

РАЗДЕЛ II. ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

онные технологии: Материалы Всерос. молодежн. конф. (г. Москва, МГТУ Станкин, 5–15 июля 2011) / – М., 2011. – С.81–86.

К.т.н., доц. П.В. Максимов – ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ) кафед-

ра вычислительной математики и механики, направление: информационные системы и технологии, rvtperm@mail.ru (342)239-15-64; В.В. Пашков – нач. отдела внедрения ОАО «МДМ Банк» (Пермский филиал, г. Пермь), valentin.pashkov@gmail.com

УДК 621.317.7.023

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ КОМПЛЕКСНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ ОКОНЕЧНЫХ УСТРОЙСТВ СВЧ

А.А. Шауэрман, М.С. Жариков, А.В. Борисов

В статье анализируется влияние эквивалентных параметров измерительного преобразователя на неопределенность измерения комплексного коэффициента отражения (ККО). Рассмотрены случаи использования линейного и логарифмического индикаторов. Выявлены условия, при которых измерение не может быть произведено с приемлемой точностью во всем диапазоне возможных значений измеряемых величин. Предложен метод расширения диапазона измеряемых значений при использовании измерительной системы с переменными параметрами.

Ключевые слова: ККО, эквивалентные параметры, логарифмический преобразователь, направленный ответвитель, погрешность измерения, чувствительность системы

Введение

При построении измерителей комплексного коэффициента отражения (ККО) основной задачей является уменьшение погрешности измерения. В цифровых измерителях эта задача решается путем калибровки измерительного преобразователя, т.е. предварительного определения его эквивалентных параметров с целью их учета в результате измерения. Однако в этом случае на погрешность измерения влияют величины этих параметров и величина измеряемого ККО. На рисунке 1 изображена структурная схема измерителя ККО с 8-полюсным преобразователем и векторным измерителем отношений сигналов. В схеме СВЧ генератор подключен к порту 1, измеряемая нагрузка – к порту 2, а третий и четвертый порт используются в качестве индикаторных каналов.

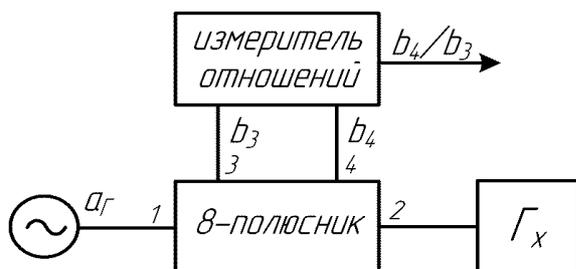


Рисунок 1 - Структурная схема измерителя ККО с 8-ми полюсным датчиком

На выходе измерителя отношений (микросхема AD8302) формируются напряжения, пропорциональные логарифму отношения амплитуд входных сигналов и разности фаз между этими сигналами. Напряжение может быть измерено с помощью внешнего аналого-цифрового преобразователя (АЦП).

Показание индикатора может быть выражено следующим образом [1]:

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

где \dot{N} – показание измерителя отношений, $\dot{\Gamma}$ – комплексный коэффициент отражения от измеряемой нагрузки, а $\dot{A}, \dot{B}, \dot{C}$ – эквивалентные параметры, характеризующие измерительный многополюсник, которые определяются на этапе калибровки.

В процессе исследования зависимости погрешности измерения ККО от параметров измерительного многополюсника были получены интересные результаты: так при некоторых значениях эквивалентных параметров А, В, С точность измерения нагрузки с большим модулем ККО ниже, чем нагрузки с меньшим модулем при одной и той же фазе.

1. Анализатор измерителя с линейным индикатором

Произведем анализ измерителя для индикатора с линейным (не логарифмическим) выходом. Измерение модуля и фазы отноше-

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ КОМПЛЕКСНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ ОКОНЕЧНЫХ УСТРОЙСТВ СВЧ

ния осуществляются независимо друг от друга:

$$N(\Gamma, \varphi_\Gamma) = \left| \frac{\dot{A} + \dot{B} \cdot \dot{\Gamma}}{1 + \dot{C} \cdot \dot{\Gamma}} \right|; \quad (2)$$

$$\varphi_N(\Gamma, \varphi_\Gamma) = \left(\frac{\dot{A} + \dot{B} \cdot \dot{\Gamma}}{1 + \dot{C} \cdot \dot{\Gamma}} \right), \quad (3)$$

где N – модуль отношения, φ_N – его аргумент, Γ – модуль ККО измеряемой нагрузки, φ_Γ – фаза измеряемого ККО.

Построим графики функций (2,3) для различных фаз ККО (рисунки 2,3). Эквивалентные параметры выберем следующими: $A = -0.1$, $B = 0.9826$, $C = 0.06632$. Такие значения имеет 8-ми полюсник, представляющий собой микрополосковый четвертьволновый направленный ответвитель на связанных линиях с двумя плоскостями симметрии и направленностью 20дБ [2]. Стоит отметить, что действительные значения эквивалентных параметров имеют место для квадратурного недиссипативного направленного ответвителя с двумя плоскостями симметрии при условии идеального согласования измерительных каналов

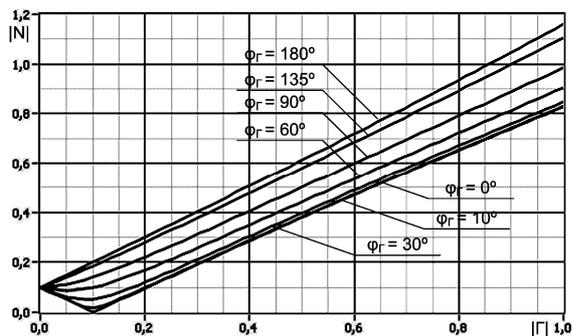


Рисунок 2 - Зависимость модуля отношения от модуля измеряемого ККО.

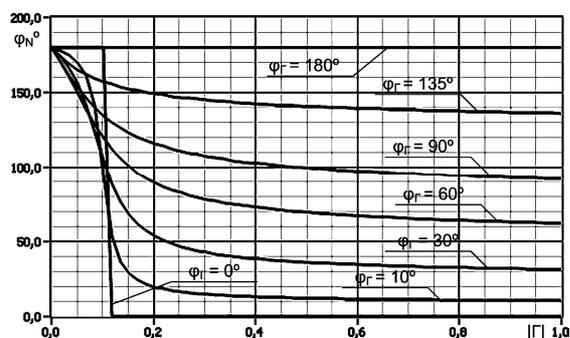


Рисунок 3 - Зависимость фазы отношения от модуля измеряемого ККО.

Наиболее наглядно зависимость (2) представлена в виде трехмерного графика, показанного на рисунке 4.

Анализ графиков на рисунках 2 и 4 позволяет сделать вывод, что в окрестности точки $|\dot{\Gamma}| = 0,1$ при некоторых значениях фазы измеряемой нагрузки наблюдается уменьшение чувствительности измерительной системы, что приводит к резкому возрастанию погрешности измерения. Исследовать поведение функции в области ее критических значений можно с помощью производной. На рисунке 5 изображен график производной функции $|N| = f(|\Gamma|)$. Дифференцирование произведено численными методами.

Достаточно удобно визуализировать зависимость чувствительности измерительной системы от значения ККО, используя график поверхностей, как показано на рисунке 6. На этом рисунке светлые области соответствуют максимальной чувствительности системы, более темные – минимальной. Чувствительность измерительной системы обратно пропорциональна тону карты. Используя подобную «карту», построенную для определенных значений эквивалентных параметров, полученных на этапе калибровки преобразователя, можно для каждого измеренного значения модуля ККО указать погрешность измерения.

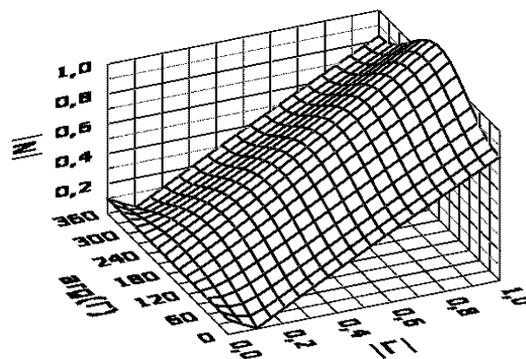


Рисунок 4 - Зависимость модуля отношения от модуля измеряемого ККО, трехмерный график.

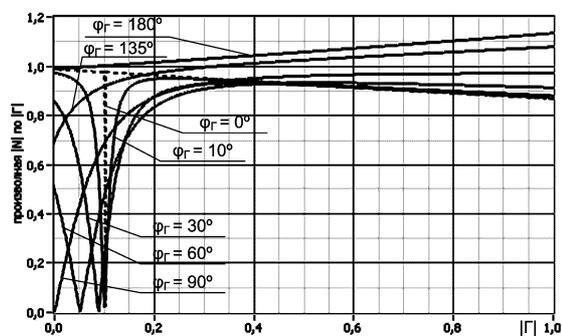


Рисунок 5 - Модуль производной функции $|N| = f(|\Gamma|)$ в зависимости от модуля ККО при различных фазах ККО.

Особо стоит отметить, что при определенной фазе нагрузки погрешность измере-

РАЗДЕЛ II. ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

ния модуля ККО выше у нагрузки с большим модулем, чем у нагрузки с меньшим модулем.

На рисунке 6 черным цветом показана область, в которой производная функции (2) обращается в ноль - в этой области измерительная система не чувствительна к нагрузке и измерение ККО принципиально невозможно. Поэтому представляет интерес аналитически вычислить положение этой области.

Произведем вычисление для действительных A, B, C , тогда выражение (1) перепишем следующим образом:

$$\dot{N} = \frac{A + B\Gamma}{1 + C\Gamma} = \frac{A + B\Gamma(\cos\varphi_\Gamma + i \cdot \sin\varphi_\Gamma)}{1 + C\Gamma(\cos\varphi_\Gamma + i \cdot \sin\varphi_\Gamma)}, \quad (4)$$

где Γ – модуль измеряемого ККО, φ_Γ – его фаза.

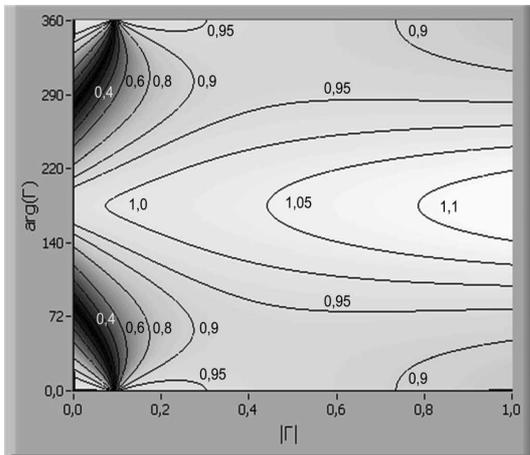


Рисунок 6 - График поверхности производной $|N| = f(|\Gamma|)$ в зависимости от значения ККО.

Тогда модуль отношения (4) запишем в виде:

$$|N| = \frac{\sqrt{[A + \Gamma \cos\varphi_\Gamma(B + AC) + BC\Gamma^2]^2 + [(B - AC)\Gamma \sin\varphi_\Gamma]^2}}{C^2\Gamma^2 + 2C \cdot \Gamma \cdot \cos\varphi_\Gamma + 1} \quad (5)$$

Ее производная:

$$\frac{d|N|}{d|\Gamma|} = \frac{(B - AC)[A \cos\varphi_\Gamma + (B + AC)\Gamma + BC \cos\varphi_\Gamma \Gamma^2]}{(1 + 2C \cos\varphi_\Gamma \Gamma + C^2\Gamma^2)} \times \quad (6)$$

$$\times \frac{1}{\sqrt{A^2 + a\Gamma + b\Gamma^2 + 2c\Gamma^3 + d\Gamma^4}},$$

где:

$$\begin{aligned} a &= 2A \cos\varphi_\Gamma(B + AC), \\ b &= A^2C^2 + 4ABC \cos^2\varphi_\Gamma + B^2, \\ c &= 2BC \cos\varphi_\Gamma(B + AC), \\ d &= B^2C^2. \end{aligned}$$

Найдем нули производной, решая квадратное уравнение:

$$A \cos\varphi_\Gamma + (B + AC)\Gamma + BC \cos\varphi_\Gamma \cdot \Gamma^2 = 0. \quad (7)$$

Уравнение имеет два корня:

$$\begin{aligned} \Gamma_1 &= -\frac{B + AC - \sqrt{A^2C^2 - 2ABC \cos(2\varphi_\Gamma) + B^2}}{2BC \cos\varphi_\Gamma}, \\ \Gamma_2 &= -\frac{B + AC + \sqrt{A^2C^2 - 2ABC \cos(2\varphi_\Gamma) + B^2}}{2BC \cos\varphi_\Gamma}. \end{aligned} \quad (8)$$

Зависимости $\Gamma_1(\varphi_\Gamma)$ и $\Gamma_2(\varphi_\Gamma)$ описывают кривые, в окрестностях которых погрешность измерения ККО резко возрастает.

Аналогичным образом можно аналитически найти область низкой чувствительности в общем случае, когда A, B, C – комплексные, тогда выражение (1) можно переписать следующим образом:

$$\dot{N} = \frac{A(\cos\varphi_A + i \sin\varphi_A) + B(\cos\varphi_B + i \sin\varphi_B)\Gamma(\cos\varphi_\Gamma + i \sin\varphi_\Gamma)}{1 + C(\cos\varphi_C + i \sin\varphi_C)\Gamma(\cos\varphi_\Gamma + i \sin\varphi_\Gamma)}, \quad (9)$$

где Γ – модуль измеряемого ККО, φ_Γ – его фаза; A, B, C – модули соответствующих эквивалентных параметров, $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$ – их фазы.

$$\frac{d|N|}{d|\Gamma|} = \frac{a + b\Gamma + c\Gamma^2 + d\Gamma^3 + e\Gamma^4}{(1 + f\Gamma + g\Gamma^2 + h\Gamma^3 + k\Gamma^4)\sqrt{e + m\Gamma + n\Gamma^2 + o\Gamma^3 + p\Gamma^4}}, \quad (10)$$

где

$$\begin{aligned} a &= AB \cos(\varphi_A - \varphi_B - \varphi_\Gamma) - A^2C \cos(\varphi_C + \varphi_\Gamma), \\ b &= B^2 - A^2C^2[2 + \cos(2\varphi_C + 2\varphi_\Gamma)] + \\ &\quad + ABC[\cos(\varphi_A - \varphi_B - \varphi_C - 2\varphi_\Gamma) + \cos(\varphi_A - \varphi_B + \varphi_C)], \\ c &= 3C \cos(\varphi_C + \varphi_\Gamma) \cdot (B^2 - A^2C^2), \\ d &= -A^2C^2 + B^2C^2[2 + \cos(2\varphi_C + 2\varphi_\Gamma)] + \\ &\quad - ABC[\cos(\varphi_A - \varphi_B - \varphi_C - 2\varphi_\Gamma) + \cos(\varphi_A - \varphi_B + \varphi_C)], \\ e &= -ABC^4 \cos(\varphi_A - \varphi_B - \varphi_\Gamma) + B^2C^2 \cos(\varphi_C + \varphi_\Gamma), \\ f &= 4C \cos(\varphi_C + \varphi_\Gamma), \\ g &= 2C^2[2 \cos(\varphi_C + \varphi_\Gamma)^2 + 1], \\ h &= 4C^3 \cos(\varphi_C + \varphi_\Gamma), \\ k &= C^4, \\ e &= A^4, \\ m &= 2CA^2 \cos(\varphi_C + \varphi_\Gamma) + 2AB \cos(\varphi_A - \varphi_B - \varphi_\Gamma), \\ n &= B^2 + A^2C^2 + \\ &\quad + 2ABC[\cos(\varphi_A - \varphi_B - \varphi_C - 2\varphi_\Gamma) + \cos(\varphi_A - \varphi_B + \varphi_C)], \\ o &= 2B^2C \cos(\varphi_C + \varphi_\Gamma) + 2ABC^2 \cos(\varphi_A - \varphi_B - \varphi_\Gamma), \\ p &= B^2C^2. \end{aligned}$$

Нахождение нулей производной сводится к решению уравнения четвертой степени:

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ КОМПЛЕКСНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ ОКОНЕЧНЫХ УСТРОЙСТВ СВЧ

$$a + b\Gamma + c\Gamma^2 + d\Gamma^3 + e\Gamma^4 = 0. \quad (11)$$

Известно, что четвертая степень алгебраических уравнений является наивысшей, при которой существует аналитическое решение в общем виде, например, методом Декарта-Эйлера или Феррари. Однако в случае уравнения (11) с учетом (10) решение будет достаточно громоздким и на практике гораздо удобнее выполняется численными методами.

Используя численное дифференцирование уравнения (2), при комплексных А, В, С, можно для любой измерительной системы построить карту погрешности и указать области значений ККО, при которых производить измерение не целесообразно.

2. Анализатор измерителя с логарифмическим индикатором

Произведем анализ для индикатора с логарифмическим выходом. В этом случае показание индикатора пропорционально логарифму отношения амплитуды четвертого порта к третьему (см. рисунок 1). С учетом этого выражение 2 запишем в виде:

$$N(\Gamma, \varphi_\Gamma) = \log \left| \frac{\dot{A} + \dot{B} \cdot \dot{\Gamma}}{1 + \dot{C} \cdot \dot{\Gamma}} \right|, \quad (12)$$

Особенность логарифмического измерителя заключается в том, что абсолютная погрешность измерения для него выражается в относительных единицах (дБ) и является постоянной для всего рабочего динамического диапазона. В линейном масштабе постоянной остается относительная погрешность измерения, в то время как, абсолютная погрешность (в линейных единицах) зависит от значения измеряемого отношения и при уменьшении этого значения уменьшается.

Продифференцировав зависимость (12) найдем чувствительность измерительной системы. На рисунках 7,8 показаны графики зависимости модуля функции (12) и модуля ее производной от модуля измеряемого ККО при различных фазах ККО. На рисунке 9 – график поверхности чувствительности измерительной системы.

Анализ чувствительности измерителя на основе логарифмического индикатора позволяет сделать выводы, что, так же как и у линейного индикатора, существуют области, при которых чувствительность измерительной системы падает до нуля. Также существуют области значений ККО, в которых чувствительность резко возрастает, в этих областях модуль ККО может быть измерен с наименьшей погрешностью. Однако следует уделять особое внимание измерениям ККО в областях гиперчувствительности, так как мо-

дуль коэффициента отношений $|N|$ может превысить предельно допустимый динамический диапазон логарифмического датчика, типичное значение которого на частотах до 10 ГГц не превышает 45 дБ.

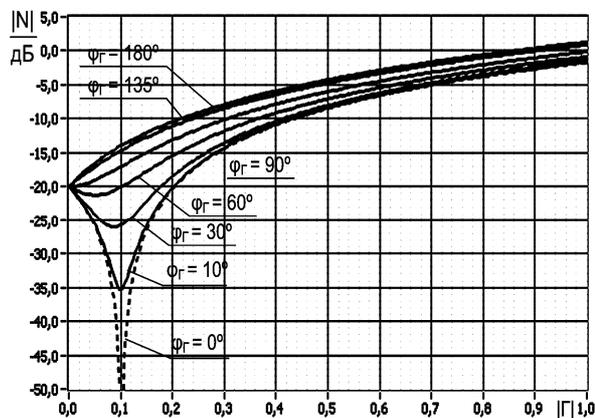


Рисунок 7 - Зависимость модуля отношения от модуля измеряемого ККО

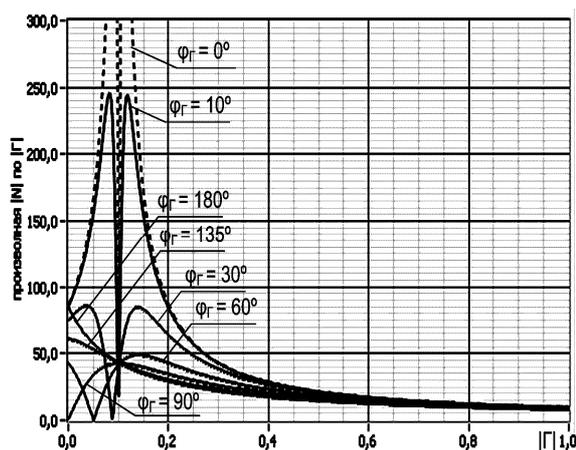


Рисунок 8 - Модуль производной функции $|N| = f(|\Gamma|)$ в зависимости от модуля ККО при различных фазах ККО

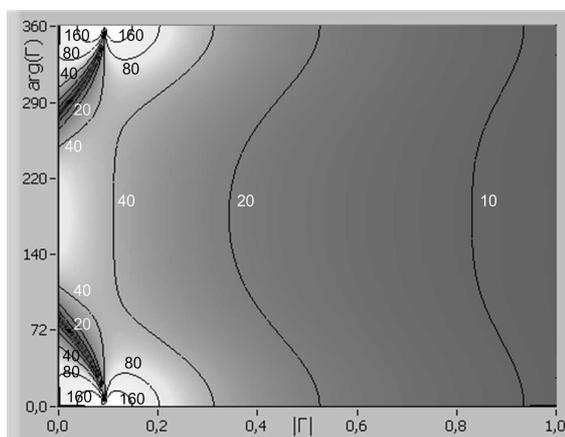


Рисунок 9 - График поверхности чувствительности, направленность ответителя 20 дБ

РАЗДЕЛ II. ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Для того, чтобы расширить диапазон измеряемых величин и избежать измерений с высокой погрешностью, можно использовать измерительный многополюсник с переменными параметрами. Изменение параметров позволит смещать области максимальной и минимальной чувствительности, адаптируя тем самым измерительную систему согласно измеряемому ККО нагрузки.

В случае использования в качестве многополюсника направленного ответвителя в конструкции возможно предусмотреть управляемую систему уменьшения коэффициента направленности на коммутирующих элементах, что позволит смещать области низкой чувствительности в сторону больших значений модуля ККО, как показано на рисунке 10. На рисунке 10 показан график поверхности чувствительности для микрополоскового четверть волнового направленного ответвителя на связанных линиях с направленностью 10 дБ. При этом $A = -0.316$, $B = 0.987$, $C = 0.278$.

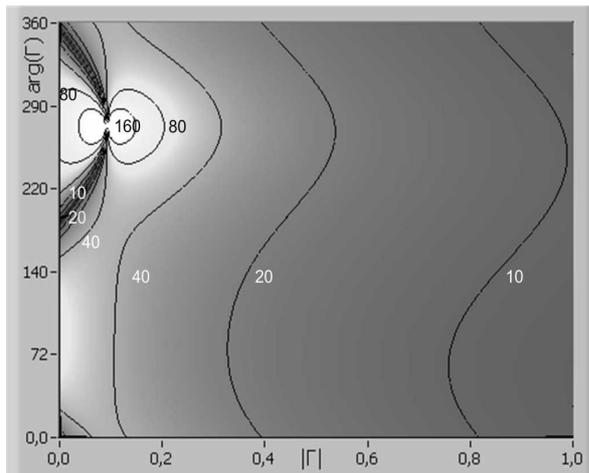


Рисунок 10 - График поверхности чувствительности, направленность ответвителя 10 дБ.

Однако при таком подходе не удается избежать низкой точности измерения малых модулей ККО при фазах близких к 90° и 270° . В таких случаях можно подключать нагрузку через управляемый проходной фазовращатель. График поверхности при подключении измеряемой нагрузки через фазовращатель со сдвигом фазы 90° показан на рисунке 11.

Измерительная система с адаптивными параметрами калибруется в автоматическом режиме для каждого состояния. После чего эквивалентные параметры и соответствующие им графики поверхностей хранятся в памяти управляющей микро-ЭВМ.

Для каждого измеренного ККО можно указать соответствующую неопределенность результата измерения.

Выводы

Анализ измерителя ККО на основе 8-полюсного преобразователя и векторного индикатора отношений сигнала показывает, что чувствительность измерителя к измеряемой величине ККО существенно и достаточно сложно зависит от объекта измерения. Предлагаемые методы анализа позволяют определить области значений ККО, в которых измеритель не будет чувствовать измеряемую нагрузку, что приведет к резкому возрастанию погрешности измерения. Для исключения этих областей предлагается использовать перестраиваемый (адаптивный) преобразователь.

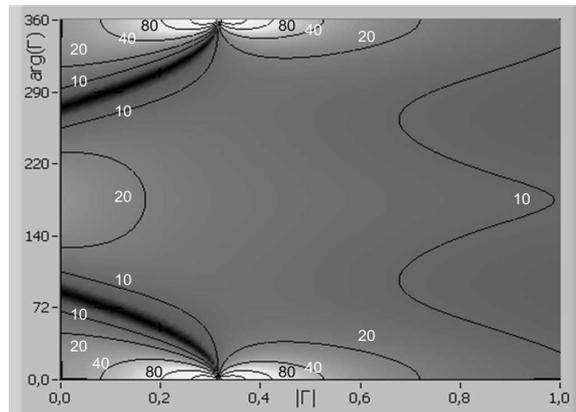


Рисунок 11 - График поверхности чувствительности, направленность ответвителя 20 дБ, сдвиг фазы 90°

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шауэрман 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. Решетнева, Выпуск 5(31) – Красноярск, 2010. – 276с
2. Шауэрман А.А., Жариков М.С., Борисов А.В., Измеритель комплексного коэффициента отражения оконечных устройств СВЧ на базе логарифмического усилителя. // Актуальные Проблемы Электронного Приборостроения (АПЭП – 2010); материалы десятой международной конференции, Новосибирск, Том 4, 2010 - С. 76-80.

Аспирант **А.А. Шауэрман** – shamrel@mail.ru; аспирант **М.С. Жариков** – moirfred@mail.ru; к.т.н., доц **А.В. Борисов** – bav@sibsutis.ru; - Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики «СибГУТИ», кафедра САПР, (383)269-82-59.

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 2/1, 2012