

## **Анализ требований к оборудованию радиоконтроля при мониторинге радиочастотного спектра для оценки электромагнитной совместимости**

*Б. М. Антипин, Е. М. Виноградов*

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Одной из задач, решаемых радиоконтролем, является задача обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоэлектронных средств (РЭС). На этапе эксплуатации РЭС эту задачу радиоконтроль решает посредством измерения параметров излучений и определения местоположения излучателей и сравнения измеренных значений параметров с разрешенными, представленными в базе данных частотных присвоений и РЭС. Однако первым этапом решения этой задачи, на котором должен принимать участие радиоконтроль, является этап частотно-территориального планирования размещения РЭС. На этом этапе радиоконтроль должен предоставлять информацию об электромагнитной обстановке (ЭМО) в местах предполагаемого размещения антенных систем новых РЭС, которая позволит оценить качество функционирования РЭС, содержащих радиоприемные устройства, в этих местах. Описание ЭМО должно содержать сведения о частотах, на которых обнаружены излучения, значения напряженности поля и ширины спектра излучений на этих частотах, а также информацию о внешнем фоне [1, 2]. В докладе проведен анализ характеристик радиоконтрольного измерительного оборудования с точки зрения их влияния на качество оценки ЭМС РЭС.

Напряженность поля является объективной характеристикой электромагнитного поля, не зависящей от приемной аппаратуры. Однако уровень сигнала на входе приемника, по которому определяется значение напряженности поля, зависит от коэффициента преобразования напряженности поля в напряжение на нагрузке антенны (антенного фактора), потерь в антенно-фидерном тракте (АФТ) и степени согласования антенно-фидерного тракта с антенной и входом измерительного приемника или анализатора спектра. Кроме того, на значение напряженности поля, получаемое по результатам измерения уровня сигнала на входе приемника, влияет также погрешность измерения этого уровня. Высокая точность измерения напряженности поля позволяет при использовании измеренного значения для оценки ЭМС провести более качественный анализ совместимости. Погрешность измерения напряженности электромагнитного поля определяет погрешность оценки отношения сигнал/помеха и уровней мешающих сигналов, которые, в свою очередь, определяют качество работы РЭС, а следовательно, и ЭМС РЭС в анализируемой ЭМО. И если для аналоговых систем, например систем передачи речи, небольшая погрешность в оценке отношения сигнал/помеха, когда помеха действует по линейным каналам приема, приводит к относительно небольшой погрешности в оценке качества приема речи (разборчивости или индекса артикуляции), то для цифровых систем зависимость качества работы от отношения сигнал/помеха носит пороговый характер, и небольшие погрешности в его оценке могут привести к неправильным выводам относительно наличия или отсутствия ЭМС. Более сложная зависимость между погрешностью измерения напряженности поля и погрешностью в оценке качества работы

РЭС имеет место в случае нелинейных эффектов в приемнике, вызванных помехой, когда небольшие погрешности в оценке уровня мешающего сигнала могут приводить к значительным погрешностям в оценке качества работы даже аналоговых РЭС.

В Положении о единой технической политике (ЕТП) предприятий радиотехнической службы [3] установлено требование к погрешности измерения напряженности поля  $\pm 3$  дБ. При этом погрешность измерения уровня немодулированного радиосигнала на частотах выше 30 МГц при отношении сигнал/шум не менее 20 дБ установлена в пределах  $\pm 2$  дБ, а погрешности определения антенного фактора и потерь в АФТ не указаны. Учитывая, что на практике погрешность определения антенного фактора может превышать 1 дБ и такого же порядка может быть погрешность определения потерь в АФТ, получить требуемую погрешность измерения напряженности поля достаточно трудно, а при наличии атмосферных или других внешних помех практически невозможно. Поэтому требование к погрешности измерения напряженности поля, представленное в [3], можно рассматривать как достаточно жесткое и трудно достижимое.

Достоверность информации, получаемой средствами радиоконтроля, которая может быть использована для оценки ЭМС, зависит от технических параметров измерительной аппаратуры, в первую очередь измерительных приемников и анализаторов спектра, а также от условий, в которых выполняются измерения.

Измерительные приемники должны обладать высокой линейностью и большим динамическим диапазоном по основному каналу приема (ОКП). Но и при этом внешняя ЭМО может влиять на результаты измерений.

Обращаясь снова к Положению о ЕТП, заметим, что параметрами, представленными в этом документе, которые определяют линейность приемной аппаратуры, являются точки пересечения по интермодуляции второго и третьего порядка, отнесенные к входу приемника. Точка пересечения третьего порядка, отнесенная к входу приемника,  $IP_3$ , в [3] установлена +10 дБм. Учитывая, что она обычно находится на 10–15 дБ выше точки компрессии 1 дБ,  $P_{1дБ}$ , можно найти, что в большинстве случаев для измерительных приемников  $P_{1дБ} \geq -5$  дБм. Чувствительность приемника зависит от используемой ширины полосы ОКП,  $BW$ . Уровень собственного шума приемника

$$N[\text{дБм}] = -174 + 10\lg(BW[\text{Гц}]) + NF \quad (1)$$

где  $NF$  – коэффициент шума приемника, дБ.

Поскольку согласно [3]  $NF = 12$  дБ, то (1) приобретает вид

$$N[\text{дБм}] = -162 + 10\lg(BW[\text{Гц}]) \quad (2)$$

Отсюда при  $BW = 25$  кГц  $N = -118$  дБм, а при  $BW = 1$  МГц  $N = -102$  дБм.

Если чувствительность приемника  $P_R$  определяется при отношении сигнал/шум на выходе приемника  $S/N = 12$  дБ, то поскольку  $P_R = N - (S/N)$ , она будет составлять  $P_R = -108$  дБм при  $BW = 25$  кГц и  $P_R = -90$  дБм при  $BW = 1$  МГц. Отсюда, в рассматриваемых условиях, динамический диапазон по ОКП

$$D_{\text{ОКП}} = P_{1дБ} - P_R$$

будет колебаться от  $D_{\text{ОКП}} = -5 + 108 = 103$  дБ при  $BW = 25$  кГц до  $D_{\text{ОКП}} = -5 + 90 = 85$  дБ при  $BW = 1$  МГц.

Учитывая высокие требования к подавлению побочных каналов приема (80 дБ для каналов зеркальных и промежуточных частот), можно сделать вывод, что измерительный приемник, удовлетворяющий требованиям Положения о ЕТП, обеспечивает измерение уровней сигналов в широком диапазоне их изменений при отсутствии помех за пределами ОКП. Тем не менее, наличие мощных излучений в месте измерений может привести к ошибкам в определении их уровней и соответственно к ошибкам в оценке напряженности поля от этих источников. В этих случаях необходимо обеспечить определенную удаленность измерительной антенны от антенны источника излучений, чтобы получить уровень измеряемого сигнала в пределах динамического диапазона ОКП приемника.

Например, если антенна измерительного приемника располагается на высоте  $h_R = 10$  м, а антенна передатчика на высоте  $h_T = 30$  м, то, используя модифицированную модель Хата для частоты  $f = 1000$  МГц, можно получить, что развязка между антеннами составит, дБ:

$$\text{для города } L_{\text{грд}} = 105.7 + 35.2 \lg(d)$$

$$\text{для пригорода } L_{\text{пгрд}} = 95.5 + 35.2 \lg(d),$$

где  $d$  – расстояние между антеннами, км.

Отсюда, полагая развязку равной 60 дБ, найдем, что для городских условий расстояние между антеннами должно составлять  $d = 50$  м, а для пригорода  $d = 98$  м. Если коэффициент усиления приемной антенны равен 0 дБи и можно пренебречь потерями в антенно-фидерном тракте, то для передатчика с эффективной изотропно излучаемой мощностью  $P_T = 40$  дБм уровень сигнала  $S$  на входе приемника на указанных расстояниях будет:

$$S = P_T - 60 = -20 \text{ дБм}$$

Этот уровень лежит ниже верхней границы динамического диапазона по ОКП (–5 дБм), и при измерениях недопустимые искажения отсутствуют. Однако, если данный сигнал не находится на частоте настройки приемника, но лежит в полосе преселектора, то он может создать помеху работе приемника и привести к ошибкам в результатах измерений, в частности, за счет переноса шумов гетеродина.

В [3] С увеличением отстройки этот уровень падает и скорость падения может составлять 20 дБ/дек, так что при отстройке 100 кГц спектральная плотность фазового шума может составлять уже –120 дБн/Гц. Однако можно легко убедиться, что помеха указанного выше уровня  $I = -20$  дБм, поступающая на смеситель, даже при полосе  $BW = 25$  кГц при отстройке 100 кГц существенно снизит качество работы приемника вследствие эффекта переноса шумов гетеродина, приращение которых составит

$$\Delta N = I + L_N + 20 \lg(BW[\text{Гц}]) = -20 - 120 + 20 \lg(25 \cdot 10^3) = -96 \text{ дБм},$$

что на 12 дБ выше собственного шума приемника. Отсюда, в частности, следует, что требования к фазовому шуму приемника можно сделать более жесткими, чтобы уменьшить количество ситуаций, в которых будет проявляться рассмотренный выше эффект. Если обратиться к Справочнику по радиоконтролю, изданному МСЭ в 2011г. [4], то в нем отсутствуют конкретные цифры, определяющие уровень фазового шума гетеродина измерительного приемника для радиоконтроля. Просто отмечается, что требования к

фазовому шуму определяются видом сигналов, которые должны контролироваться, хотя в более ранних изданиях Справочника указывались цифры, совпадающие с цифрами, приведенными в Положении о ЕТП.

Что касается интермодуляционных искажений, то опасные интермодуляционные продукты появляются только при больших уровнях мешающих сигналов. В частности, если два мешающих сигнала имеют одинаковые уровни  $I = -20$  дБм, то значение интермодуляционного продукта третьего порядка  $PIM3$  составит

$$PIM3 = 3 I - 2 IP3 = 3(-20) - 2 \cdot 10 = -80 \text{ дБм},$$

что значительно превышает чувствительность приемника. Однако вероятность такой ситуации мала, и если, например, частота интермодуляционного продукта  $f_{им} = 2f_1 - f_2$ , а мощности мешающих сигналов, образующих этот продукт, еще значительны и составляют соответственно  $I_1 = -35$  дБм,  $I_2 = -20$  дБм, то

$$PIM3 = 2 I_1 + I_2 - 2 IP3 = 2(-35) + (-20) - 2 \cdot 10 = -110 \text{ дБм},$$

что уже ниже чувствительности приемника.

Таким образом, проведенный анализ требований к техническим характеристикам измерительной аппаратуры, используемой для решения задач радиоконтроля, показывает, что характеристики аппаратуры в целом позволяют получать результаты измерений, которые могут быть использованы для анализа ЭМС. Более жесткие требования можно предъявить только к спектральной плотности фазового шума гетеродина. При наличии мощных излучений в окрестности предполагаемого размещения РЭС с целью проведения измерений, необходимых для анализа ЭМС, места проведения измерений следует выбирать, учитывая характеристики измерительной аппаратуры.

#### Литература

1. Б. М. Антипин, Е. М. Виноградов. Оценка электромагнитной совместимости по результатам радиоконтроля.– Известия вузов России. Радиоэлектроника, вып.6, 2012, с.97–104.
2. Б. М. Антипин, Е. М. Виноградов. Алгоритм оценки электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств.– Известия вузов России. Радиоэлектроника, вып.1, 2013, с.102–110.
3. Положение о единой технической политике предприятий радиотехнической службы. Приложение к приказу Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций от 19 декабря 2011г. №1131.
4. Handbook. Spectrum Monitoring, ITU, 2011.