

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СЛОЖНЫХ СИГНАЛОВ

Введение

В современных системах связи, радиолокации и радионавигации широко используются сложные сигналы с угловой модуляцией, к стабильности параметров которых предъявляются чрезвычайно высокие требования [1]. В этих условиях практическая реализация устройств формирования тесно связана с их метрологическим обеспечением, в частности с вопросами измерения параметров сложных сигналов и их стабильности. Однако известные методы и устройства ориентированы на измерение отдельных конкретных параметров сигналов и для оперативного контроля всех основных параметров используются специальные громоздкие дорогостоящие стенды, включающие несколько сложных приборов [2]. Поэтому создание комплексного измерительного прибора, обеспечивающего повышенную точность измерения всех основных параметров сложных сигналов и автоматическое документирование полученных результатов весьма актуально.

В статье приводятся результаты разработки измерительного комплекса, в котором используются программно реализованные прямые и косвенные методы измерения, статистические методы допускового контроля параметров сложных сигналов.

Особенности статистического подхода к измерению параметров сигнала

В процессе формирования сигнал $u(t)$ подвержен воздействию различных дестабилизирующих факторов. Предположим, что выходной сигнал есть продукт преобразования идеального (без искажений) сигнала $u_{ид}(t)$ при прохождении его через некоторую систему A , на которую воздействуют аддитивно и мультипликативно шумы, источниками которых (см. рис. 1) при цифровом и цифроаналоговом формировании являются: нестабильности тактовой частоты δf_T , шумы квантования ΔU , шумы дискретизации Δf_T , шумы питающих напряжений ΔU_n , ошибки восстановления ΔK_B , ошибки вычисления центральной частоты δf_o , девиации частоты $\delta \Delta f$, нестабильность начальной фазы $\delta \phi_o$, длительности радиоимпульса $\delta \tau_n$ и др.

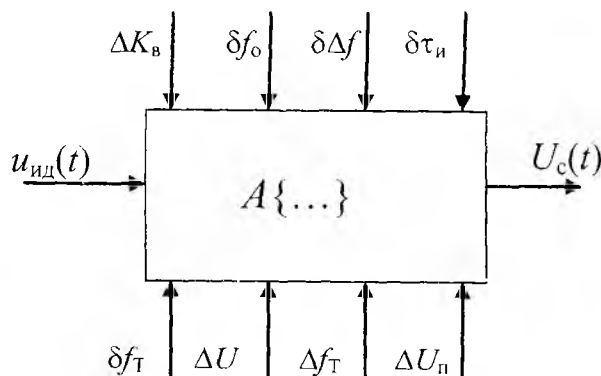


Рис. 1

Таким образом, исследуемая система преобразует идеальный сигнал $u_{ид}(t)$ в соответствии с некоторым оператором A

$$u_c(t) = A\{u_{ид}, \Delta K(t), \Delta T(t), \Delta f(t)\}, \quad (1)$$

где $\Delta K(t)$ – функция, характеризующая нестабильности параметров функциональных узлов, $\Delta T(t)$, $\Delta f(t)$ – функции, характеризующие искажения временных и частотных параметров.

Статистическую оценку отличия искаженного сигнала $u_c(t)$ от идеального $u_{ид}(t)$, т.е. косвенную интегральную оценку уровня искажений, удобно проводить путем сравнения нормированных автокорреляционную функцию (АКФ) идеального и взаимнокорреляционную функцию (ВКФ) искаженного с идеальным сигналом

$$\rho_B(\tau) = \frac{1}{E} \int_{-\infty}^{\infty} u_c(t-\tau) u_{ид}^*(t) dt = \frac{1}{E} \int_{-\infty}^{\infty} [u_c(t-\tau) + \Delta u(t-\tau)] u_{ид}^*(t) dt = \rho_A(\tau) + \Delta\rho(\tau), \quad (2)$$

где $E = \int_0^{\tau_r} |u_c(t)|^2 dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |G_r(\omega)|^2 d\omega$ – энергия идеального сигнала, $\Delta\rho(\tau)$ – разность между ВКФ и АКФ.

Функция $\Delta\rho(\tau)$ или ее дискретное представление $\Delta\rho(i)$ может быть принята за интегральный показатель точности формирования сигналов. При этом для количественной оценки искажений удобно использовать ее среднеквадратическое значение – среднеквадратическую ошибку (СКО) [3]

$$\varepsilon_{\Delta\rho}^2 = \frac{1}{N} \sum_i (\Delta\rho(i))^2. \quad (3)$$

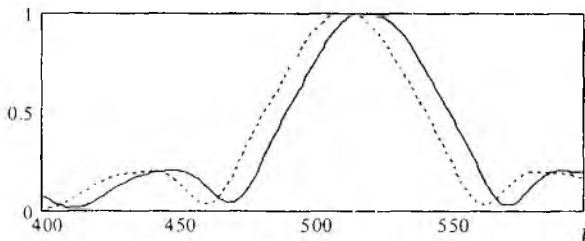


Рис. 2

На практике необходимо знать не конкретные параметры сигналов, а то, не выходит ли они за допуск. Статистический подход позволяет оперативно ответить на данный вопрос путем сравнения АКФ тестового (прерывистая линия рис. 2) и ВКФ исследуемого с тестовым сигналами (сплошная линия рис. 2).

С использованием выражения (3) отдельно рассчитываются зависимость среднеквадратической ошибки от величины отклонения центральной частоты, девиации частоты и длительности сигнала.

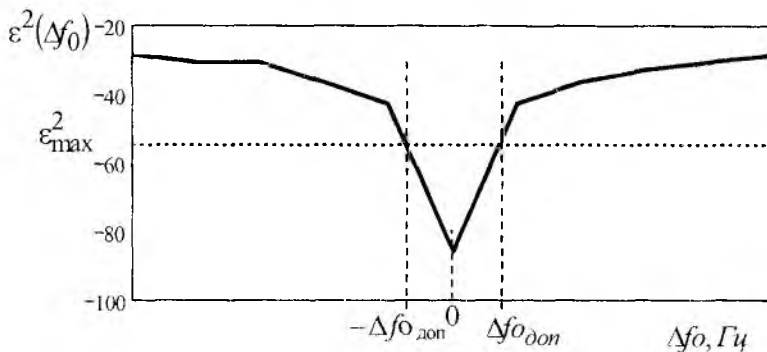


Рис. 3

Вид функции ошибки, например для отклонений центральной частоты, представлен на рис. 3. На этом же рисунке, кроме функции $\varepsilon^2(\Delta f_0)$ пунктирной линией обозначены максимально допустимые значения отклонения центральной частоты $\pm \Delta f_{0 \text{ доп}}$ и нормированная среднеквадратическая ошибка $\varepsilon_{\text{max}}^2$, которая характеризует уровень максимального среднеквадратического отклонения и представляет собой верхнюю границу поля допуска.

Алгоритмы работы измерительного комплекса

Алгоритмы работы рассмотрим на примере измерения параметров ЛЧМ сигналов. Измерительный комплекс должен определять следующие параметры сигналов: длительность импульса; знак скорости частотной модуляции; девиацию частоты и центральную частоту; отклонение частоты от линейного закона в течение длительности импульса; нестабильность начальной фазы радиоимпульсов. При этом требуемая точность измерения определяется коэффициентом точности $K_T = \delta_g / \delta_u$, где δ_g – допустимое среднеквадратическое значение отклонения параметра формируемого сигнала, δ_u – среднеквадратическое значение ошибки измерения параметра [2,4]. Следовательно, требуемая точность измерений вытекает из требований к допустимым отклонениям параметров формируемых сигналов, которые не превышают 0,5...1% от значений соответствующих параметров [5].

Алгоритмы прямых измерений. Входными данными для работы алгоритма прямых измерений является массив мгновенных значения исследуемого сигнала.

Измерение длительности радиоимпульса (рис. 4) осуществляется на уровне 0,1 от максимального значения его огибающей, полученной с помощью программно реализованного амплитудного детектора. При частоте дискретизации $f_d = 20 \text{ МГц}$ максимальная ошибка не превосходит 50 нс. Амплитудно-частотный спектр (АЧС) исследуемого сигнала находится с применением алгоритма дискретного преобразования Фурье. Далее на основе анализа АЧС оценивается девиация $\Delta f = f_b - f_n$, центральная частота $f_0 = (f_b + f_n)/2$ сигнала (рис. 5) и неравномерность вершины АЧС

$$\delta G = [(G_{\max} - G_{\min}) / G_{\max}] \cdot 100\%$$

Закон изменения мгновенной частоты определяется с использованием скользящего временного окна путем оценки несущей частоты коротких временных выборок.

Математическое моделирование и испытания по тестовому сигналу показали, что прямые методы позволяют измерять с требуемой высокой точностью только длительность и неравномерность АЧС сигнала. Обеспечивается также определение знака скорости частотной модуляции.

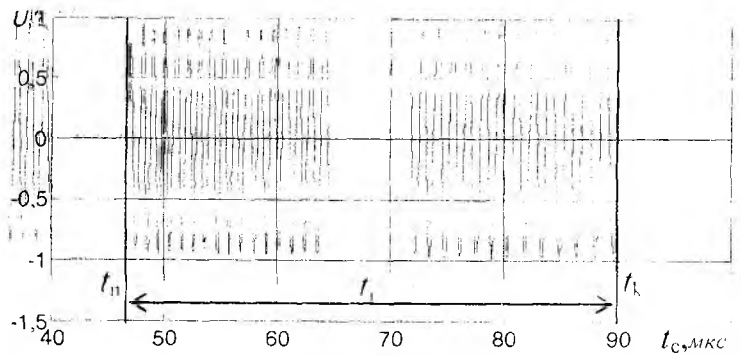


Рис. 4

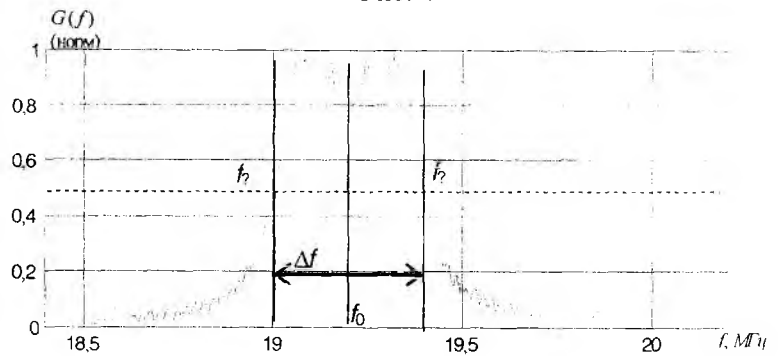


Рис. 5

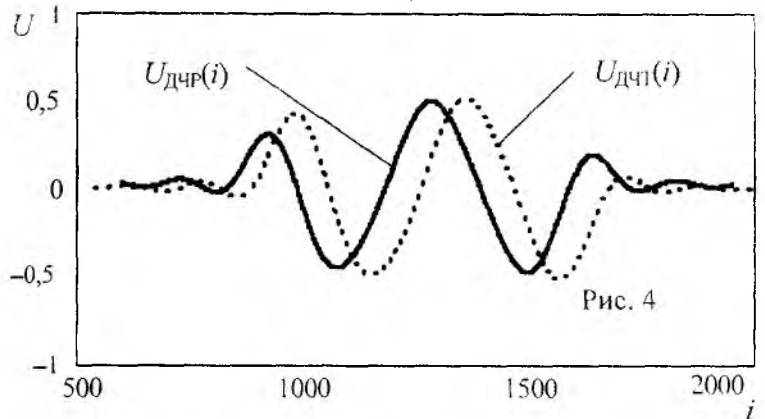


Рис. 6

Точность измерения центральной частоты f_0 и девиации частоты Δf , из за малого времени измерения (единицы – десятки мкс), недостаточна и составляет 2 – 10% от измеряемого параметра. Это обусловило необходимость использование косвенных статистических методов для измерения частотных параметров.

Алгоритмы косвенных методов измерения. В основу косвенного метода положена статистическая оценка разности идеального (тестового) и измеряемого сигналов на выходе дифференцирующего четырехполосника (ДЧ). Сигнал на выходе ДЧ $U_{\text{дч}}(t) = \cos(\beta t_z t + \omega_0 t_z + \beta t_z^2)$, где t_z – время задержки (см. рис. 6) несет информацию о скорости изменения частоты β и значении центральной частоты ω_0 . При программной реализации ДЧ находим $U_{\text{дчи}}(i)$, $U_{\text{дчр}}(i)$ (для идеального и реального сигналов) и функцию рассогласования

$$\Delta p(i) = U_{\text{дчр}}(i) - U_{\text{дчи}}(i) \quad (4)$$

По соотношению (3) находим среднеквадратическую ошибку.

Изменяя девиацию и центральную частоту идеального сигнала n раз с шагом необходимой точности измерения девиации и центральной частоты в пределах 5% от измеренного прямым

методом значения производим вычисления $U_{дчи}(i)$ и по соотношению (3) получаем значения среднеквадратической ошибки $\varepsilon^2(n)$ для n шагов измерений (рис. 7). Минимальное значение $\varepsilon^2(n)$ соответствует истинному значению девиации и центральной частоты.

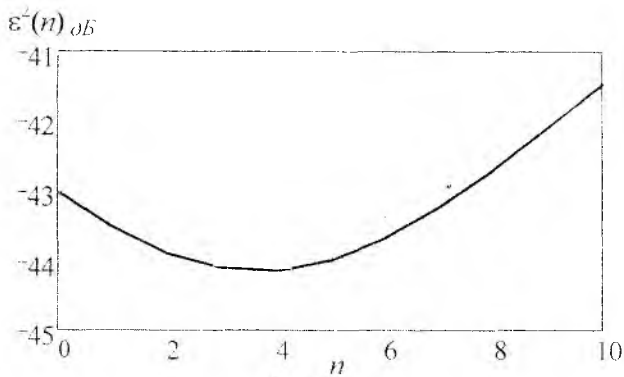


Рис. 7

Измерение нестабильности начальной фазы также осуществляется косвенным методом, основанном на когерентном накоплении ВКФ радиоимпульсов, следующих с одинаковым периодом. При реализации данного алгоритма необходима пачка из N ЛЧМ радиоимпульсов, которая обрабатывается программно реализованным согласованным фильтром. В результате получаем последовательность N ВКФ, следующих с периодом, равным периоду обрабатываемого сигнала. Далее осуществляется когерентное накопление ВКФ. В случае, если сигналы когерентны ($\Delta\varphi_0 = 0$), амплитуда сигнала увеличивается в N раз. Потери накопления за счет межимпульсных фазовых нестабильностей оценивались методом математического моделирования. Результаты расчетов показали, что нестабильность начальной фазы $\Delta\varphi_0 = 1$ соответствует потерям около 1 % при накоплениях 10 ВКФ.

Потери накопления за счет межимпульсных фазовых нестабильностей оценивались методом математического моделирования. Результаты расчетов показали, что нестабильность начальной фазы $\Delta\varphi_0 = 1$ соответствует потерям около 1 % при накоплениях 10 ВКФ.

Результаты испытаний аппаратно-программного измерительного комплекса

Предлагаемый измерительный комплекс состоит из аппаратной и программной части (рис. 8). Аппаратная часть (штриховая линия на рис. 8) предназначена для преобразования аналогового сигнала в цифровой с записью его в ЭВМ. Аппаратная часть состоит из согласующего усилителя, АЦП, буферного ОЗУ и блока синхронизации. Программная часть реализована с использованием объектно-ориентированного языка программирования под операционную систему Windows.

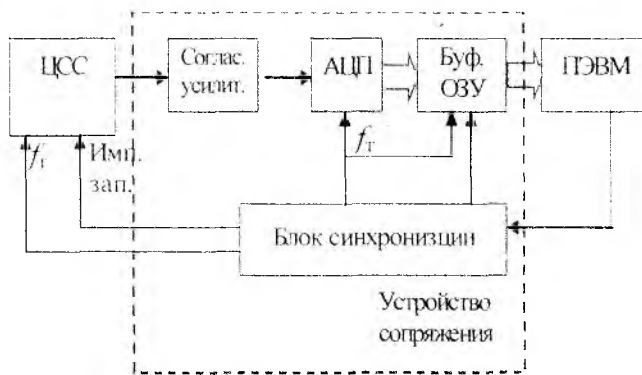


Рис. 8

Программа позволяет измерять длительность импульса, анализировать спектр сигнала, измерять девиацию и центральную частоту методом дифференцирующего четырехполюсника и проводить допусковый контроль, основанный на сравнении АКФ тестового и ВКФ тестового и реального сигналов.

Основанный на сравнении АКФ тестового и ВКФ тестового и реального сигналов.

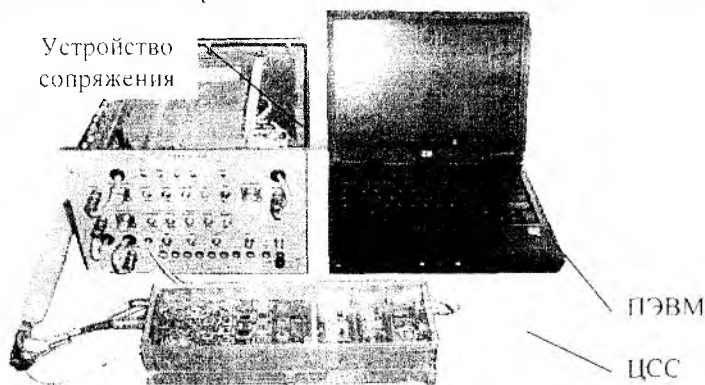


Рис. 9

В качестве источника исследуемых сигналов использовался цифровой синтезатор сигналов. Внешний вид измерительного комплекса и исследуемого ЦСС представлен на рис. 9.

Разработанная программа выполняется на ПЭВМ в операционной системе Windows и имеет удобный интерфейс взаимодействия измерительного комплекса с пользователем. Программа позволяет выбрать один из трех источников сигнала: 1) встроенный программный имитатор сигналов, который

позволяет имитировать до 10 ЛЧМ сигналов с разными параметрами. С помощью этих

сигналов проводится тестирование измерительного комплекса; 2) реальный ЦСС, сигнал которого оцифровывается в устройстве сопряжения; 3) файлы с ранее записанными реализациями реальных сигналов.

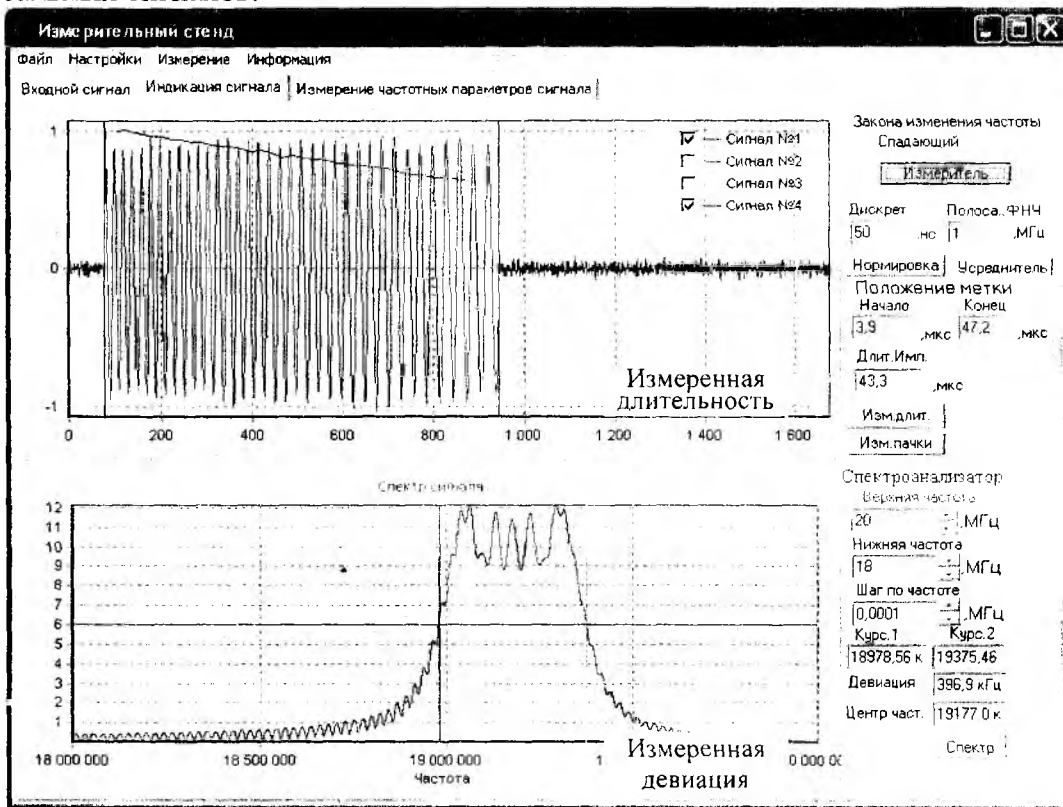


Рис. 10

Исследуемый сигнал отображается в статическом виде в основном окне интерфейса (рис. 10). Выбор прямого или косвенного метода измерений осуществляется переключением закладок в основном окне (рис. 11).

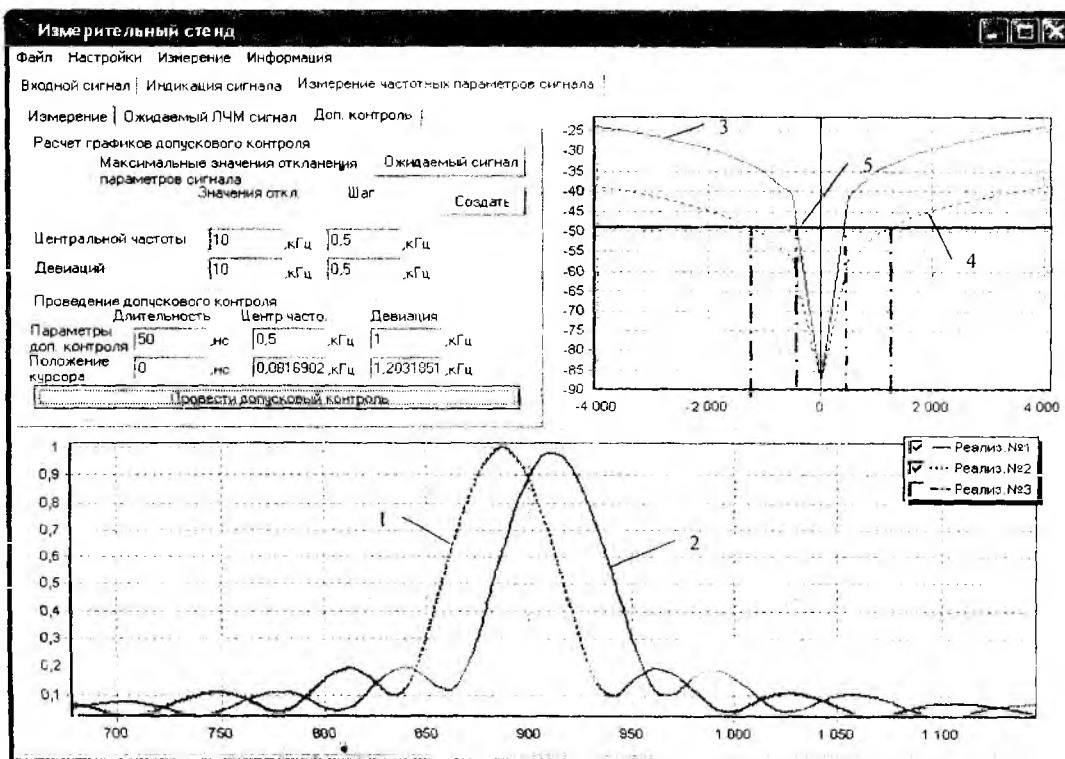


Рис. 11

Прямым методом измеряются длительность и параметры АЧС, определяется знак скорости ЧМ, а также осуществляется первичная грубая оценка девиации и центральной частоты формируемого ЛЧМ сигнала.

В программе под закладкой «Измерение частотных параметров» (см. рис. 11) реализованы косвенные методы измерения. На закладке «Ожидаемый ЛЧМ сигнал» устанавливаются параметры ожидаемого (тестового) ЛЧМ сигнала. На закладку «Доп. контроль» выведено управление допусковым контролем. С использованием выражения (3) строится график зависимости среднеквадратической ошибки (СКО) от величины отклонений от требуемых значений центральной частоты (кривая 3, рис. 11) и девиации частоты (кривая 4, рис. 11). По оси абсцисс откладывается значение отклонения частоты в герцах, а по оси ординат – величина СКО в логарифмическом масштабе. Таким же образом находится СКО функции ошибок $\varepsilon_{\text{ФЧД}}^2$ для реально сформированного сигнала (линия 5, рис. 11). Далее находится максимальное СКО реального сигнала (линия 5, рис. 11). Если абсциссы точек пересечения не выходят из поля допуска, то параметр в допуске. В нашем примере отклонение центральной частоты может составить не более 0,1%, а девиации частоты не более 0,21%, следовательно, можно утверждать, что параметры в допуске.

На закладке «Измерение» (рис. 12) устанавливаются параметры дифференцирующего четырехполосника. Выходное колебание после ФНЧ представлено на рис. 12, кривая 1. Кривая 2 на рис.12 отображает зависимость значений функции ошибки от разности девиации частоты тестового и исследуемого сигналов. Точность оценки отклонений девиации частоты и центральной частоты около 0.1%, что с запасом удовлетворяет требованиям.

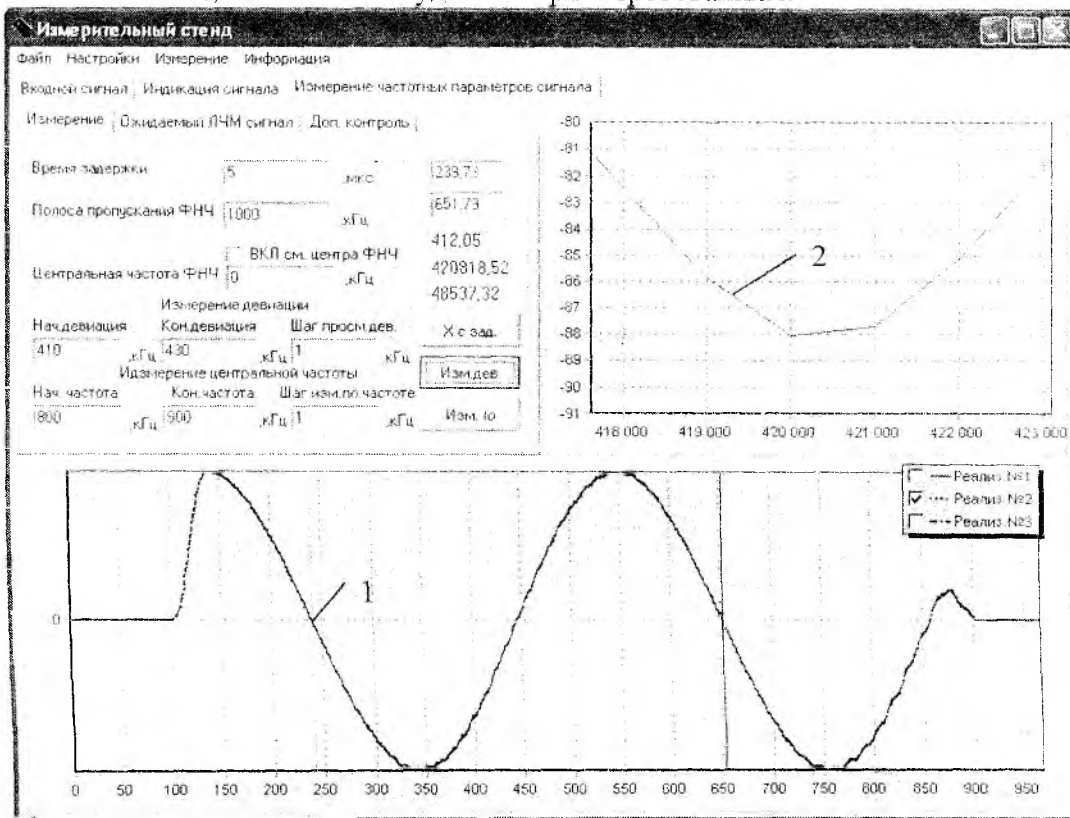


Рис. 12

Выводы

1. Предложенный аппаратно-программный измерительный комплекс позволяет заменить сложные измерительные стенды. При этом обеспечивается сравнимая или более высокая точность измерений.

2. Прямые методы измерения целесообразно использовать для измерения длительности, амплитудных параметров АЧС и определения знака ЧМ, а также для предварительной грубой оценки девиации и центральной частоты сигнала.

3. Для повышения точности измерений необходимо применение косвенных методов, основанных на накоплении статистической информации о структуре сигнала.

4. Испытания подтвердили возможность осуществления как допускового контроля сигналов по совокупности параметров, так и измерения с заданной повышенной точностью отдельных параметров.

Список литературы: 1. *Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Я.Д. Ширмана. М.: Радиотехника, 2007. 512 с.* 2. *Батулин Н. Г., Гомозов В. И., Зюкин А. В.* Измерение параметров линейно-частотно-модулированных сигналов и их нестабильностей. Ярославль: ООО "Торговая фирма "Норд", 2004. 176 с. 3. *Кондратьев С.Л., Карпин Ю.В.* О корреляционной оценке качества канала связи // Радиотехника. 1972. № 3. С. 93–95. 4. *Измерения в электронике: Справочник / В.А. Кузнецов, В.А. Долгов, В.М. Коневских и др. Под ред. В.А. Кузнецова. М.: Энергоатомиздат, 1987. 512 с.* 5. *Гомозов В.И.* Теория и техника формирования сложных СВЧ-сигналов с высокой скоростью угловой модуляции для радиотехнических систем: Харьков: Шуст А.И., 2002. 398 с.

*Харьковский национальный
университет радиоэлектроники*

Поступила в редколлегию 10.10.2007