

# Исследование зависимости неопределённости измерения комплексного коэффициента отражения оконечных устройств от параметров измерительного преобразователя

А. А. Шауэрман

В статье исследовано влияние параметров измерительного преобразователя на основе неидеального направленного ответвителя на неопределённость измерения комплексного коэффициента отражения. Рассматривается метод измерения с калибровкой измерительного преобразователя. В качестве индикатора используется логарифмический датчик.

*Ключевые слова:* комплексный коэффициент отражения, СВЧ, измерение, логарифмический индикатор, калибровка, направленный ответвитель, многополосник.

## 1. Введение

На фоне широкого распространения беспроводных телекоммуникационных систем растёт актуальность измерения параметров антенно-фидерных трактов и согласования оконечных устройств. Один из важнейших параметров – это комплексный коэффициент отражения (ККО).

В самом простейшем случае ККО можно определить с помощью измерителя комплексных отношений, на один вход которого подаётся отражённая волна, а на второй – сигнал с генератора. Падающая и отражённая волны могут быть выделены с помощью направленных ответвителей. В этом случае ККО определяется по формуле

$$\dot{\Gamma} = B \frac{\dot{b}_1}{\dot{b}_2}, \quad (1)$$

где  $\dot{b}_1$  и  $\dot{b}_2$  – амплитуды отражённой и падающей волн соответственно,  $B$  – коэффициент пропорциональности, определяемый коэффициентом ответвления направленных ответвителей.

Такой метод измерения предполагает идеализацию параметров направленного ответвителя, что предъявляет высокие требования к конструкции и технологии его изготовления [1, 2]. Другой широко распространённый метод [3, 4] базируется на использовании для измерения ККО 8-полосного преобразователя в общем случае с произвольными параметрами, но которые позволяют сформировать измерительное уравнение, разрешимое относительно измеряемой величины.

В соответствии с последним методом автором разработан и описан измеритель ККО на базе логарифмического индикатора [3, 4, 5, 6]. В работах предложено использовать 8-полосный датчик, представляющий собой пару направленных ответвителей на связанных

микроструктурных линиях. Как показали исследования, калибровка такого датчика устраняет алгоритмическую составляющую неопределённости измерения, связанную с неидеальностью направленного ответвителя, однако при этом присутствует некоторая зависимость погрешности измерения и диапазона измеряемых величин от параметров направленного ответвителя. Связано это с некоторой методологической особенностью такого способа измерения. В настоящей работе предполагается исследовать влияние параметров направленного ответвителя, выступающего в роли измерительного преобразователя, на неопределённость измерения ККО.

## 2. Теория

В работах [3, 4] описывается метод измерения комплексного коэффициента отражения (ККО) на основе векторного измерителя отношений сигналов, в качестве которого использован логарифмический индикатор. Структурная схема такого измерителя приведена на рис.1. В схеме генератор подключён к первому полюсу, объект измерения – ко второму, а третий и четвёртый полюсы используются в качестве индикаторных каналов.

Показание индикатора может быть выражено следующим образом [3, 4]:

$$\dot{N} = \frac{\dot{A} + \dot{B} \cdot \dot{\Gamma}_X}{1 + \dot{C} \cdot \dot{\Gamma}_X}, \quad (2)$$

где  $\dot{\Gamma}_X$  – комплексный коэффициент отражения от измеряемой нагрузки, подключённой ко второму порту многополюсника, а  $\dot{A}, \dot{B}, \dot{C}$  – некоторые эквивалентные параметры, характеризующие измерительный многополюсник.

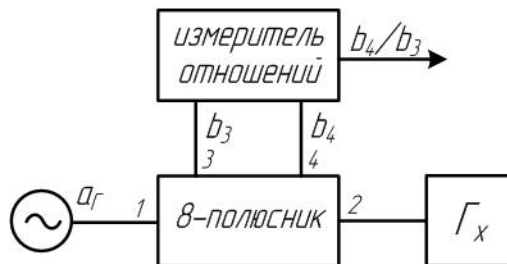


Рис. 1. Структурная схема измерителя ККО с 8-полюсным датчиком

Эквивалентные параметры находятся на этапе калибровки путём подключения трёх мер с известными значениями ККО ( $\dot{\Gamma}_1, \dot{\Gamma}_2, \dot{\Gamma}_3$ ) и формирования системы уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{A} + \dot{B} \cdot \dot{\Gamma}_1 - \dot{N}_1 \cdot \dot{\Gamma}_1 \cdot \dot{C} &= \dot{N}_1, \\ \dot{A} + \dot{B} \cdot \dot{\Gamma}_2 - \dot{N}_2 \cdot \dot{\Gamma}_2 \cdot \dot{C} &= \dot{N}_2, \\ \dot{A} + \dot{B} \cdot \dot{\Gamma}_3 - \dot{N}_3 \cdot \dot{\Gamma}_3 \cdot \dot{C} &= \dot{N}_3. \end{aligned} \quad (3)$$

Решение этой системы позволяет определить эквивалентные параметры  $\dot{A}, \dot{B}, \dot{C}$ . Из выражения (2) по показанию индикатора определяется значение измеряемой нагрузки, подключённой ко второму порту 8-полюсника, с учётом калибровки:

$$\dot{\Gamma}_X = \frac{\dot{N} - \dot{A}}{\dot{B} - \dot{N} \cdot \dot{C}} = \frac{\dot{N} - \Delta_1 \cdot \Delta^{-1}}{\Delta_2 \cdot \Delta^{-1} - \dot{N} \cdot \Delta_3 \cdot \Delta^{-1}} = \frac{\Delta \cdot \dot{N} - \Delta_1}{\Delta_2 - \Delta_3 \cdot \dot{N}}, \quad (4)$$

где  $\Delta$  – определитель системы уравнений (3),  $\Delta_i (i = 1, 2, 3)$  – определители, полученные из  $\Delta$  заменой  $i$ -го столбца на столбец свободных членов (3).

Очевидно, что значения и соотношение параметров измерительного 8-полюсника должны быть такими, что бы система измерительных уравнений не была вырожденной или плохо

обусловленной. В случае вырожденной системы ( $\Delta = 0$ ) эквивалентные параметры не могут быть определены однозначно и в целом система будет иметь множество решений, а 8-полюсный преобразователь не будет подходить для измерений ККО. В случае плохо обусловленной системы определитель не равен нулю, но число обусловленности  $\Delta^{-1}$  достаточно велико. Несмотря на то что такие системы имеют единственное решение, на практике искать это решение часто не имеет смысла. При погрешности входных данных, что всегда имеет место при практической реализации, решение плохо обусловленной системы будет иметь колоссальный разброс, то есть малые ошибки входных данных приведут к большим ошибкам решения.

Однако аналитически сформулировать критерий корректности использования той или иной структуры измерительного преобразователя не представляется возможным, так как при различных значениях измеряемых величин допустимы различные неопределённости измерения. Кроме того, использование логарифмического индикатора в качестве комплексного измерителя отношений приводит к зависимости погрешности измерения модуля и фазы отношений ( $\dot{N}$ ) от абсолютного значения измеряемой величины ( $\dot{\Gamma}_X$ ). В этом случае целесообразно исследовать зависимости неопределённости измерения от параметров измерительного 8-полюсника методом Монте-Карло.

Исследование зависимости неопределённости измерительной системы от параметров многополюсного преобразователя проводилось следующим способом. Создаём модели различных многополюсников, свойства которых определены с помощью  $S$ -матриц. Для каждого многополюсника моделируем работу измерительной системы. Задаём номиналы калибровочных мер ( $\dot{\Gamma}_1, \dot{\Gamma}_2, \dot{\Gamma}_3$ ) и коэффициент отражения измеряемой нагрузки ( $\dot{\Gamma}_X$ ). Для каждого 8-полюсника по матрице рассеяния находим эквивалентные параметры  $\dot{A}, \dot{B}, \dot{C}$ . Используя эквивалентные параметры, для каждой калибровочной меры, а также измеряемой нагрузки, находим соответствующее показание комплексного измерителя отношений ( $\dot{N}_1, \dot{N}_2, \dot{N}_3, \dot{N}_X$ ). Затем формируем шесть массивов из  $M$  элементов псевдослучайных чисел с нормальным законом распределения. Математические ожидания – номиналы калибровочных мер: модули ( $|\dot{\Gamma}_1|, |\dot{\Gamma}_2|, |\dot{\Gamma}_3|$ ) и фазы ( $\varphi_{\dot{\Gamma}_1}, \varphi_{\dot{\Gamma}_2}, \varphi_{\dot{\Gamma}_3}$ ); среднеквадратичное отклонение – погрешность аттестации калибровочных мер. Преобразуя эти шесть массивов в комплексную форму, получаем три массива  $[\dot{\Gamma}_1], [\dot{\Gamma}_2], [\dot{\Gamma}_3]$ .

Аналогичным образом формируем массивы псевдослучайных значений показаний измерителя отношений, соответствующих калибровочным мерам и измеряемой нагрузке  $[\dot{N}_1], [\dot{N}_2], [\dot{N}_3], [\dot{N}_X]$ . Однако в логарифмических измерителях погрешность измерения выражается в относительных единицах дБ. То есть абсолютная погрешность зависит от абсолютного значения измеряемой величины. Модуль отношения  $\dot{N}$  по линейной шкале можно найти следующим образом [3]:

$$|\dot{N}| = 10^{0.05 \cdot N_{\text{дБ}}}, \quad (5)$$

где  $N_{\text{дБ}}$  – отношение амплитуд сигналов, выраженное в дБ.

Тогда погрешность нахождения  $\Delta|\dot{N}|$  будет определяться как

$$\Delta|\dot{N}| = \frac{d|\dot{N}|}{dN_{\text{дБ}}} \cdot \Delta N_{\text{дБ}} = 0.05 \cdot \ln(10) \cdot |\dot{N}| \cdot \Delta N_{\text{дБ}}, \quad (6)$$

где  $\Delta N_{\text{дБ}}$  – ошибка определения модуля отношений двух волн (дБ).

В этом случае каждый элемент массива модулей измеренных значений формируется следующим образом:

$$|\dot{N}_i| = |\dot{N}| + 0.05 \cdot \ln(10) \cdot \Delta N_{\text{дБ}} \cdot |\dot{N}| \cdot \zeta, \quad (7)$$

где  $\zeta$  – случайная величина с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратичным отклонением, равным единице;  $i$  – порядковый номер элемента в массиве.

Таким образом, расчёт погрешности измерения основан на многократной генерации датчиком случайных чисел значений  $\dot{N}_{1,i}, \dot{N}_{2,i}, \dot{N}_{3,i}, \dot{N}_{X,i}, \dot{\Gamma}_{1,i}, \dot{\Gamma}_{2,i}, \dot{\Gamma}_{3,i}$  и на расчёте для каждого  $i$  значений измеряемого  $\dot{\Gamma}_{X,i}$ . Среднеквадратичное отклонение для матрицы  $[\dot{\Gamma}_X]$  пропорционально абсолютной неопределённости измерения ККО.

Для расчёта зависимости погрешности измерения от параметров направленного ответвителя необходимо установить связь матрицы рассеяния 8-полюсника ( $[S]$ ) с эквивалентными параметрами измерителя в целом ( $\dot{A}, \dot{B}, \dot{C}$ ). Сделать это можно, используя теорию графов и математический аппарат матриц. На рис. 2 изображён граф нагруженного измерительного 8-полюсника.

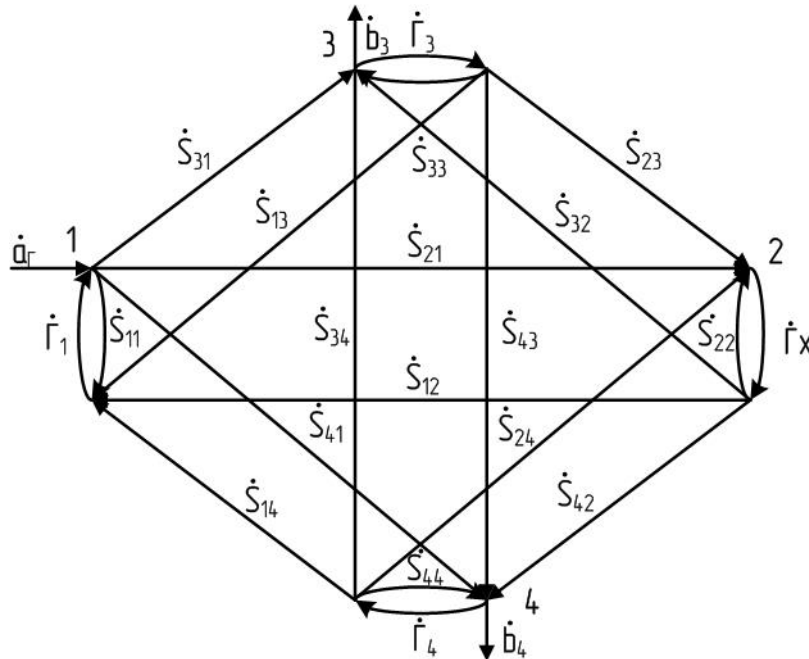


Рис. 2. Граф нагруженного 8-полюсника

Используемый в измерительной системе индикатор (рис.1) фиксирует отношение волн 3-его и 4-го портов, то есть  $\dot{b}_4/\dot{b}_3$ . Найти выражение для отношения  $\dot{b}_4/\dot{b}_3$  можно, используя правило некасающихся контуров (правило Мэсона).

$$\frac{\dot{b}_4}{\dot{b}_3} = \frac{\dot{S}_{41}(1 - \dot{S}_{22}\dot{\Gamma}_X - \dot{S}_{33}\dot{\Gamma}_3 - \dot{S}_{23}\dot{\Gamma}_3\dot{S}_{32}\dot{\Gamma}_X + \dot{S}_{22}\dot{\Gamma}_X\dot{S}_{33}\dot{\Gamma}_3) + \dot{S}_{21}\dot{\Gamma}_X\dot{S}_{42}(1 - \dot{S}_{33}\dot{\Gamma}_3) + \dot{S}_{21}\dot{\Gamma}_X\dot{S}_{32}\dot{\Gamma}_3\dot{S}_{43} + \dot{S}_{31}\dot{\Gamma}_3\dot{S}_{43}(1 - \dot{S}_{22}\dot{\Gamma}_X) + \dot{S}_{31}\dot{\Gamma}_3\dot{S}_{23}\dot{\Gamma}_X\dot{S}_{42}}{\dot{S}_{31}(1 - \dot{S}_{22}\dot{\Gamma}_X - \dot{S}_{44}\dot{\Gamma}_4 - \dot{S}_{24}\dot{\Gamma}_4\dot{S}_{42}\dot{\Gamma}_X + \dot{S}_{22}\dot{\Gamma}_X\dot{S}_{44}\dot{\Gamma}_4) + \dot{S}_{21}\dot{\Gamma}_X\dot{S}_{32}(1 - \dot{S}_{44}\dot{\Gamma}_4) + \dot{S}_{21}\dot{\Gamma}_X\dot{S}_{42}\dot{\Gamma}_4\dot{S}_{34} + \dot{S}_{41}\dot{\Gamma}_4\dot{S}_{34}(1 - \dot{S}_{22}\dot{\Gamma}_X) + \dot{S}_{41}\dot{\Gamma}_4\dot{S}_{24}\dot{\Gamma}_X\dot{S}_{32}} \quad (8)$$

Анализ отношения  $\dot{b}_4/\dot{b}_3$  позволяет сделать важные выводы:

1. Коэффициент отражения от генератора  $\dot{\Gamma}_1$  и коэффициент отражения от первого порта  $\dot{S}_{11}$  не участвуют в формировании отношения  $\dot{b}_4/\dot{b}_3$ , а следовательно, не могут оказать влияние на погрешность измерения.

2. Доминирующее влияние на показание индикатора оказывают параметры  $\dot{S}_{41}$  и  $\dot{S}_{31}$ , потому является актуальным исследовать зависимость погрешности измерительной системы от их соотношения.

3. Степень влияния измеряемого коэффициента отражения  $\dot{\Gamma}_x$  и коэффициентов отражения от индикаторных каналов  $\dot{\Gamma}_3$  и  $\dot{\Gamma}_4$  соизмерима, а потому является актуальным исследовать зависимость погрешности измерения от величины этих параметров ( $\dot{\Gamma}_3$  и  $\dot{\Gamma}_4$ ).

В качестве измерительного преобразователя предполагается использовать направленный ответвитель на связанных микрополосковых линиях. В простейшем случае такой ответвитель представляет собой две параллельные микрополосковые линии, электрическая длина которых равна четверти длины волны возбуждающего воздействия. Такой ответвитель обладает двумя плоскостями симметрии, показанными на рис. 3 штрихпунктирными линиями.

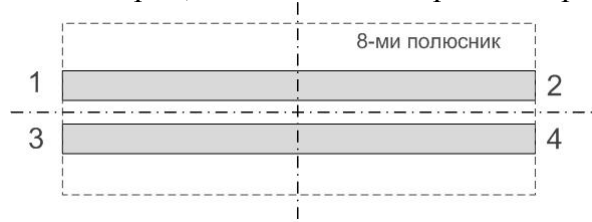


Рис. 3. Нумерация входов 8-полюсника

Матрица рассеяния недиссипативного многополюсника должна быть унитарной, то есть результат умножения матрицы  $S$  на эрмитово сопряжённую матрицу  $\bar{S}^T$  должен равняться единичной матрице [7]

$$S \cdot \bar{S}^T = E. \quad (9)$$

В этом случае норма каждого столбца матрицы  $S$  равна единице:

$$\dot{S}_{11}^2 + \dot{S}_{21}^2 + \dot{S}_{31}^2 + \dot{S}_{41}^2 = 1, \quad (10)$$

а столбцы ортогональны между собой:

$$\bar{S}^{(m)} \cdot S^{(n)} = 0, \text{ при } m \neq n. \quad (11)$$

С учётом симметрии матрица рассеяния 8-полюсника примет вид:

$$S = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{21} \cdot e^{i(\pi - \varphi_{21})} & S_{31} \cdot e^{i(\pi - \varphi_{31})} & S_{41} \cdot e^{i(\pi - \varphi_{41})} \\ S_{21} \cdot e^{i \cdot \varphi_{21}} & S_{11} & S_{41} \cdot e^{i(\pi + \varphi_{21} - \varphi_{31})} & S_{31} \cdot e^{i(2\pi + \varphi_{21} - \varphi_{41})} \\ S_{31} \cdot e^{i \cdot \varphi_{31}} & S_{41} \cdot e^{i(\varphi_{31} - \varphi_{21})} & S_{11} & S_{41} \cdot e^{i(\pi - \varphi_{21} + \varphi_{31})} \\ S_{41} \cdot e^{i \cdot \varphi_{41}} & S_{31} \cdot e^{i(\varphi_{41} - \varphi_{21} - \pi)} & S_{21} \cdot e^{i(\varphi_{41} - \varphi_{31})} & S_{11} \end{pmatrix} \quad (12)$$

На основании (10) и (12) составляем матрицы рассеяния для моделей измерительных 8-полюсников.

### 3. Результаты моделирования

Исследуем зависимость погрешности измерения ККО от направленности ответвителя. Под направленностью будем понимать отношение мощности на выходе рабочего 3 и нерабочего 4 плеч вторичной линии, выраженное в децибелах (дБ) (рис.3) [8]. Учитывая, что все недиагональные элементы матрицы  $S$  представляют собой волновые коэффициенты передачи по нормированным напряжениям между каждыми двумя входами, выразим направленность через параметры матрицы  $S$

$$A_{43} = 10 \cdot \lg \frac{P_3}{P_4} = 20 \cdot \lg \left| \frac{\dot{S}_{31}}{\dot{S}_{41}} \right|. \quad (13)$$

Для расчёта погрешности измерения задаём набор многополюсников через  $S$ -матрицы следующим образом. Устанавливаем для каждого многополюсника коэффициент отражения от входа ( $\dot{S}_{11}$ ) и переходное ослабление ( $\dot{S}_{31}$ ) одинаковыми, а  $\dot{S}_{41}$  и  $\dot{S}_{21}$  различными. Изме-

няем значение  $\dot{S}_{41}$ , по известным значениям  $\dot{S}_{11}, \dot{S}_{31}, \dot{S}_{41}$  из условия унитарности матрицы рассеяния (9) вычисляем  $\dot{S}_{21}$ .

Расчёт погрешностей произведён в среде графического программирования LabVIEW для четырех различных измеряемых нагрузок:  $0.05 \cdot e^{j40^\circ}$ ,  $0.1 \cdot e^{j40^\circ}$ ,  $0.2 \cdot e^{j40^\circ}$ ,  $1 \cdot e^{j40^\circ}$ . Коэффициенты отражения калибровочных устройств выбирались равными  $0.166 \cdot e^{j10^\circ}$ ,  $0.666 \cdot e^{j90^\circ}$ ,  $1 \cdot e^{j160^\circ}$  с погрешностью аттестации  $\pm 0.01$  по модулю и  $\pm 1^\circ$  по фазе. Измеритель отношений имеет точность по модулю  $\pm 0.2$  дБ и  $\pm 1^\circ$  по фазе. Коэффициент отражения от входа ответвителя и переходное ослабление выбраны соответственно  $|\dot{S}_{11}| = -30$  дБ,  $|\dot{S}_{31}| = -15$  дБ. Результаты расчёта приведены на рис. 4.

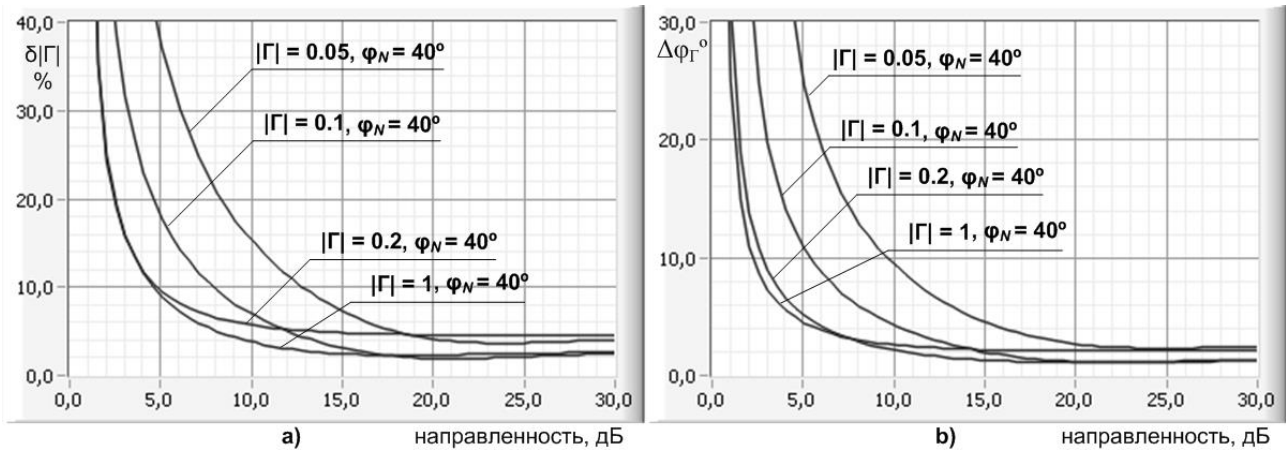


Рис. 4. а) зависимость относительной погрешности измерения модуля ККО от направленности ответвителя; б) зависимость погрешности фазы ККО, выраженной в градусах, от направленности ответвителя

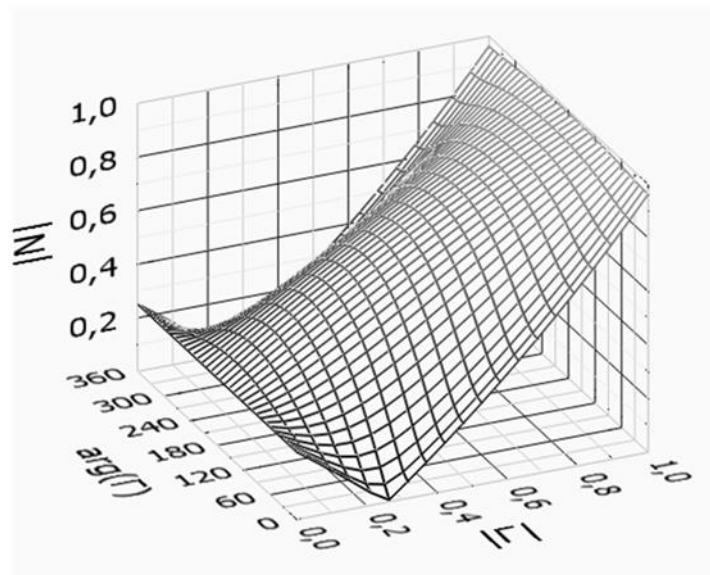


Рис. 5. Трёхмерный график зависимости модуля показаний индикатора  $|\dot{N}|$  от модуля  $|\dot{\Gamma}|$  и фазы  $\arg(\dot{\Gamma})$  измеряемого ККО

Особый интерес представляет пересечение графиков погрешностей измерения модулей ККО для нагрузок  $|\dot{\Gamma}| = 0.1$  и  $|\dot{\Gamma}| = 0.2$ ; получается, что точность измерения нагрузки с большим модулем ККО ниже, чем нагрузки с меньшим модулем при одной и той же фазе. Объясняется это нелинейностью измерительного уравнения (2). На рис. 5 показан трёхмерный

график зависимости модуля показаний индикатора  $|\dot{N}|$  от модуля  $|\dot{\Gamma}|$  и фазы  $\arg(\dot{\Gamma})$  измеряемого ККО при направленности 12 дБ, при этом  $\dot{A} = 0.251 \cdot e^{j \cdot 180^\circ}$ ,  $\dot{B} = 0.975 \cdot e^{j \cdot 0^\circ}$  и  $\dot{C} = 0.244 \cdot e^{j \cdot 180^\circ}$ .

Из рис. 5 видно, что при определённых фазах измеряемого ККО в измерительной функции имеется перегибы. В окрестности точки  $|\dot{\Gamma}| = 0.2$  наблюдается уменьшение чувствительности измерительной системы, что приводит к резкому возрастанию погрешности измерения. Таким образом, возникает пересечение графиков погрешностей измерения модулей ККО для нагрузок  $|\dot{\Gamma}| = 0.1$  и  $|\dot{\Gamma}| = 0.2$  при фазе нагрузок  $40^\circ$ .

Рассчитаем погрешность измерения для нагрузки  $0.05 \cdot e^{j 40^\circ}$  (самая большая погрешность на рис. 4) при различных точностях измерителя отношений. Для устранения неоднозначности результата исключим из модели погрешность аттестации калибровочных мер. Результаты расчёта приведены на рис. 6.

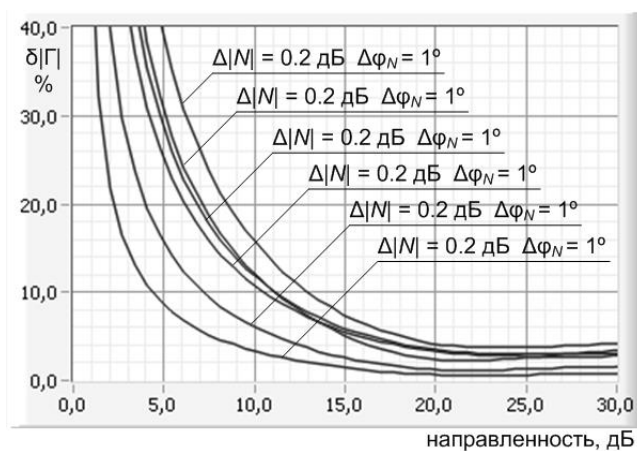


Рис. 6. Зависимость погрешности измерения модуля ККО от направленности при различной точности измерителя отношений

Оценим влияние коэффициентов отражения индикаторных каналов  $|\dot{\Gamma}_4|$  и  $|\dot{\Gamma}_3|$  на неопределенность измерения. Задаём постоянной для каждого ответвителя направленность, переходное ослабление и коэффициент отражения от входа, то есть фиксируем  $\dot{S}_{11}$ ,  $\dot{S}_{31}$  и  $\dot{S}_{41}$ , затем вычисляем  $|\dot{S}_{21}|$ . В качестве переменных параметров задаем  $|\dot{\Gamma}_4|$  и  $|\dot{\Gamma}_3|$ . Исследование проведено для нагрузки  $0.05 \cdot e^{j 40^\circ}$ , направленностью 25 дБ, модуль коэффициента отражения входа ответвителя равен 0.032, переходное ослабление равно 15 дБ. Результаты показаны на рис. 7.

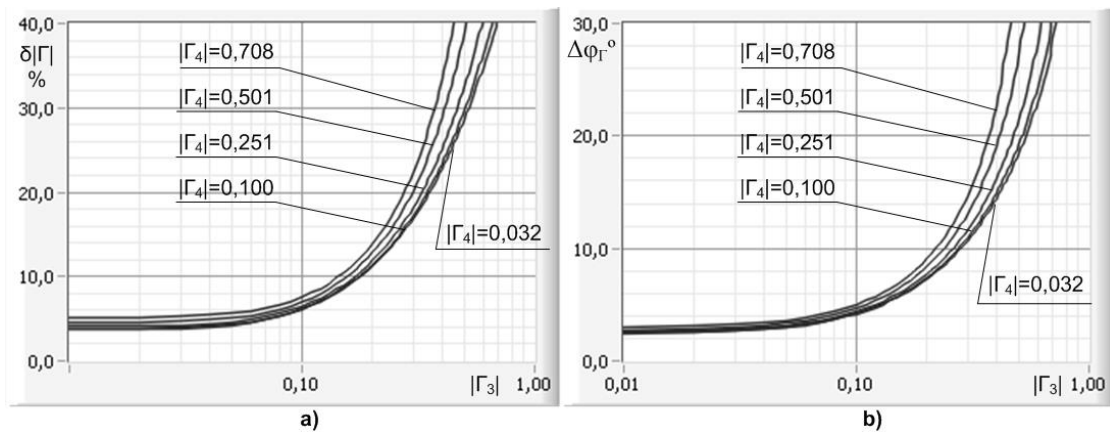


Рис. 7. – а) зависимость относительной погрешности измерения модуля ККО от коэффициентов отражения индикаторных каналов  $|\dot{\Gamma}_4|$  и  $|\dot{\Gamma}_3|$ ;  
 б) Зависимость погрешности измерения фазы ККО (в градусах) от коэффициентов отражения индикаторных каналов  $|\dot{\Gamma}_4|$  и  $|\dot{\Gamma}_3|$ , модуль измеряемой нагрузки 0.05

#### 4. Заключение

Анализ результатов исследования влияния параметров многополюсного преобразователя на неопределённость измерения позволяет сделать следующие выводы:

1. Коэффициент отражения от генератора  $\dot{\Gamma}_1$  и коэффициент отражения от первого порта  $\dot{S}_{11}$  не оказывают влияние на погрешность измерения.

2. Для обеспечения максимальной точности измерительной системы при различных погрешностях измерителя отношений достаточно направленности 20 – 25 дБ, дальнейшее увеличение направленно не приводит к улучшению метрологических данных измерительной системы, но значительно ужесточает требование к проектированию направленного ответвителя в условиях широкополосности.

3. Принципиально возможно существование значений измеряемого ККО, при которых наблюдается резкое уменьшение чувствительности измерительной системы, что приводит к возрастанию погрешности измерения. В этом случае возникает ситуация, когда ККО с меньшим модулем может быть измерен точнее, чем ККО с большим модулем.

4. Степень влияния коэффициентов отражения от индикаторных каналов  $\dot{\Gamma}_3$  и  $\dot{\Gamma}_4$  на метрологические характеристики измерительной системы достаточно велика и в большей степени зависит от  $|\dot{\Gamma}_4|$ , чем от  $|\dot{\Gamma}_3|$ ; при этом уменьшение значений  $|\dot{\Gamma}_4|$  и  $|\dot{\Gamma}_3|$  менее 0.1 (20 дБ) не приводит к улучшению точности измерения.

#### Литература

1. Шаурман А.А., Жариков М.С., Борисов А.В. Разработка и исследование широкополосного микрополоскового направленного ответвителя. // Российская научно-техническая конференция «Информатика и проблемы телекоммуникаций», Новосибирск – 2011.
2. Shaurman A.A, Borisov A. V, Zharikov M. S, Shaurman A.K, Kroshin F.S. Development and Investigation of Microstrip Directional Coupler with Phase Velocity Compensation Based on Sawtooth Configuration of Coupled Lines // International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices Proceedings. EDM'2011: Conference Proceeding, 2011. – 426s.



3. *Шаурман А.А., Жариков М.С., Борисов А.В.* Автоматизированный измеритель комплексного коэффициента отражения на основе логарифмического усилителя. // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнёва, Выпуск 5(31) – Красноярск 2010. – 276с.
4. *Шаурман А.А., Жариков М.С., Борисов А.В.* Измеритель комплексного коэффициента отражения оконечных устройств СВЧ на базе логарифмического усилителя. Материалы 10-ой международной конференции Актуальные Проблемы Электронного Приборостроения (АПЭП – 2010), Новосибирск, Том 4, стр. 76.
5. *Shauerman A.A., Borisov A. V., Zharikov M. S., Shauerman A.K.* Automated Measuring Device for Microwave Frequency Terminals on the Basis of Logarithmic Amplifier. International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2010: Conference Proceeding, 2010. – 510s.
6. *Шаурман А.А., Жариков М.С., Борисов А.В.* Измеритель комплексного коэффициента отражения на базе логарифмического усилителя. // Российская научно-техническая конференция «Информатика и проблемы телекоммуникаций», Новосибирск - 2010, Том 1, с. 208.
7. *Сазонов Д.М., Гридин А.М., Мишустин Б.А.* Устройства СВЧ. – М.: Высшая школа, 1981. – 296 с.
8. *Чернушенко А.М.* Конструирование экранов и СВЧ-устройств. – М.: Радио и связь, 1990. – 351 с.

*Статья поступила в редакцию 04.04.2013*

### **Шаурман Александр Александрович**

старший преподаватель кафедры систем автоматизированного проектирования (САПР) СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86, к.301), e-mail: shamrel@mail.ru, тел. 8-923-1184650.

### **Measurement uncertainty dependence of complex reflection coefficient of terminal device from measuring transducer parameters.**

**A.A. Shauerman**

The influence of measuring transducer parameters on the basis of non-ideal directional coupler on the measurement uncertainty of complex reflection coefficient is analyzed in this paper. We consider the method of measurement with converter calibration. Logarithmic sensor is used as an indicator.

*Keywords:* complex reflection coefficient, UHF, microwave, measurement, logarithmic detector, calibration, directional coupler.