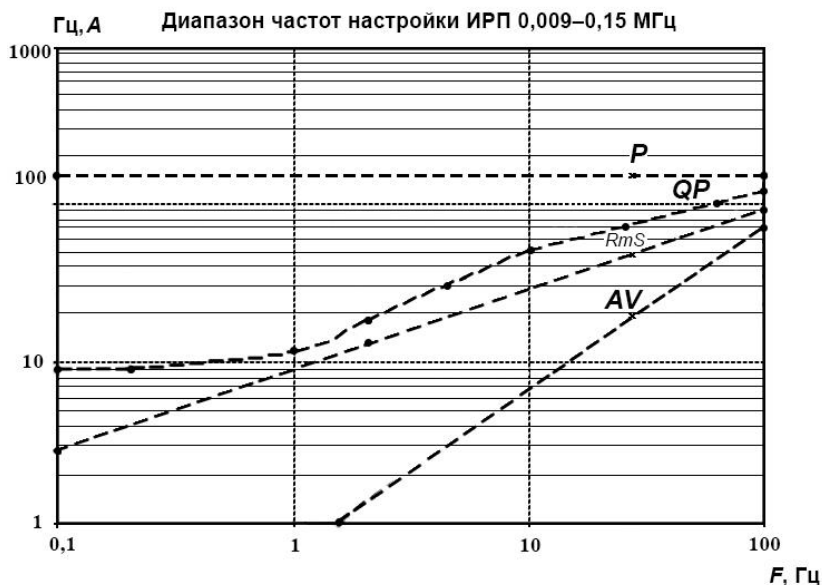


Рис. 2. Диапазон частот настройки ИРП 0,009–0,15 МГц

На рисунке 3 приведены следующие обозначения:

- а) $A_{\text{пик}} = U_{\text{пик}} / \Phi$, где $U_{\text{пик}}$ — пиковое напряжение;
- б) $A_{\text{квазипик}} = U_{\text{квазипик}} / \Phi$, где $U_{\text{квазипик}}$ — квазипиковое напряжение;
- в) $A_{\text{эфф}} = U_{RmS} / \Phi$, где U_{RmS} — среднеквадратическое напряжение;
- г) $A_{\text{ср}} = U_{\text{ср}} / \Phi$, где $U_{\text{ср}}$ — среднее значение напряжения.

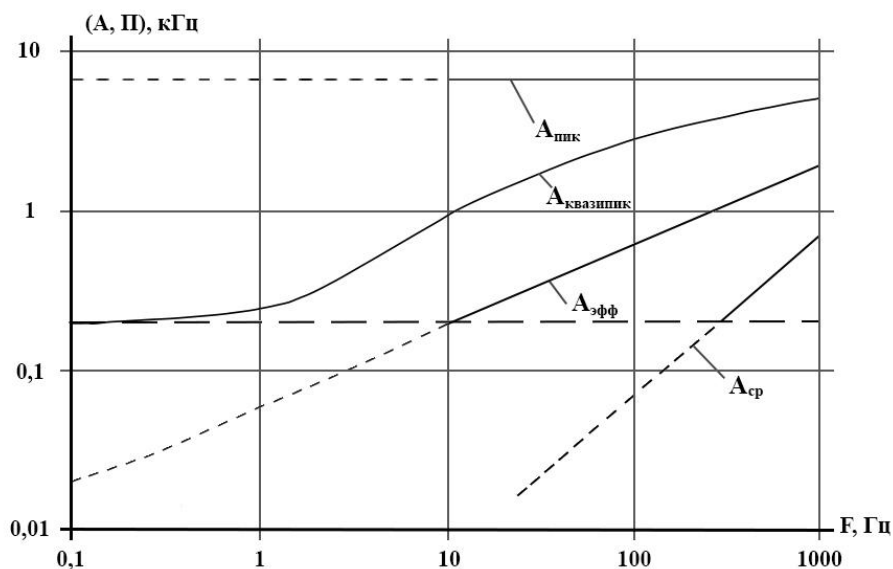


Рис. 3. Диапазон частот настройки ИРП 0,1–1000 Гц

На рисунках 2, 3 представлены графики стандартного амплитудного соотношения в разных диапазонах ИРП как реакция ИРП для импульсных сигналов с разным периодом повторения на его входе при постоянной спектральной плотности напряжения импульсов для НЧ диапазона частот повторения. На указанных рисунках характеристики RmS и QP в значительной части параллельны.

Одинаковый в основном ход графиков RmS и QP указывает на возможности замены измерения квазипикового значения на среднеквадратическое, т.е. по существу на измерение мощности помехи в полосе частот ИРП — параметр, более обоснованный физически и пригодный для любой формы напряжения на входе ИРП.

Из вышеуказанного можно сделать вывод, что лучше использовать среднеквадратический детектор для оценки всех видов импульсных радиопомех. Используя графики 2, 3, можно перейти на нормы, написанные для квазипикового вольтметра. На графике (рис. 3) приведены характеристики неквазипиковых вольтметров, где по существу предполагается измерять СП импульсных радиопомех.

При измерении импульсных радиопомех стандартные методы калибровки ИРП в значительной степени требуют пересмотра. Для указанного вида радиопомех ИРП должен представлять измеритель СП напряжения импульсов, независимо от того, производится это измерение с переходом к СП или в виде измерения компонент радиопомех, т.е. отношения сигнал/помеха. Для широкополосных помех это положение должно сохраниться при разработке метода измерения помех как случайного процесса, например, с определением параметров амплитудно-вероятностного распределения (АВР) на выходе узкополосного ИРП. Так как эти методы измерений редко встречаются в нормативной документации, то целесообразно более подробно на них остановиться.

В [2] указывается на возможность представления результатов измерения в значениях, отнесённых к полосе частот 1 кГц, т.е. по существу на измерение спектральной плотности. В стандартных измерителях радиопомех переход от значений эквивалентного синусоидального напряжения к СП не рассмотрен, хотя и представляется полезным в случае разработки норм на допускаемые уровни радиопомех.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод, что лучше использовать среднеквадратический детектор, который позволяет адекватно оценивать всё разнообразие радиопомех. И с помощью графиков, изображённых на рисунках, мы сможем легко перейти на нормы, написанные для квазипикового детектора.

Что касается вольтметра средневыпрямленного значения, то привлекательный по своей первоначальной идее для измерения спектральной плотности напряжения (реакция на неё не зависит от полосы пропускания) он имеет

ряд недостатков: низкую чувствительность, погрешность от знакопеременного отклика.

Другое направление измерения импульсных радиопомех основано на применении параметров АВР, которое реализуется с применением анализатора амплитуд.

На рисунке 4 представлена функциональная схема анализатора амплитуд, который служит для вывода гистограммы (рис. 5) при определённой последовательности откликов на выходе измерительного приёмника.

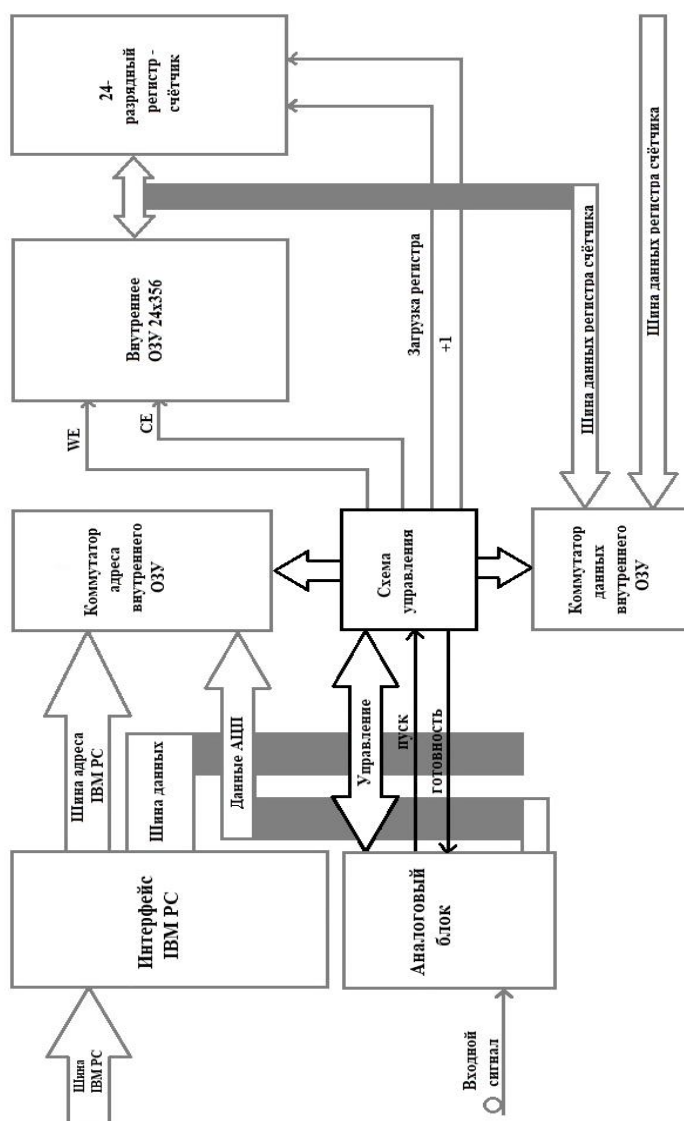


Рис. 4. Анализатор амплитуд

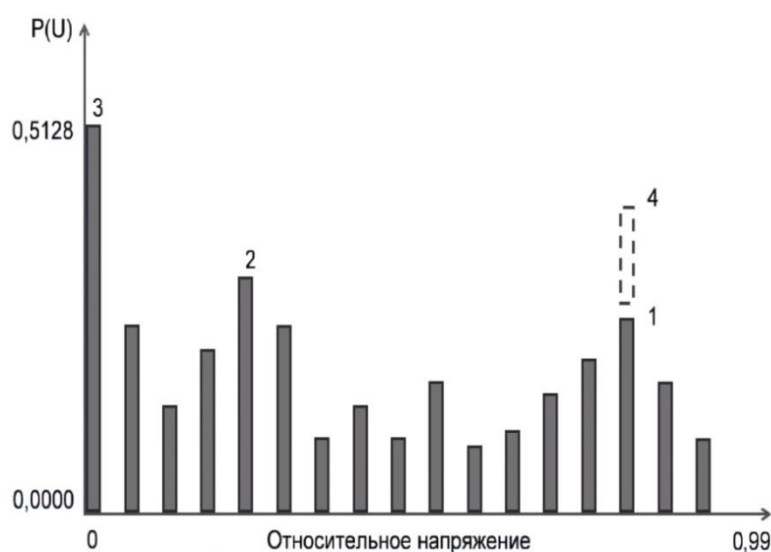


Рис. 5. Гистограмма анализатора амплитуд

По оси абсцисс отложен уровень напряжения в относительных единицах. По оси ординат — вероятность пребывания напряжения на этом уровне.

Максимумы гистограммы 1, 2, 3 соответствуют медленным участкам отклика с выхода ПЧ измерительного приёмника. Для калибровки гистограммы по оси абсцисс подаётся известное синусоидальное напряжение U_{\max} , его гистограмма соответствует максимуму 4.

По получаемой в результате измерений гистограмме, определённой как последовательность откликов на выходе ИП со своими весовыми характеристиками, можно вычислить среднеквадратическое напряжение по формуле:

$$U_{\text{ск}}[\text{дБмкВ}] = U_{\max}[\text{дБмкВ}] + 10 \log_{10} \sum k_i^2 p_i,$$

где $k = (U_{i \text{ о.е.}} + U_{(i^{-1}) \text{ о.е.}}) / 2U_{\max \text{ о.е.}}$ — среднее относительное напряжение между уровнями (i^{-1}) и i ; $p_i = n_i / n_{\text{sin}}$ — относительное количество колебаний с амплитудой от $U_{(i^{-1}) \text{ о.е.}}$ до $U_{i \text{ о.е.}}$; n_{sin} — количество синусоидальных колебаний ПЧ $f_{\text{пч}}$ за время измерения T .

Второй член формулы определяется как коэффициент пиковости:

$$\text{КП} = \frac{U_{\max}}{U_c}.$$

Или в логарифмических единицах:

$$\text{КП} = 10 \log_{10} \sum k_i^2.$$

Величина U_{\max} (дБмкВ) имеет самостоятельное значение как пиковое напряжение. Коэффициент пиковости является мерой количества импульсных радиопомех и служит для определения мешающего действия полезного сигнала.

На рисунке 6 приведена гистограмма импульсного сигнала, полученного с анализатора амплитуд экспериментально. По оси абсцисс отложен уровень напряжения в относительных единицах, по оси ординат — вероятность пребывания напряжения на этом уровне.

Максимумы гистограммы 1, 2, 3 соответствуют медленным участкам отклика с выхода ИРП.

Для калибровки гистограммы по оси абсцисс подаётся известное синусоидальное напряжение U_{\max} , его гистограмма соответствует максимуму 4.



Рис. 6. Гистограмма импульсного сигнала

Полученная гистограмма подтверждает экспериментальные выводы о возможности измерения импульсных радиопомех с помощью АВР.

Выводы

На основании анализа и полученных экспериментальных результатов с использованием АВР и СП подтверждается возможность применения описанных в статье методов для измерения различных импульсных радиопомех.

Литература

1. Переверзев Л.А. Измерение спектральной плотности импульсов. М.: Изд-во стандартов. 1982. 99 с.
2. Переверзев Л.А., Хамадулин Э.Ф. Измерение спектральной плотности широкополосных радиопомех // Измерительная техника. 2005. № 1. С. 40–42.
3. Кечиев Л.Н., Балюк Н.В. Зарубежные военные стандарты в области ЭМС / под общ. ред. Л.Н. Кечиева. М.: Грифон, 2014.