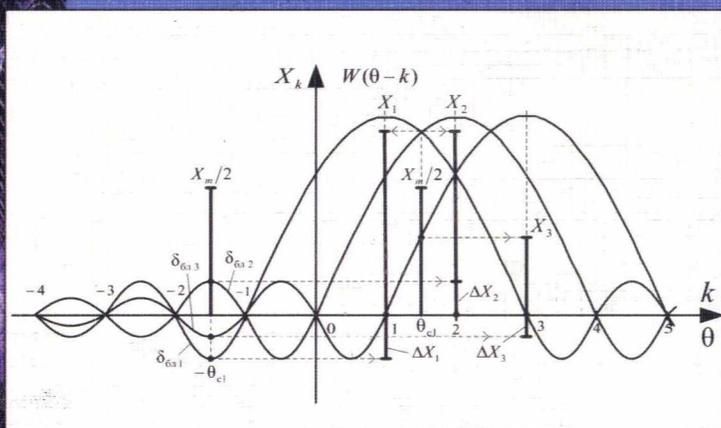




А. С. Глинченко, В. А. Комаров

Компьютерные спектральные измерения параметров сигналов



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

А. С. Глинченко, В. А. Комаров

**Компьютерные спектральные измерения
параметров сигналов**

Монография

Красноярск
СФУ
2010

УДК 621.396
ББК 32.811.3
Г54

Рецензенты:

ведущий научный сотрудник лаборатории специальных электрических измерений ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», академик Российской метрологической академии, д-р технич. наук С.А. Кравченко;
зав. кафедрой информационных систем МИРЭА, профессор В.К. Батоврин;
доцент кафедры информационных систем МИРЭА А.С. Бессонов

Глинченко А. С.

Г54 Компьютерные спектральные измерения параметров сигналов: монография / А. С. Глинченко, В. А. Комаров.– Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2010. – 176 с.

ISBN 978-5-7638-2000-3

Рассмотрено математическое и алгоритмическое обеспечение совместного спектрального измерения частоты, амплитуды и начальной фазы (разности фаз) гармонических и полигармонических сигналов, эффективное при реализации в современных ПЭВМ-приборах. Приведены результаты исследования и способы уменьшения погрешностей, в том числе связанных с отсутствием когерентной связи частот сигнала и дискретизации и измерениями по произвольному числу выборок сигнала.

Исследование и апробирование способов спектрального измерения выполнено с помощью исследовательского измерительного комплекса, разработанного с применением компьютерных измерительных технологий.

Для специалистов в области компьютерных измерений и цифровой обработки сигналов, а также бакалавров и магистров, обучающихся по соответствующим направлениям.

ISBN 978-5-7638-2000-3

УДК 621.396
ББК 32.811.3

©Сибирский федеральный
университет, 2010

Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ СОКРАЩЕНИЙ	9
ВВЕДЕНИЕ В СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ	10
Математическое обоснование спектрального измерения частоты сигналов	11
ГЛАВА 1. СПЕКТРАЛЬНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ПО СООТНОШЕНИЯМ АМПЛИТУД ЧАСТОТНЫХ ВЫБОРОК	14
1.1. Математическое обеспечение измерения частоты сигналов по соотношениям амплитуд частотных выборок	15
1.2. Измерение частоты вещественных гармонических сигналов	20
1.3. Способы оценки частоты по расширенным функциям измерения	29
1.4. Способы коррекции погрешности наложения	33
ГЛАВА 2. ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ИНТЕРПОЛЯЦИОННЫМ МЕТОДОМ	39
2.1. Математическое обоснование и обеспечение интерполяционного метода оценки частоты сигналов	40
2.2. Методические погрешности интерполяционных оценок частоты	41
2.3. Способы коррекции методической погрешности оценок частоты	43
2.4. Погрешности интерполяционного измерения частоты вещественных гармонических сигналов и способы их уменьшения	45
2.5. Коррекция погрешности наложения интерполяционных	

оценок частоты51

ГЛАВА 3. СОВМЕСТНОЕ СПЕКТРАЛЬНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ, АМПЛИТУДЫ И ФАЗЫ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ55

3.1. Особенности и задачи совместного спектрального измерения частоты, амплитуды и фазы сигналов56

3.2. Погрешности оценок амплитуды и фазы по одной частотной выборке ДПФ58

3.3. Оценки амплитуды и фазы по соседним частотным выборкам ДПФ63

3.4. Совместные интерполяционные оценки частоты и амплитуды гармонических сигналов69

3.5. Коррекция погрешности наложения оценок амплитуды и начальной фазы гармонических сигналов73

3.6. Измерение амплитуды и начальной фазы гармонических сигналов с помощью преобразования Фурье74

ГЛАВА 4. СЛУЧАЙНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ СПЕКТРАЛЬНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ78

4.1. Задачи анализа случайных погрешностей измерения параметров сигналов79

4.2. Случайные погрешности оценок частоты по отношению амплитуд частотных выборок80

4.3. Случайные погрешности оценок частоты по расширенным функциям измерения85

4.4. Случайные погрешности интерполяционных оценок частоты86

4.5. Случайные погрешности оценок амплитуды и фазы сигнала90

4.6. Усреднение при многократном измерении параметров сигнала в шумах97

4.6.1. Способы усреднения97

4.6.2. Усреднение при синхронизированном вводе реализаций сигнала98

4.6.3. Усреднение при непрерывном несинхронизированном вводе реализаций сигнала100

4.6.4. Анализ и моделирование погрешностей при усреднении

по спектрам амплитуд и мощности	102
4.6.5. Особенности коррекции погрешностей при многократных измерениях в шумах	107
4.6.6. Усреднение оценки начальной фазы сигнала при непрерывном несинхронизированном вводе	107

ГЛАВА 5. СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МНОГОТОНАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ

109

5.1. Измерение частоты комплексных многотональных сигналов по соотношению амплитуд частотных выборок	110
5.2. Интерполяционные оценки частоты комплексных многотональных сигналов	113
5.3. Измерение частоты вещественных многотональных сигналов	114
5.4. Моделирование измерения частоты многотональных сигналов	115
5.5. Измерение амплитуды и начальной фазы многотональных сигналов	118
5.6. Коррекция погрешностей наложения при измерении параметров многотональных сигналов	119
5.7. Моделирование измерения параметров многотональных сигналов в шумах	123

ГЛАВА 6. УПРАВЛЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЕМ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ ..

125

6.1. Измерение с одинаковой максимальной частотой дискретизации в заданном диапазоне частот	126
6.2. Измерение частоты с разбиением заданного диапазона частот на поддиапазоны	128
6.3. Измерение частоты сигнала с заданным постоянным соотношением частот дискретизации и сигнала	130
6.4. Особенности выбора частоты дискретизации для комплексных гармонических сигналов	131
6.5. Определение частоты дискретизации для негармонических сигналов	133
6.6. Задачи и способы управления измерением параметров сигналов	135
6.7. Алгоритмы автоматического управления измерением	

частоты гармонических сигналов	137
6.8. Автоматическое управление измерением частоты негармонических сигналов	138
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	140
ПРИЛОЖЕНИЕ А.	
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ КОМПЛЕКС СПЕКТРАЛЬНО-ВЕСОВОГО ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ	144
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.	
ФУНКЦИИ LABVIEW ВЫСОКОГО УРОВНЯ И ВИРТУАЛЬНЫЕ ЭКСПРЕСС-ПРИБОРЫ ДЛЯ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ	166
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	168

Предисловие

Монография посвящена спектрально-весовому измерению частоты и совместно измеряемых с нею амплитуд и начальных фаз (разности фаз при двухканальных измерениях) гармонических и многотональных сигналов. Такие измерения эффективно реализуются измерительными приборами на базе ПЭВМ и основываются на методах и алгоритмах цифровой обработки сигналов (ЦОС) в частотной области. Методы и алгоритмы ЦОС в настоящее время широко поддерживаются стандартными функциями многих систем (сред) программирования, таких как MatLab, Simulink, SystemVIEW, LabVIEW и др. Однако приложение методов ЦОС к задачам измерения имеет определенные особенности, понимание которых важно для их правильного и эффективного использования.

Наиболее ориентированной и оптимизированной на задачи компьютерных измерений является среда графического программирования LabVIEW [22]. Она включает довольно много функций (виртуальных приборов) низкого и высокого уровня, связанных с измерениями параметров сигналов, в том числе специализированных виртуальных экспресс-приборов [11]. Но и для их обоснованного применения недостаточно, как правило, доступной информации об используемых ими алгоритмах измерения, погрешностях, области применимости и т. д.

Поэтому данная монография призвана оказать помощь как при разработке собственного измерительного программного обеспечения на основе приводимых в ней математических алгоритмов измерения, включающих также и их анализ и исследование, так и при программировании с применением стандартных функций, в первую очередь функций цифровой обработки сигналов и измерения LabVIEW.

Среда графического программирования LabVIEW, имеющая большое самостоятельное значение, является также важнейшей компонентой компьютерных измерительных технологий корпорации

National Instruments, предоставляющей разработчикам совместимые с ней инструментальные модули ввода-вывода аналоговых сигналов в ПЭВМ (DAQ-устройства) [23]. Многообразие этих модулей (см. сайт <http://www.ni.com>) позволяет в кратчайшие сроки создавать ПЭВМ-приборы для работы в разных диапазонах частот с минимальной доработкой их программного обеспечения. Относительно высокая стоимость инструментальных средств *National Instruments* окупается их высокими метрологическими характеристиками и надежностью.

Применение высокоинформативных и точных методов спектрально-весаого измерения параметров сигналов требует значительных вычислительных ресурсов, которыми в полной мере обладают ПЭВМ-приборы.

Спектральные измерения выполняются по конечному числу выборок и не целому (в общем случае) числу периодов сигнала, частота дискретизации которого находится в некогерентном соотношении с его частотой. С этим связаны основные проблемы спектральных измерений параметров сигнала с некогерентной выборкой.

В монографии рассматриваются два метода спектрально-весаого измерения частоты сигналов. В обоих методах частота сигнала определяется по трем ближайшим к ней частотным выборкам дискретного преобразования Фурье (ДПФ) реализации сигнала, взвешенной весовой функцией. Методам измерения в свою очередь присущи также конкретные способы, которыми они реализуются.

Первый метод измерения частоты основывается на точной связи отношений амплитуд частотных выборок ДПФ с частотной характеристикой (преобразованием Фурье) весовой функции, по которой – аналитически или численно – находится соответствующая ей функция измерения. Это метод измерения частоты по соотношению амплитуд частотных выборок ДПФ, зависящий от вида весовой функции. Ему отвечает базовый способ реализации и его модификации.

Второй метод спектрально-весаого измерения частоты сигналов основывается на интерполяции частотной характеристики весовой функции по трем измеренным частотным выборкам ДПФ и называется интерполяционным методом. Функции измерения, по которым вычисляют измеренные значения частоты сигнала, не связаны в данном методе с конкретным видом весовой функции. Способы реализации метода определяются видом интерполирующей функции (ступенчатая, параболическая, логарифмическая

параболическая). Значение частоты при этом находится по положению центра тяжести или максимума интерполированной частотной характеристики весовой функции в области ее главного лепестка. Этому методу присущи погрешности интерполяции, но он не требует знания и вычисления частотной характеристики весовой функции.

В отличие от первого метода, где оценка частоты находится по отношению амплитуд двух частотных выборок, при измерении частоты интерполяционным методом одновременно используются все три частотные выборки. Поэтому данные методы имеют определенные различия в точности оценок параметров сигнала, которые исследованы в монографии.

Приводимые в монографии математические алгоритмы оценки частоты и совместно измеряемых с нею параметров сигнала – амплитуды и начальной фазы (разности фаз при двухканальных измерениях) непосредственно применимы для их программной реализации.

Исследование погрешностей оценок параметров сигналов осуществляется как с помощью аналитических методов, более универсальных и отражающих их природу, так и с помощью моделирования на ЭВМ. Сопоставление их результатов позволяет проверить адекватность аналитических оценок и моделей погрешностей.

Основной погрешностью измерения параметров чистых вещественных сигналов (без шумов), а для многотональных сигналов и комплексных, является погрешность наложения. Она вызывается прохождением побочных составляющих спектра сигнала через боковые лепестки частотных характеристик каналов ДПФ и наложением их на частотные выборки сигнальных составляющих, по амплитудам которых находятся параметры сигнала. Эта погрешность зависит от параметров частотной характеристики весовой функции, определяющей частотную характеристику каналов ДПФ, и степени близости побочных составляющих спектра к измеряемой сигнальной составляющей. Погрешность возрастает с уменьшением номера бина ДПФ сигнальной составляющей k , соответствующего целому числу периодов сигнала на длине реализации. Относительная погрешность измерения частоты при этом определяется как $dF/F = d\alpha/(k + \alpha)$, где $\alpha = 0, \dots, \pm 0,5$ – измеряемая дробная часть нормированной частоты сигнала $\theta_c = F_c/(f_d/N) = k + \alpha$, выраженной в бинах ДПФ: