УДК 621.317

В. Д. КУКУШ, канд. техн. наук, *В. М. ОГРАНОВИЧ*

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ РАССОГЛАСОВАНИЯ ОКОНЕЧНОГО СВЧ-ВАТТМЕТРА

Относительная погрешность рассогласования оконечного СВЧ-ваттметра при измерении падающей мощности выражается формулой [1] $\Delta_{0г} = -|\Gamma_н|^2 + 2|\Gamma_н||\Gamma_г|\cos\varphi$ (1), где $|\Gamma_н|$, $|\Gamma_г|$ — модули коэффициентов отражения нагрузки и генератора, φ — фазовый угол, определяемый электрической длиной линии передачи и фазами коэффициентов отражения нагрузки и генератора.

При известных $|\Gamma_н|$, $|\Gamma_г|$, φ погрешность рассчитывают по (1). Однако из-за трудоемкости измерения φ, а также вследствие изменения этой величины по множеству измерений на различных частотах с различными источниками колебаний с различными длинами линий передачи, соединяющих источники с ваттметром, при оценивании погрешности полагают известными лишь $|\Gamma_н|$ и $|\Gamma_г|$, а для φ считают известными лишь пределы изменения: от 0 до π.

Тогда в этом случае записывают [1]

$$\Delta_{\text{оГ}} = \Delta_{\text{оГ}}^{(1)} + \Delta_{\text{оГ}}^{(2)} = -|\Gamma_{\text{н}}|^2 + 2|\Gamma_{\text{н}}||\Gamma_{\text{г}}|\cos\varphi,$$

где $\Delta_{\text{оГ}}^{(1)} = -|\Gamma_{\text{н}}|^2$ — постоянная систематическая погрешность, исключаемая при известном $|\Gamma_{\text{н}}|$ введением поправки, зависящая только от ваттметра, $\Delta_{\text{оГ}}^{(2)} = 2|\Gamma_{\text{н}}|\,|\Gamma_{\text{г}}|\cos\varphi$ — переменная систематическая погрешность, зависящая не только от ваттметра, но и от источника и линии передачи.

При оценивании погрешности используют два подхода.

Первый состоит в том, что оценивают границы погрешности $\Delta_{\text{оГ}\max}^{(2)} = \pm 2|\Gamma_{\text{н}}||\Gamma_{\text{г}}|$ (2). Второй подход состоит в том, что по множеству измерений с помощью ваттметра на разных частотах с разными источниками и линиями передачи величина φ рассматривается как случайная, распределенная равномерно в интервале $0 - \pi$. Тогда погрешность $\Delta_{\text{оГ}}^{(2)}$ должна рассматриваться также как случайная, распределенная в границах $\theta = \pm 2|\Gamma_{\text{н}}||\Gamma_{\text{г}}|$ по закону арксинус [2]. Вероятность нахождения погрешности в некотором интервале $\pm\Delta_1$, можно представить как

$$P(-\Delta_1 \leqslant \Delta_{\text{оГ}}^{(2)} \leqslant +\Delta_1) = \frac{2}{\pi}\arcsin\frac{\Delta_1}{\theta}. \qquad (3)$$

В настоящей работе предпринята попытка продвинуться дальше по пути вероятностей оценки погрешности рассогласования. Учтем, что по множеству измерений с помощью ваттметра изменяется не только φ, но и $|\Gamma_{\text{н}}|$ и $|\Gamma_{\text{г}}|$. Кроме того считаем, что нецелесообразно измерение мощности обусловливать обязательным измерением частоты, φ, $|\Gamma_{\text{н}}|$, $|\Gamma_{\text{г}}|$. Поэтому следует обосновать характер изменения этих величин и в соответствии с ним оценить погрешность рассогласования.

Рассмотрим погрешность ваттметра, удовлетворяющего некому Т.З. Предположим, что значение модуля коэффициента отражения нагрузки ваттметра в диапазоне волн лежит в пределах $0 - |\Gamma_{\text{н}}|_{\max}$, где $|\Gamma_{\text{н}}|_{\max}$ — предел допустимого значения $|\Gamma_{\text{н}}|$, а $|\Gamma_{\text{н}}|$ рассматривается как случайная величина, распределенная в этом интервале равномерно При значениях $|\Gamma_{\text{н}}| > |\Gamma_{\text{н}}|_{\max}$ прибор был бы забракован.

Такие рассуждения, в принципе, можно провести и в отношении $|\Gamma_{\text{г}}|$. Тогда задачу вероятностной оценки погрешности рассогласования можно решать с помощью следующей математической модели: найти случайную $\Delta_{\text{оГ}}$ (функцию распределения, плотность вероятности): выражаемую (1), в предположении, что $|\Gamma_{\text{н}}|$ и $|\Gamma_{\text{г}}|$ случайные величины, распределенные равномерно в интервале от 0 до $|\Gamma|_{\max}$, а случайная величина φ распределена равномерно в пределах от 0 до π.

Для удобства расчетов представим $\Delta_{\text{оГ}}$ в следующем виде:

$$\Delta_{\text{оГ}} = |\Gamma_{\text{н}}|_{\max}(-\gamma_{\text{н}}^2 + 2a\gamma_{\text{н}}\gamma_{\text{г}}\cos\varphi), \qquad (4)$$

где

$$a = |\Gamma_{\text{г}}|_{\max}/|\Gamma_{\text{н}}|_{\max},\quad \gamma_{\text{н}} = |\Gamma_{\text{н}}|/|\Gamma_{\text{н}}|_{\max};\quad \gamma_{\text{г}} = |\Gamma_{\text{г}}|/|\Gamma_{\text{г}}|_{\max}.$$

Случайные величины $\gamma_{\text{н}}$ и $\gamma_{\text{г}}$ равномерно распределены на интервале [0, 1].

Выражение (4) можно представить в виде $\Delta_{\text{оГ}} = \delta |\Delta_{\text{оГ}}|_{max}$ (5), где

$$\delta = -\gamma_{н}^2 + 2a\gamma_{н}\gamma_{г}\cos\varphi; \qquad (6)$$

$$|\Delta_{\text{оГ}}|_{max} = |\Gamma_{н}|^2_{max} + 2|\Gamma_{н}|_{max}|\Gamma_{г}|_{max}. \qquad (7)$$

Таким образом, задача состоит в оценивании случайной величины δ при заданных значениях параметра a.

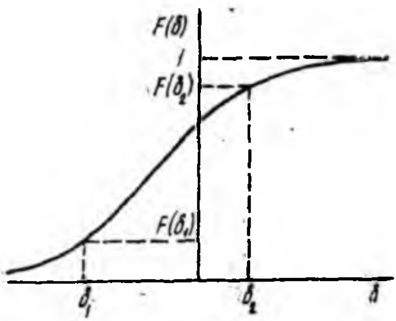

Рис. 1

Задача решалась численным методом: проведен расчет функции распределения, полностью характеризующей случайную величину δ. На рис. 1 условно показана функция распределения $F(\delta)$. Каждому значению δ_i соответствует $F(\delta_i)$ — вероятность того, что $\delta < \delta_i$. Доверительный интервал $\delta_2 - \delta_1$ соответствует доверительной вероятности $P(\delta_1 < \delta < \delta_2) = F(\delta_2 - \delta_1)$. Обычно нас будет интересовать симметричный интервал, т. е. когда $F(\delta_1) + F(\delta_2) = -1$.

При расчете непрерывные распределения $\gamma_{н}$, $\gamma_{г}$, φ были аппроксимированы дискретными. Если разбить интервал значений, например, $\gamma_{н}$ на $n_{н}$ равных подинтервалов, то $i_{н} - 0{,}5/n_{н}$ будет срединой $i_{н}$ подинтервала. То же можно сказать о $\gamma_{г}$ и φ. Поэтому считаем, что $\gamma_{н}$ принимает значения во множестве

$$\{i_{н} - 0{,}5/n_{н},\ i_{н} = 1, \ldots, n_{н}\};$$

$\gamma_{г}$ — во множестве

$$\{i_{г} - 0{,}5/n_{г},\ i_{г} = 1, \ldots, n_{г}\};$$

а φ — во множестве

$$\{\pi(i_{\varphi} - 0{,}5)/n_{\varphi},\ i_{\varphi} = 1, \ldots, n_{\varphi}\},$$

причем все значения $\gamma_{н}$, $\gamma_{г}$ и φ равновероятны.

Значения параметров выбраны следующим образом: $n_{н} = n_{г} = 30$, $n_{\varphi} = 40$. Функция распределения была вычислена в сорока точках простым подсчетом числа значений, лежащих левее δ_i.

Для расчета можно воспользоваться пакетом стандартных программ на языке Фортран. Результаты расчета представлены на рис. 2. Показаны шесть кривых $\delta = \delta(a)$, соотвествующие шести значениям функции распределения: $F(\delta) = 0{,}025$; $0{,}05$; $0{,}1$; $0{,}9$; $0{,}95$; $0{,}975$.

Кроме того, представлена кривая $\delta = \delta_{max}(a)$, ограничивающая положительную границу погрешности. Кривая $\delta = \delta_{min}(a)$, очерчивающая отрицательную границу погрешности, совпадает с осью абсцисс.

Рассмотрим пример использования результатов расчета. Пусть к. с. в. н. эквивалента нагрузки ваттметра $r = 1{,}3$, $|\Gamma_{н}| = 0{,}2$; положим $|\Gamma_{г}| = 0{,}2$, следовательно $a = 1$. Тогда

$$|\Delta_{\text{оГ}}|_{max} = |\Gamma_{н}|^2_{max} + 2|\Gamma_{н}|_{max}|\Gamma_{г}|_{max} = 0{,}04 + 0{,}08 = 0{,}12.$$

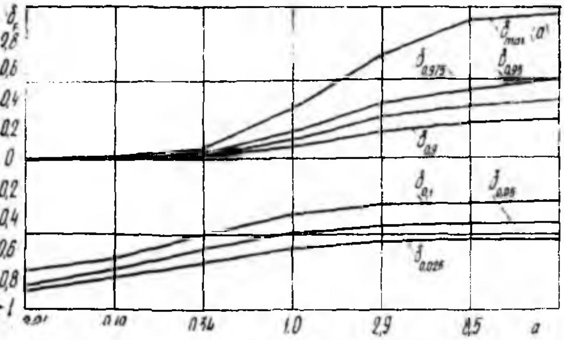

Рис. 2

Из рис. 2 для $a = 1$ допустим $P = 0,95$, находим $\delta_{0,95} = \delta_{0,975} - \delta_{0,025}$ и, воспользовавшись (5), имеем

$$\Delta_{\text{ог}} = |\Delta_{\text{ог}}|_{\max} \delta = 0,12(+0,18 \div -0,6) = (+2,2 \div -7,2)\ \%.$$

Если ввести поправку $c = 0,025P_{\text{изм}}$, то центрированная случайная погрешность составит $\Delta_{\text{ог}} = 4,7\ \%$.

Сравним с результатами оценивания погрешности по предельным значениям $|\Gamma|$. Выразив из соотношения (3) Δ_1, и положив $P = 0,95$, имеем

$$\Delta_1 = \theta_{\max} \sin\left(\frac{\pi}{2} P\right) = \pm 0,08 = \pm 8\ \%.$$

Здесь

$$\theta_{\max} = \pm 2 |\Gamma_{\text{н}}|_{\max} |\Gamma_{\text{г}}|_{\max}.$$

Таким образом, различие в значениях интервала погрешностей весьма существенно — в 1,7 раза (8 % и 4,7 %).

Рассмотренный подход оценивания погрешности рассогласования представляется нам более обоснованным по сравнению с оцениванием, когда случайной величиной полагается только φ.

Дальнейшее повышение достоверности оценки погрешности рассогласования связан, по-видимому, с уточнением законов распределения $|\Gamma_{\text{в}}|$ и $|\Gamma_{\text{г}}|$ как случайных величин.

Вероятностный подход может быть распространен и на другие случаи оценивания систематических погрешностей, обусловленных взаимодействием отражений на СВЧ.

Список литературы: 1. *Билько М. И., Томашевский А. К.* Измерение мощности на СВЧ. М., 1986. 166 с. 2. *Кукуш В. Д.* Электрорадиоизмерения. М., 1985. 364 с.

Поступила в редколлегию 14.03.90