

**Особенности оценки неопределенности при измерении  
нежелательных радиоизлучений**

Козынюк М.В., Сицко Н.Ю,  
УП «ГИПРОСВЯЗЬ»

В настоящее время наблюдаются активные процессы в мире по интеграции мирового сообщества не только в культурной, экономической, политической, но и в производственной и научной сферах. Эти процессы получили название глобализации. Обмен опытом, результатами исследований, технической информацией является неотъемлемой частью дальнейшего научно-технического прогресса. Актуальной проблемой при проведении измерений, экспериментов, опытов является получение универсальной, единой оценки результатов, насколько точно и достоверно эти результаты получены. Не менее важно наличие возможности сравнивать аналогичные данные, полученные в различных лабораториях. В качестве такой характеристики применяется понятие «неопределенность». Требования по оценке неопределенности в аккредитованных лабораториях, с принятием стандарта ИСО/МЭК 17025 1999 [1], стали международными.

Под понятием неопределенности принято рассматривать стандартное (среднеквадратичное) отклонение измеряемой величины. Несмотря на кажущуюся простоту в оценке неопределенности возникает целый ряд нюансов в каждой области измерения физических параметров. Область измерения параметров ВЧ электромагнитного сигнала не стала исключением.

Цель данной статьи заключается в актуализации проблем, связанных с оценкой неопределенности измерения, возникающие при измерении спектральных составляющих высокочастотного (ВЧ) электромагнитного сигнала, и предложении методов по их решению. На примере измерения побочных и внеполосных излучений от абонентских аппаратов сети GSM 900 приведена количественная оценка неопределенности.

Для сигналов радиодиапазона, особенно для ВЧ области диапазона, характерно большое изменение уровня мощности сигнала и его спектральных составляющих в процессе генерации электромагнитной волны, в процессе распространения. Так,

например, если на антенном разьеме излучаемая мощность составляет величину порядков единиц Ватт, то на удалении от источника излучения на расстоянии нескольких сот метров уровень мощности принимаемого сигнала уменьшается в миллионы раз и измеряется в мкВт. Для удобной работы с малыми и большими величинами одновременно, общепринято в науке и технике применять логарифмические величины дБВт (децибел относительно 1 Ватта), дБмВт (децибел относительно 1 миллиВатта). Большинство тестовой аппаратуры и приборов, предназначенных для измерения параметров ВЧ электромагнитного сигнала, характеризуются логарифмическими величинами. В документах [1-3] указано, что следует придерживаться единиц СИ, но ничего не сказано о логарифмических величинах. В том же документе приводятся примеры по оценке неопределенности измерения в линейных величинах. Таким образом, можно выделить принципиальную проблему, от которой будет зависеть результат оценки неопределенности – относительно каких величин, линейных или логарифмических, следует составлять математическую формулу измерения?

В документе [4], где рассматривается калибровка ВЧ коаксиального аттенюатора, проблема рассматривается в «лоб». Записывается формула в логарифмических величинах (дБ, дБВт) в виде

$$P = P_1 + A_1 + A_2 + \dots A_N, \quad (1)$$

где  $P$  – результат измерения,  $P_1$  – наблюдаемая величина,  $A_1 + A_2 + \dots A_N$  – параметры измерения и источников неопределенности,  $N$  – количество рассматриваемых параметров.

Затем составляется бюджет неопределенности, где коэффициенты чувствительности равны 1, рассчитывается стандартная неопределенность исходя из функций распределения для линейных величин. Такой подход позволяет быстро оценить суммарную стандартную неопределенность, значение которой не отличаются от оценки в линейных величинах, если стандартная неопределенность составляет порядок десятых долей дБ. При больших значениях стандартной неопределенности эта оценка будет завышена, что можно показать на примере неравенства, не вдаваясь в строгие математические выкладки

$$(1 + \alpha)^{\pm k} \geq (1 \pm k\alpha), \quad (2)$$

где  $\alpha = u_c/P$  – доля отклонения величины,  $u_c$  – суммарное стандартная неопределенность (линейная величина),  $P$  – результат измерения (линейная величина),  $k > 1$  – коэффициент охвата.

В статье [5] проводится пример расчета неопределенности при калибровке антенных характеристик. В данной статье математическая модель измерения записывалась в виде

$$P = 10 \lg P_1 + 10 \lg A_1 + 10 \lg A_2 + \dots + 10 \lg A_N. \quad (3)$$

где  $P$  – результат измерения,  $P_1$  – наблюдаемая величина,  $A_1 + A_2 + \dots + A_N$  – параметры измерения и источников неопределенности,  $N$  – количество рассматриваемых параметров

В этом случае требуется провести дополнительно анализ на возможность линейной аппроксимации, т.е. оценить степень влияния старших производных на вклад  $i$ -ой величины в оценку стандартной неопределенности измеряемой величины. Принято рассматривать разложение функции в ряд Тейлора

$$c_{i,1} = \frac{\partial}{\partial A_i} P = \frac{10}{A_i \ln 10}, \quad (4)$$

$$c_{i,2} = \frac{\partial^2}{\partial A_i^2} P = -\frac{10}{A_i^2 \ln 10}, \quad (5)$$

$$u_i(P) = c_{i,1} u(A_i) + c_{i,2} \frac{u^2(A_i)}{2!} + \dots, \quad (6)$$

где  $u(A_i)$  – стандартная неопределенность  $A_i$  величины,  $u_i(P)$  – вклад  $A_i$  величины в суммарную стандартную неопределенность измеряемой величины  $P$ .

Расчет расширенной неопределенности приводит также к завышению значений, носящий характер зависимости вида (2). Помимо этого возникают трудности с определением  $u(A_i)$ , поскольку принято указывать на характеристики прибора предельную допустимую погрешность в виде  $\pm a$  (дБ). Решение такой задачи является далеко нетривиальным.

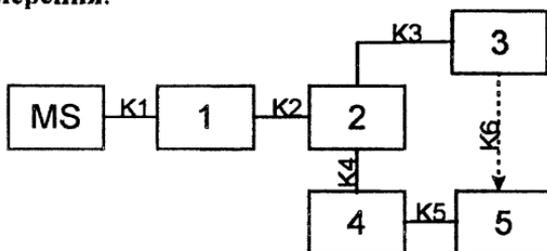
Наиболее точным подходом является представление формулы в линейных величинах. В этом случае при оценке неопределенности необходимо при определении вклада  $i$ -ой величины в стандартную неопределенность измеряемой величины рассматривать физические процессы поэтапно. Проблемы перехода от логарифмических погрешностей к линейным и определения

функции распределения остаются. Решение этих проблем требует от испытателя хорошее владение математическим аппаратом, глубокие познания в происходящих физических процессах в образце и средствах измерения, значительных временных затрат.

Среди указанных способов к оценке неопределенности можно предположить, что подход, предложенный в [4], более предпочтителен по отношению к остальным с точки зрения быстроты и простоты проведения оценки, но дает завышенную оценку неопределенности. Для измерений в области высоких частот указанный недостаток не является критическим. В международных стандартах к проведению измерений приводятся большие допуски на неопределенность, например в стандарте ETS 300-607 неопределенность измерения мощности электромагнитного сигнала по кабелю составляет  $\pm 3$  дБ, а по эфиру –  $\pm 6$  дБ.

В качестве примера рассмотрим измерения побочных излучений сотового телефонного аппарата стандарта GSM 900 при нормальных условиях.

Схема измерения:



где MS – абонентский аппарат стандарта GSM; K1 K2, K3, K4, K5 – ВЧ тракт; K6 – синхронизация; 1 – аттенюатор; 2 – разветвитель; 3 – имитатор базовой станции GSM; 4 – режекторный фильтр; 5 – анализатор спектра.

Формула измерения:

$$P_{MS} = P_0 + \Delta_{res} + \Delta_{cal} + \Delta_{sc} + \Delta_{att} + \Delta_{K1} + \Delta_{K2} + \Delta_{K4} + \Delta_{K5} + \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_4,$$

где  $P_0 = P_{dev} + P_{K1} + P_1 + P_{K2} + P_2 + P_{K4} + P_4 + P_{K5}$  – измеренная мощность (дБмВт);  $P_{dev}$  – наблюдаемые побочные излучения с помощью анализатора спектра (дБмВт);  $P_{K1}, P_{K2}, P_{K4}, P_{K5}$  – ослабление в ВЧ трактах K1, K2, K4, K5, (дБ);  $P_1$  – затухание в аттенюаторе (дБ);  $P_2$  – затухание в разветвителе (дБ);  $P_4$  – затухание в режекторном фильтре (дБ);  $\Delta_{res}$  – поправка на погрешность

АЧХ анализатора спектра (дБ);  $\Delta_{cal}$  – поправка на погрешность калибратора анализатора спектра (дБ);  $\Delta_{sc}$  – поправка на погрешность шкалы анализатора спектра (дБ);  $\Delta_{att}$  – поправка на погрешность внутреннего аттенюатора анализатора спектра (дБ);  $\Delta_{K1}, \Delta_{K2}, \Delta_{K4}, \Delta_{K5}$  – поправка на погрешность затухания в ВЧ тракте К1, К2, К4, К5 (дБ);  $\Delta_1$  – поправка на погрешность затухания в аттенюаторе (дБ);  $\Delta_2$  – поправка на погрешность затухания в разветвителе (дБ);  $\Delta_4$  – поправка на погрешность затухания в фильтре (дБ).

**Бюджет неопределенности:**

Величина, $X_i$	Оценка, $x_i$	Тип неопр.	Станд-ая неопр-ть, $u(X_i)$	Распр-ние вероятности	Кэфф. чувств. $c_i$	Вклад неопр., $u_i(Y)$
$P_0$	-40.4 дБмВт	A	0.23	нормальное	1	0.23
$\Delta_{res}$	0 дБ	B	0.86	прямоугольное	1	0.86
$\Delta_{cal}$	0 дБ	B	0.15	прямоугольное	1	0.15
$\Delta_{sc}$	0 дБ	B	0.06	прямоугольное	1	0.06
$\Delta_{att}$	0 дБ	B	0.43	прямоугольное	1	0.43
$\Delta_{K1}$	0 дБ	B	0.17	прямоугольное	1	0.17
$\Delta_{K2}$	0 дБ	B	0.17	прямоугольное	1	0.17
$\Delta_{K4}$	0 дБ	B	0.17	прямоугольное	1	0.17
$\Delta_{K5}$	0 дБ	B	0.17	прямоугольное	1	0.17
$\Delta_1$	0 дБ	B	0.12	прямоугольное	1	0.12
$\Delta_2$	0 дБ	B	0.57	прямоугольное	1	0.57
$\Delta_4$	0 дБ	B	0.17	прямоугольное	1	0.17
$P$	-40.4 дБмВт					1.23

**Результат измерения:**  $P = -40.4 \text{ дБмВт} \pm 2.5 \text{ дБ}$  ( $k=2, p=95\%$ , нормальный закон распределения).

Примененный метод по количественной оценке неопределенности дает удовлетворительный результат вкладывающийся в международные требования, несмотря на полученное завыв-

шенное значение расширенной неопределенности. Такой подход рационально применять:

- в тестирующих и испытательных лабораториях, где измерение проводится на предмет соответствия установленным нормативным документам, в которые заложены широкие границы допуска по неопределенности;
- в калибровочных лабораториях, в которых погрешность средств измерения невелика и составляет сотые доли децибела, значения которых с высокой степенью точностью можно рассматривать как линейные величины.

Если требуется оценить неопределенность наиболее точным образом, то при составлении математической модели измерения следует переводить логарифмические величины в линейные, правильно определять предельно допустимую погрешность средств измерения и составить математическую модель измерения, отслеживая последовательность физических процессов.

- [1] ISO/IEC 17025: 1999 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.
- [2] Руководство ЕВРАХИМ/СИТАК: Количественное описание неопределенности в аналитических измерениях. ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, С.-Петербург, 2002 – 149 с.
- [3] Ефремова Н.Ю. Оценка неопределенности в измерениях: практическое пособие (Серия Руководство по применению СТБ ИСО/МЭК 17025). Мн.: БелГИМ, 2003 – 50 с.
- [4] EA-4/02 Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration pp.47-50.
- [5] B.Türken, S.E. San etc. Evaluation of uncertainty budget for antenna calibration, Proc. Int. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, Kiev, 2002, Vol.2, pp.455 – 457.