

УДК 621.391.82

СИСТЕМНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ РАДИОПЕРЕДАТЧИКОВ СВЯЗИ И ВЕЩАНИЯ

Е.А. ПРЕТКЕЛЬ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 19 апреля 2010

Рассматривается определение системной характеристики электромагнитной совместимости радиопередатчиков связи и вещания. Дается алгоритм вычисления системной характеристики. Представляются результаты экспериментальных исследований системной характеристики цифровых радиотелекоммуникационных систем стандартов DVB-T и IEEE 802.11g.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, системная характеристика, электромагнитная обстановка, радиопередатчик.

Введение

При решении задач электромагнитной совместимости (ЭМС) радиосистем используется большое количество частных параметров и характеристик ЭМС-радиоприемников (РПР), радиопередатчиков (РПД) и антенн. Эти характеристики и параметры описывают отдельные свойства этих устройств, существенные с точки зрения опасности возникновения непреднамеренных помех и возможностей их предотвращения. В частности, для РПД к числу таких характеристик могут быть отнесены: характеристики и параметры огибающей спектра радиоизлучения в рабочей полосе радиочастот и за ее пределами, в частности, характеристики внеполосных, шумовых и побочных радиоизлучений (излучений на гармониках и субгармониках; излучений комбинационных, интермодуляционных, паразитных и т.п.) [1, 2].

По мере роста пространственной плотности радиосистем-источников и рецепторов электромагнитных излучений, с одной стороны, происходит усложнение электромагнитной обстановки как совокупности (ансамбля) электромагнитных полей, присутствующих в конкретной точке пространства; это связано с увеличением пространственной плотности источников. С другой стороны, одновременно происходит фактическое повышение восприимчивости среды обитания человека к воздействию электромагнитных полей в связи с увеличением пространственной плотности технических средств-рецепторов помех.

Таким образом, происходит постоянное усложнение условий эксплуатации радиосистем. Как результат — наблюдается тенденция к увеличению числа частных характеристик и параметров ЭМС-радиоустройств (РПР, РПД и антенн). При этом некоторые частные параметры ЭМС оказываются взаимно противоречивыми либо противоречивыми по отношению к основным (функциональным) параметрам радиосистем (мощность и занимаемая ширина полосы частот радиоизлучения, чувствительность и ширина полосы частот радиоприема, ширина и усиление главного лепестка ДН и т.п.): улучшение одного из них может ухудшить один или несколько других. И в целом увеличение числа частных параметров и характеристик ЭМС-радиооборудования приводит к усложнению и удорожанию полного цикла измерений совокупности этих параметров и характеристик в процессе производственного и сертификационного контроля качества промышленной продукции. При этом обладание результатами этих измерений часто не обеспечивает необходимого уровня объективности сравнительного анализа радиоустройств по критерию ЭМС.

Поэтому объективный сравнительный анализ по критерию ЭМС-радиооборудования (устройств, систем), предназначенного для эксплуатации в неопределенных (случайных, изменчивых) условиях, должен проводиться на системном уровне, позволяющем оценить реальную опасность проявлений тех или иных видов неидеальности радиооборудования в определенной радиоэлектронной либо электромагнитной обстановке.

В [3–5] предложены обобщенные системные параметры ЭМС радиотехнических устройств, отвечающие указанным требованиям. Однако применительно к радиопередатчикам конкретизация данного подхода до настоящего времени не произведена, как и экспериментальная оценка предложенного системного параметра ЭМС для радиопередатчиков конкретных радиослужб применительно к типовым условиям эксплуатации.

Цель данной работы — выполнение экспериментальных оценок предложенного в [3–5] обобщенного системного параметра ЭМС-радиопередатчиков (Q -параметра) систем цифрового телевидения и передачи данных.

Q -параметр ЭМС радиопередающих устройств (РПДУ)

Под РПДУ будем понимать систему, состоящую из РПД и передающей антенны. Основными функциями РПДУ являются следующие функции:

- формирование радиосигнала с требуемыми характеристиками (комплексным частотным спектром и энергетикой);
- передача этого радиосигнала в требуемом направлении с использованием передающей антенны, обеспечивающей излучение электромагнитного поля с требуемой направленностью и поляризацией.

С точки зрения ЭМС важнейшими характеристиками РПДУ являются:

- функция спектральной плотности мощности излучаемого радиосигнала (электромагнитного колебания) от частоты и времени $S(f,t)$, Вт/Гц;
- коэффициент усиления (направленного действия) G_A и нормированная характеристика пространственной избирательности (направленности) передающей антенны $K(\alpha, \varepsilon)$, а также нормированная характеристика ее поляризационной избирательности $K(\varphi)$ по отношению к радиоприемным устройствам (РПРУ) — возможным рецепторам помех.

Вокруг РПДУ образуется некоторая область потенциального мешающего взаимодействия (ОПМВ) радиуса R_{max} , размещенные в которой РПРУ, состоящие из РПР и приемной антенны, могут испытывать помехи от рассматриваемого РПДУ.

В частности, если ширина спектра излучения РПДУ существенно превышает ширину полосы приема РПРУ-рецепторов помех ΔF_R , то радиус ОПМВ будет определяться максимумом спектральной плотности мощности излучаемого радиосигнала и величиной G_A [5].

При равномерном случайном распределении точек размещения РПРУ в пределах ОПМВ с постоянной пространственной плотностью плотность распределения вероятностей (п.р.в.) удаленности РПРУ от рассматриваемого РПДУ $w(R)$ будет иметь следующий вид [3]:

$$w(R) = \frac{mR^{m-1}}{R_{max}^m}, \quad m=1,2,3, \quad (1)$$

параметр m характеризует тип пространственного размещения РПРУ в пределах ОПМВ: $m=1$ при линейном размещении источников, $m=2$ при территориальном размещении источников, $m=3$ при их объемном размещении.

В результате п.р.в. ППМ сигнала РПДУ в точках возможного размещения РПРУ будет иметь вид гиперболического распределения [6]

$$w \Pi = \frac{m\Pi_{min}^{m/v}}{\nu\Pi^{m+v/\nu}}; \quad \Pi \geq \Pi_{min}, \quad (2)$$

где ν –параметр, определяемый условиями распространения радиоволн (РРВ) от РПДУ к РПРУ; при свободном РРВ $\nu=2$, при РРВ с учетом отражения от подстилающей поверхности $\nu=3,5-4$.

При заданной плотности $w(\alpha, \varepsilon, \varphi, f) = w(\alpha, \varepsilon, \varphi) \cdot w(f)$ распределения вероятностей РПРУ по параметрам направления $\{\alpha, \varepsilon\}$, поляризации φ и частоте f радиоприема по отношению к сигналу РПДУ вероятность $v_e(\alpha, \varepsilon, \varphi, f)$ того, что на входе произвольно выбранного РПРУ сигнал РПДУ превысит порог восприимчивости Π_{min} , а также среднее число N_{int} РПРУ в ОПМВ, для которых входной сигнал РПДУ будет выше порога Π_{min} , будет определяться соотношениями:

$$v_e(\alpha, \varepsilon, \varphi, f) = \int_{(\alpha)} \int_{(\varepsilon)} \int_{(\varphi)} \int_{(f)} w(\alpha, \varepsilon, \varphi, f) \int_{\Pi_{min}/S_n}^{\infty} w(\Pi) d\Pi df d\alpha d\varepsilon d\varphi =$$

$$= \int_{(\alpha)} \int_{(\varepsilon)} \int_{(\varphi)} \int_{(f)} S_n^{\frac{m}{v}} f K^{\frac{m}{v}}(\alpha, \varepsilon, \varphi) w(\alpha, \varepsilon, \varphi, f) df d\alpha d\varepsilon d\varphi = \frac{N_{int}}{N_{\Sigma}}, \quad (3)$$

$$N_{int} = N_{\Sigma} v_e(\alpha, \varepsilon, \varphi, f) = N_{\Sigma} \int_{(\alpha)} \int_{(\varepsilon)} \int_{(\varphi)} \int_{(f)} S_n^{\frac{m}{v}} f K^{\frac{m}{v}}(\alpha, \varepsilon, \varphi) w(\alpha, \varepsilon, \varphi, f) df d\alpha d\varepsilon d\varphi,$$

где $K(\alpha, \varepsilon, \varphi)$ — нормированная характеристика избирательности антенны РПДУ, $S_n(f)$ — нормированная спектральная плотность мощности выходного сигнала РПДУ

Очевидно, что всегда можно предположить столь сложную ситуацию в ОПМВ, в которой любой сколь угодно совершенный РПДУ будет создавать помеху размещенным в этой области РПРУ. Поэтому целесообразно нормировать способность РПДУ формировать радиоизлучение с такими характеристиками, при которых нормальное функционирование РПДУ в ОПМВ возможно с некоторой допустимой вероятностью. При этом желательно, чтобы эта нормируемая характеристика РПДУ обладала следующими свойствами:

- была инвариантна к сложности ситуации в ОПМВ (среднему числу РПРУ в пределах ОПМВ),
- определялась базовыми физическими свойствами РПДУ (спектральные характеристики, характеристики направленности и поляризация электромагнитного излучения),
- зависела от базовых статистических характеристик ситуации в ОПМВ – распределения вероятностей энергетического параметра сигнала РПДУ в произвольной точке ОПМВ, распределения вероятностей координат РПРУ по отношению к точке размещения РПДУ, а также распределения вероятностей настройки РПРУ по частоте и поляризации.

Такой нормированной характеристикой, которая может быть принята в качестве системного параметра ЭМС РПДУ, может быть принято относительное среднее число РПРУ, на входе которых сигнал РПДУ по уровню превышает порог Π_{min} [4, 5]:

$$Q_{RTRS} = \frac{N_{int}}{N_{\Sigma}} = \int_{(\alpha)} \int_{(\varepsilon)} \int_{(\varphi)} \int_{(f)} S_n^{\frac{m}{v}} f K^{\frac{m}{v}}(\alpha, \varepsilon, \varphi) w(\alpha, \varepsilon, \varphi, f) df d\alpha d\varepsilon d\varphi = Q_{ATR} Q_{RTR},$$

$$Q_{ATR} = \frac{N_{out ATR}}{N_{\Sigma}} = \int_{(\alpha)} \int_{(\varepsilon)} \int_{(\varphi)} K^{\frac{m}{v}}(\alpha, \varepsilon, \varphi) w(\alpha, \varepsilon, \varphi) d\alpha d\varepsilon d\varphi, \quad (4)$$

$$Q_{RTR} = \frac{N_{int}}{N_{out ATR}} = \int_{(f)} S_n^{\frac{m}{v}} f w(f) df,$$

где Q_{ATR} – системный параметр ЭМС передающей антенны; Q_{RTR} – системный параметр ЭМС РПДУ; $N_{out ATR}$ – среднее число РПРУ в ОПМВ из общего числа N_{Σ} , на входе которых сигнал РПДУ в полосе радиоприема $\Delta F_R \approx \Delta F_{NR}$ по уровню превышает порог Π_{min} .

Декомпозиция $Q_{RTRS} = Q_{ATR} Q_{RTR}$ системного параметра ЭМС РПДУ возможна в силу того, что в РПДУ практически во всех случаях формирование характеристики электромагнитного излучения в частотной области осуществляется радиопередатчиком, а его направленность и поляризационные свойства формируются передающей антенной. Распределение вероятностей настройки РПРУ в пределах ОПМВ и распределение вероятностей направлений от РПДУ на случайно расположенные РПРУ, а также распределение вероятностей поляризационной настройки РПРУ могут считаться независимыми. Поэтому системный параметр ЭМС РПДУ может быть представлен как произведение обобщенных системных параметров ЭМС-радиопередатчика Q_{RTR} и передающей антенны Q_{ATR} .

Экспериментальная оценка Q-параметра радиопередатчика

Для оценки QRTR необходимо измерить спектральную плотность мощности в некоторой достаточно широкой полосе частот, охватывающей основную и побочные составляющие спектра выходного сигнала. В качестве имитатора сигнала радиопередатчика использован генератор Agilent E4438C, обеспечивающий возможность генерации типовых радиосигналов целого ряда цифровых радиотелекоммуникационных систем. Имитация, регистрация и обработка результатов исследований спектральной плотности мощности радиосигналов в заданной полосе частот производились с использованием измерительной установки, изображенной на рис. 1.

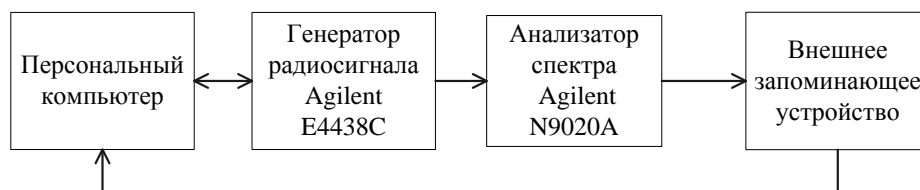


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Экспериментальная оценка параметра Q_{RTR} производилась для сигналов радиопередатчиков, используемых в системах стандартов IEEE 802.11g и DVB-T. Оценка выполнялась в следующем порядке:

- 1) программно-управляемая имитация сигнала выбранного типа с использованием программного обеспечения Agilent Technologies Signal Studio Software;
- 2) вычисление с помощью анализатора спектра среднеквадратического значения каждого из отсчетов наблюдаемого спектра по следующей формуле:

$$P_{rms} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} X_i^2, U_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} X_i^2}, \quad (5)$$

где X_i — мгновенное значение; n — количество усреднений ($n=10; 1000$);

- 3) формирование табличного файла данных о дискретной модели энергетического спектра анализируемого сигнала, содержащей M отсчетов, усредняемых по n реализаций;

- 4) нормирование полученной дискретной модели спектра. Используются 2 варианта нормирования:

- а) нормировка энергетического спектра (спектральной плотности мощности (СПМ)) относительно ее максимума;

- б) нормировка энергетического спектра (СПМ) относительно средней спектральной плотности мощности в рабочей полосе частот (рабочая полоса частот определялась по уровню минус 3дБ);

- 5) вычисление Q_{RTR} по следующей формуле:

$$Q_{RTR} = \frac{1}{f_{max} - f_{min}} \int_{f_{min}}^{f_{max}} S_{norm}^{m/v}(f) df, \quad (6)$$

где m/v —условия формирования ЭМО ($m/v=1$ при территориальном размещении РЭС, свободном РРВ; $m/v=1/2$ при территориальном размещении РЭС, интерференционном РРВ); S_{norm} — нормированная СПМ.

В данной работе имитировались сигналы таких цифровых радиотелекоммуникационных систем, как системы стандартов DVB-T и IEEE 802.11g. Для дальнейшего экспериментального исследования и расчета Q-параметров для каждой системы были получены выборки $L=10; 1000$ частотных спектров с учетом усреднения.

Результаты экспериментальных исследований Q-параметра радиопередатчиков системы вещания стандарта DVB-T

При исследовании частотного спектра сигналов системы DVB-T находилось среднеквадратическое значение спектра с количеством усреднений $n=10$ и $n=1000$ в диапазоне частот

470–510 МГц. Результаты экспериментальных исследований Q-параметра сигналов системы DVB-T с переменными: неиерархическим/неиерархическим режимом модуляции, видом модуляции несущих группового сигнала, относительной длительностью защитного интервала, представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Значения Q-параметра при нормировке СПМ относительно средней СПМ в рабочей полосе частот при $n=10$ в неиерархическом режиме

Условия формирования ЭМО	Режим модуляции	Вид модуляции несущих группового сигнала	Относительная длительность защитного интервала			
			1/32	1/16	1/8	1/4
$m/v=1$	2К	16-QAM	0,2004	0,2004	0,2004	0,2004
		64-QAM	0,2004	0,2005	0,2004	0,2003
		QPSK	0,1998	0,2004	0,2003	0,2004
	8К	16-QAM	0,2004	0,2003	0,2003	0,2003
		64-QAM	0,2002	0,2004	0,2004	0,2089
		QPSK	0,2005	0,2004	0,2003	0,2004
$m/v=1/2$	2К	16-QAM	0,2011	0,2013	0,2028	0,201
		64-QAM	0,2013	0,201	0,201	0,2014
		QPSK	0,201	0,2012	0,201	0,2013
	8К	16-QAM	0,2012	0,2008	0,2011	0,2012
		64-QAM	0,2007	0,2016	0,2005	0,2015
		QPSK	0,2013	0,2011	0,2008	0,2012

Таблица 2. Значения Q-параметра при нормировке СПМ относительно средней СПМ в рабочей полосе частот при $n=10$ в иерархическом режиме

Условия формирования ЭМО	Режим модуляции	Вид модуляции несущих группового сигнала	Относительная длительность защитного интервала			
			1/32	1/16	1/8	1/4
$m/v=1$	2К	16-QAM	0,2003	0,2004	0,2009	0,2003
		64-QAM	0,2003	0,2005	0,2004	0,2004
	8К	16-QAM	0,2004	0,2004	0,2009	0,2003
		64-QAM	0,2004	0,2004	0,2005	0,2003
$m/v=1/2$	2К	16-QAM	0,2009	0,2008	0,2012	0,2009
		64-QAM	0,2012	0,2015	0,2007	0,2012
	8К	16-QAM	0,2016	0,2011	0,2014	0,2009
		64-QAM	0,2013	0,2013	0,2011	0,1995

Результаты экспериментальных исследований Q-параметра сигналов системы DVB-T с постоянным неиерархическим режимом модуляции 2К и переменными: видом модуляции несущих группового сигнала, относительной скоростью сверточного кода представлены в табл. 3.

Таблица 3. Значения Q-параметра при нормировке СПМ относительно средней СПМ в рабочей полосе частот при $n=1000$

Условия формирования ЭМО	Вид модуляции несущих группового сигнала	Относительная скорость сверточного кода				
		1/2	2/3	3/4	5/6	7/8
$m/v=1$	16-QAM	0,1897	0,1897	0,1899	0,1897	0,1899
	64-QAM	0,1898	0,1895	0,1899	0,1896	0,1894
	QPSK	0,1893	0,1899	0,1896	0,1894	0,1895
$m/v=1/2$	16-QAM	0,1966	0,1966	0,1967	0,1966	0,1967
	64-QAM	0,1967	0,1965	0,1966	0,1966	0,1965
	QPSK	0,1964	0,1966	0,1964	0,1964	0,1966

Результаты экспериментальных исследований Q-параметра системы стандарта IEEE 802.11g

При исследовании частотного спектра сигналов системы стандарта IEEE 802.11g находилось среднеквадратическое значение спектра с количеством усреднений $n=10$ в диапазоне частот 2,39–2,44 ГГц. Результаты экспериментальных исследований Q-параметра сигналов системы стандарта IEEE 802.11g с переменными скоростями потока в режиме OFDM представлены в табл. 4.

Таблица 4. Значения Q-параметра при нормировке СПМ относительно средней СПМ в рабочей полосе частот при $n=10$

Условия формирования ЭМО	Тип фильтра	Скорость потока, Мбит/с							
		6	9	12	18	24	36	48	54
$m/v=1$	Нет	0,3634	0,3633	0,3631	0,3634	0,3627	0,3628	0,3631	0,3629
	Гауссовский	0,3615	0,3616	0,3613	0,3614	0,3613	0,3627	0,3614	0,3612
	Идеальный ФНЧ	0,3215	0,3618	0,3616	0,3619	0,3617	0,3616	0,3616	0,3616
	RRC	0,3622	0,3623	0,362	0,3622	0,3607	0,362	0,3601	0,3619
$m/v=1/2$	Нет	0,3832	0,3822	0,3797	0,3818	0,3796	0,3797	0,3805	0,3811
	Гауссовский	0,3662	0,3664	0,3662	0,364	0,3645	0,3643	0,3775	0,3644
	Идеальный ФНЧ	0,3662	0,3664	0,3662	0,364	0,3645	0,3643	0,3775	0,3644
	RRC	0,3723	0,3719	0,3713	0,3723	0,3724	0,3712	0,37	0,3705

Результаты экспериментальных исследований Q-параметра сигналов системы стандарта IEEE 802.11g с переменными скоростями потока в режиме DSSS представлены в табл. 5.

Таблица 5. Значения Q-параметра при нормировке СПМ относительно средней СПМ в рабочей полосе частот при $n=10$

Условия формирования ЭМО	Тип фильтра	Скорость потока, Мбит/с					
		1	2	5,5	11	22	33
$m/v=1$	Гауссовский	0,1898	0,1878	0,1929	0,1881	0,1913	0,1993
	Идеальный ФНЧ	0,2073	0,2055	0,2077	0,2017	0,2132	0,2047
	RRC	0,225	0,2242	0,2264	0,2302	0,2265	0,2286
$m/v=1/2$	Гауссовский	0,2449	0,2438	0,2495	0,2454	0,2477	0,2547
	Идеальный ФНЧ	0,2344	0,2336	0,2376	0,2345	0,2414	0,2345
	RRC	0,2678	0,2682	0,272	0,2736	0,2725	0,2737

В целом из анализа соотношения (6) и полученных экспериментальных данных можно сделать вывод, что Q-параметр зависит от вида и параметров модуляции исследуемых сигналов в той мере, в какой они определяют степень прямоугольности огибающей СПМ-сигнала и относительный уровень нежелательных составляющих его СПМ вне рабочей полосы частот. Для сигналов стандарта DVB-T полученные значения Q-параметра лежат в пределах 0,1998–0,2009 при количестве усреднений, равном 10, и в пределах 0,1893–0,1899 при количестве усреднений, равном 1000. Для сигналов стандарта IEEE 802.11g полученные значения Q-параметра лежат в пределах 0,3215–0,3634 в режиме модуляции OFDM и в пределах 0,1878–0,2286 в режиме модуляции DSSS. С другой стороны, Q-параметр сигналов исследованных типов слабо зависит от параметров их модуляции, таких как режим модуляции, вид модуляции несущих группового сигнала, относительная длительность защитного интервала, скорость передачи информации в радиоканале. Это, в частности, иллюстрируется графиками для сигнала системы стандарта IEEE 802.11g на рис. 2. Для сигнала данного стандарта при использовании RRC-фильтра Q-параметр максимален вне зависимости от условий формирования ЭМО.

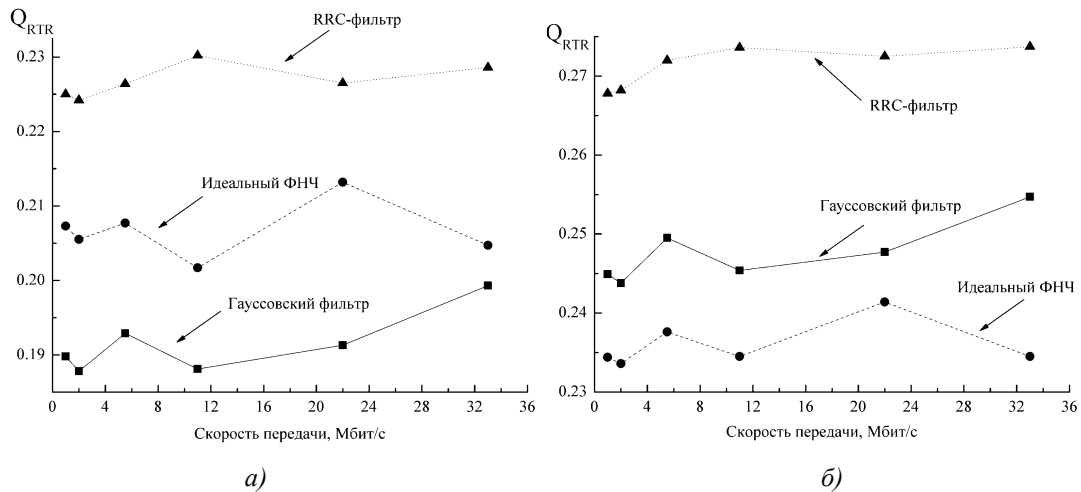


Рис. 2. Значения Q -параметра при нормировке СПМ относительно средней СПМ в рабочей полосе частот при $n=10$ в режиме DSSS: a — $m/v=1$; b — $m/v=1/2$

Заключение

Результаты, полученные в данной работе, свидетельствуют о следующем.

1. Экспериментальные оценки Q -параметров принципиально реализуемы и могут быть в значительной мере автоматизированы, поскольку программное обеспечение современных средств измерений (анализатор спектра, измерительные радиоприемники) обладает необходимыми опциями и возможностями программирования всего процесса измерений.

2. Основной вклад в значение Q -параметра вносит основная часть спектра излучения, совокупный вклад нежелательных излучений для принятого класса ситуаций (равномерное распределение вероятностей случайного значения частоты приема рецептора помех в полосе анализа спектра передатчика) составляет менее 1%. Для другого распространенного класса ситуаций, когда весь частотный диапазон разделен на частотные каналы равной ширины (телевидение, радиовещание, сотовая связь и т.п.), и воздействие основным излучением радиопередатчика по основному каналу приемника может быть исключено методами частотного планирования, определение Q -параметра может быть уточнено. В качестве обобщенного параметра электромагнитной совместимости радиопередатчика в таких условиях, характеризующего его способность создавать помехи нежелательными излучениями, может быть принята величина, являющаяся разностью между Q -параметром, полученным интегрированием в широкой полосе частот, и Q -параметром, полученным на основе интегрирования по полосе частот основного излучения:

$$Q' = Q_{RTR} - Q_{OI} = \int_{f_{\min}}^{f_{\max}} S_n^{m/v}(f)w(f)df - \int_{\Delta f} S_n^{m/v}(f)w(f)df \quad (7)$$

SYSTEM CHARACTERISTIC OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF COMMUNICATION AND BROADCASTING RADIOTRANSMITTERS

E.A. PRETKEL

Abstract

Definition of experimental estimates of system characteristic of electromagnetic compatibility of communication and broadcasting radiotransmitters is considered. The computational algorithm of system characteristic is given. The results of experimental investigations of system characteristic of DVB-T and IEEE 802.11g standards of digital radiotelecommunication systems are represented.

Литература

1. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. Составитель *Д.Р.Ж. Уайт Джермантаун*, Вып. 1. Общие вопросы ЭМС. Межсистемные помехи. М., 1977.
2. *Петровский В.И., Седельников Ю.Е.* Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. М., 1986.
3. *Мордачев В.И.* // Тр. IX Междунар. Вроцлавского симпозиума по электромагнитной совместимости. Вроцлав, 1988. С. 571–576.
4. *Мордачев В.И.* // Тр. Междунар. конф. EMCS-93 "Методы и средства проектирования и сертификации изделий радиоэлектроники, вычислительной техники и связи по критериям помехозащищенности, восприимчивости и электромагнитной совместимости", Минск, 1993. С. 90–94.
5. *V.I.Mordachev.* // Proc. of the Int. conf. on metrology and measurement "ICMM 2007". Vol. 2, Beijing, September 5–7, 2007. P. 57–66.
6. *Мордачев В.И.* Системная экология сотовой радиосвязи. Минск, 2009.