

# PowerGraph

## Часть 6 - спектральный анализ

Измайлов Д.Ю., Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Россия

Спектральный анализ, позволяющий получить частотный состав временных сигналов, является наиболее распространенным видом анализа сигналов. Вот об этом и пойдет речь в очередной статье цикла публикаций о программном продукте PowerGraph, который, благодаря поддержке широкого спектра оборудования, наряду с мощными функциями цифровой обработки сигналов, используется во многих организациях в Украине.

Математической основой, связывающей временной сигнал с его представлением в частотной области, является преобразование Фурье. Большое количество литературы по цифровой обработке сигналов (ЦОС) посвящено именно преобразованию Фурье, поэтому в этой статье не будем останавливаться на теоретических основах, а рассмотрим прикладные возможности PowerGraph в области спектрального анализа: построение различных типов спектров; выбор размера и способа усреднения спектров; выбор весовой функции; дополнительные вычисления и калибровка спектров; статистические расчеты в частотных полосах; экспорт результатов спектрального анализа.

### Окно “Спектроанализатор”

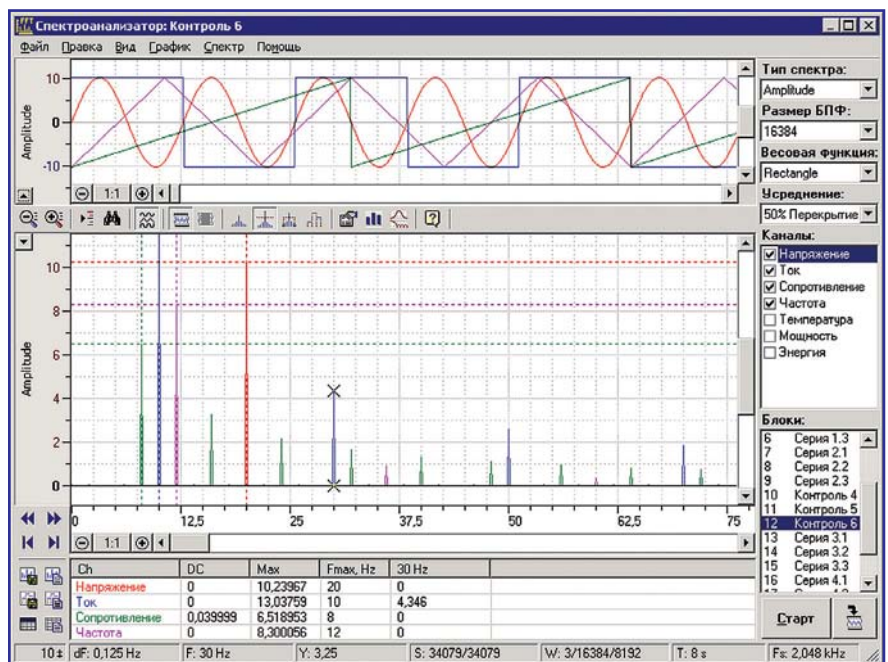
Для проведения спектрального анализа сигналов в PowerGraph используется дополнительное окно **Спектроанализатор**, которое вызывается соответствующей командой в меню **Анализ**. Окно спектроанализатора содержит два графических дисплея - **осциллографический** для отображения временного представления сигналов и **спектральный** для отображения частотного представления сигналов. Осциллографический и спектральный дисплеи могут одновременно отображать графики любого количества каналов одного блока данных. Анализируемые каналы выбираются в списке **Каналы** с помощью переключателей, а блок данных указывается в списке **Блоки**. Все вычисления и графические построения осуществляются автоматически при выборе каналов или блока, а также при изменении любых параметров спектрального анализа.

Осциллографический дисплей позволяет выделять произвольный временной участок сигналов для ограничения размера анализируемых данных. Выделение временного участка осуществляется стандартной операцией перемещения курсора над дисплеем при нажатой левой кнопке мыши. Удерживая клавишу SHIFT и используя клавиши навигации, область выделения можно перемещать вдоль шкалы времени. Для переключения между анализом данных для всего блока или для области выделения применяются команды меню **Спектр**:



- Весь блок** - анализ всех данных блока;
- Выделенная область** - анализ выделенной области данных.

Кроме построения спектров записанных данных, PowerGraph позволяет проводить спектральный анализ сигналов в **режиме реального времени**. Кнопка **Старт/Стоп**, расположенная под списком блоков, запус-



кает и останавливает регистрацию сигналов с одновременным построением их спектров. Спектральный анализ входных сигналов может сопровождаться записью данных в новый блок, либо осуществляться в режиме длительного мониторинга без сохранения данных.

В таблице под спектральным дисплеем отображаются характерные расчетные значения анализируемых каналов: **DC** - постоянная составляющая, **Max** - максимальное значение спектра, **F<sub>max</sub>** - частота максимального значения спектра, а также частота и значение спектра в произвольной точке под курсором. Содержимое этой таблицы можно скопировать в буфер обмена, либо добавить в таблицу значений блока.

В правой верхней части окна спектроанализатора располагаются 4 раскрывающихся списка, позволяющие выбрать основные параметры спектрального анализа: тип спектра, размер БПФ, весовую функцию и усреднение спектральных окон. Рассмотрим эти параметры подробнее.

### Тип спектра

Преобразование Фурье, лежащее в основе спектрального анализа, является математическим алгоритмом, результаты которого представлены в виде комплексных составляющих - реальной (Re) и мнимой (Im). Однако практический интерес представляют не сами комплексные составляющие, а их дальнейшая обработка. Преобразование Фурье описывает исходный сигнал набором синусоид с заданными частотами и поэтому позволяет получить две основные группы спектров, соответствующие параметрам синусоидального сигнала - амплитуде и фазе. Вычисление модулей комплексных составляющих дает амплитудно-частотные спектры, а вычисление отношений комплексных составляющих - фазово-частотные спектры.

В PowerGraph доступны следующие типы спектров:

- ◆ **Amplitude** - спектр амплитуды.
  - ◆ **Power** - спектр мощности.
  - ◆ **Log of Power, dB** - логарифм спектра мощности в децибелах.
  - ◆ **Attenuation, dB** - спектр усиления в децибелах.
  - ◆ **Abs Re** - абсолютное значение реальной составляющей.
  - ◆ **Abs Im** - абсолютное значение мнимой составляющей.
  - ◆ **Re** - реальная составляющая.
  - ◆ **Im** - мнимая составляющая.
  - ◆ **Phase ±1, P<sub>i</sub>** - фазово-частотный спектр в диапазоне от  $-\pi$  до  $+\pi$ .
  - ◆ **Phase, P<sub>j</sub>** - фазово-частотный спектр без разрывов.
- Последние два типа являются фазово-частотными спектрами, а остальные - амплитудно-частотными.

### Размер БПФ

Используемое в цифровой технике преобразование Фурье является дискретным, т.е. работающим с конечным количеством значений, поэтому для проведения вычислений необходимо указать размер анализируемых данных - число точек **N**. Эта величина непосредственно влияет на производительность вычислений и на характеристики получаемых спектров. Размер спектра равен половине размера обрабатываемых данных, т.е. число точек спектра равно  $N/2$ , а частотное разрешение спектра **dF** вычисляется по формуле:

$$dF = F_s / N, \text{ где } F_s - \text{частота регистрации данных.}$$

Максимальное значение частоты спектра всегда равно частоте Найквиста, т.е. половине частоты регистрации данных -  $F_s/2$ , а первое значение спектра всегда соответствует постоянной составляющей - **DC** (0 Гц). Между этими крайними значениями находятся  $(N/2)-1$  значений спектра с частотным шагом dF.

Для повышения производительности спектрального анализа в цифровых системах используется алгоритм **Быстрого Преобразования Фурье** (БПФ), суть которого заключается в существенном уменьшении количества вычислений, если размер обрабатываемых данных **N** равен в целой степени числа 2, т.е. число обрабатываемых точек равно  $2^n$ , где **n** - целое число. В PowerGraph используется именно этот производительный алгоритм, поэтому размер спектров выбирается в диапазоне от 128 ( $n=7$ ) до 1 048 576 ( $n=20$ ).

### Усреднение спектров

Размер БПФ определяет временную длительность **T** анализируемого участка сигнала:  $T = N / F_s$ . При анализе сигналов разной длительности необходимо подбирать соответствующий размер БПФ, но такой подход не всегда применим, особенно при спектральном анализе больших объемов данных. В таких случаях используется **оконое** преобразование, при котором весь сигнал разбивается на последовательные участки (окна) одинакового размера **N**. Для каждого такого участка осуществляется независимое преобразование Фурье, а затем вычисляется результирующий спектр как среднее спектров всех участков. Преимуществом оконного преобразования является возможность получения идентичных спектров для сигналов любой длительности, а также применение спектрального анализа в режиме реального времени, когда полный размер данных неизвестен до момента остановки регистрации.

Усреднение спектров является эффективным способом улучшения качества спектрального анализа, прежде всего за счет устранения случайных ошибок. Качеством спектрального анализа можно управлять, выбирая различную степень **перекрытия спектральных окон**. При перекрытии два соседних спектральных окна "накладываются" друг на друга и имеют общий участок сигнала. В результате увеличивается общее количество спектральных окон, т.е. увеличивается количество усреднений.

В PowerGraph доступны следующие режимы усреднения спектральных окон:

- ◆ **Без усреднения** - анализируется только начальный участок сигнала, соответствующий размеру БПФ;
- ◆ **Без перекрытия** - усреднение не перекрывающихся спектральных окон;
- ◆ **Перекрытие 25%, 50% и 75%** - усреднение с соответствующей степенью перекрытия спектральных окон;
- ◆ **Автоматическое перекрытие** - усреднение с автоматическим выбором степени перекрытия спектральных окон.

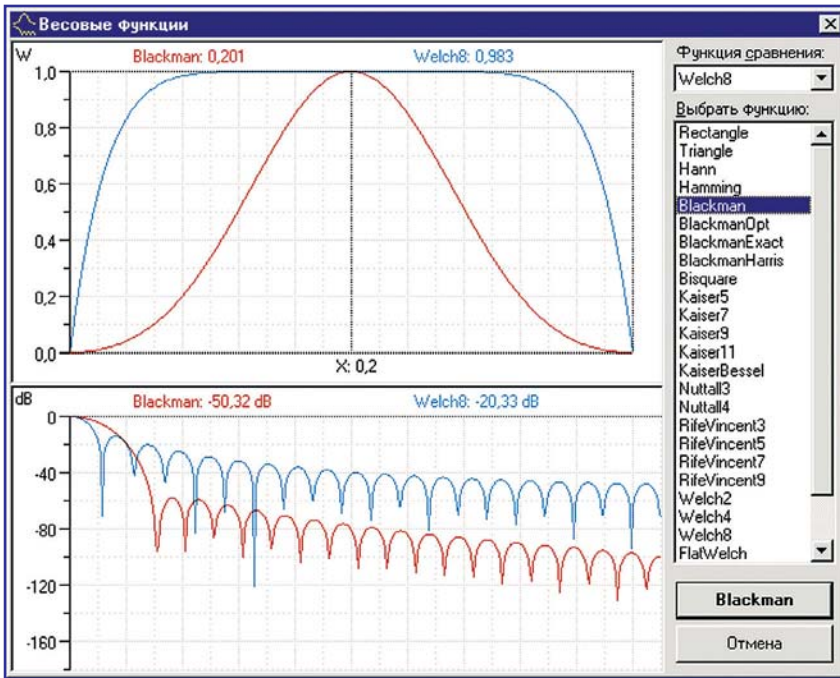
Следует иметь в виду, что усреднение спектральных окон применимо только к амплитудно-частотным спектрам и неприменимо к фазово-частотным спектрам.

### Весовая функция

Преобразование Фурье дает спектральные составляющие для фиксированного набора частот с шагом dF, однако реальная частота сигнала может не совпадать ни с

одной из этих частот. В этом случае наблюдается эффект расширения (англ. leakage - "растекание") спектра, который заключается в том, что на спектре появляются ложные гармоники реальной частоты сигнала. Для снижения эффекта расширения спектра применяют взвешивание, т.е. умножение значений временного сигнала на весовые коэффициенты. Определенный набор весовых коэффициентов называется **весовой** или **оконной функцией**. В статье, посвященной обработке сигналов в PowerGraph, весовые функции уже рассматривались (см. ПИКАД №2 2009) Напомним лишь, что эти функции увеличивают

значение спектра (Max), но PowerGraph также позволяет указать любое другое значение амплитуды. При многократном усреднении спектров в ре-



вклад значений, находящихся в центре спектрального окна, и снижают вклад значений, находящихся на краях спектрального окна.

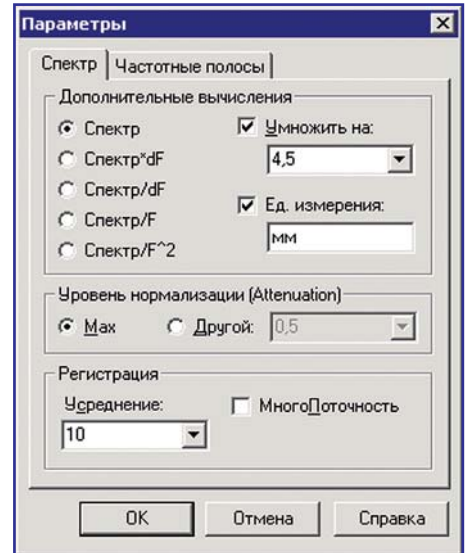
В PowerGraph доступны более 25 весовых функций с возможностью визуализации и сравнения их графиков. Команда **Весовая функция...** в меню **Спектр** вызывает диалоговое окно, содержащее временные и частотные графики весовых функций.

### Дополнительные параметры спектрального анализа

Команда **Параметры спектра...** в меню **Спектр** вызывает диалоговое окно с дополнительными параметрами спектрального анализа, включающими возможность проведения дополнительных вычислений:

- ◆ умножение и деление значений спектра на частотный шаг спектра **dF**;
- ◆ деление значений спектра на соответствующее значение частоты **F(i)** и квадрата частоты **F(i)<sup>2</sup>**;
- ◆ умножение значений спектра на произвольный коэффициент - калибровка спектров.

В дополнительных параметрах спектрального анализа указывается контрольный уровень для нормализации спектра **Attenuation**, относительного которого вычисляется усиление в децибелах. Обычно в качестве контрольного уровня нормализации используется максимальное зна-



жение реального времени результирующий спектр постепенно становится "нечувствительным" к последним изменениям входного сигнала. Для устранения этого эффекта в дополнительных параметрах спектрального анализа можно указать фиксированное количество усредняемых спектров.

### Частотные полосы

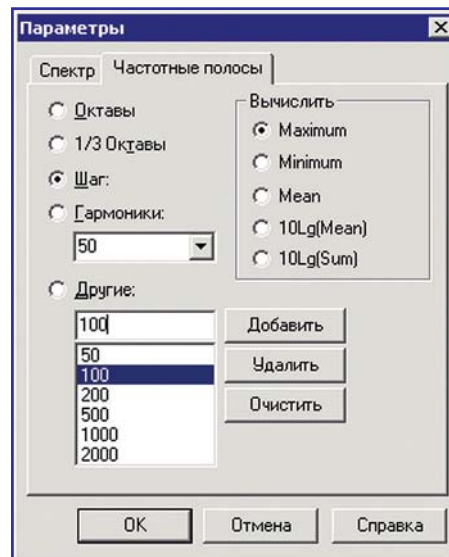


Кроме построения спектров, PowerGraph позволяет проводить статистические расчеты в заданных частотных полосах. Для выбо-

ра частотных полос и расчетного статистического значения используется диалоговое окно, которое вызывается командой **Частотные полосы...** в меню **Спектр**.

Программа предлагает следующие варианты выбора границ частотных полос:

- ◆ **Октавы** - границы музыкальных октав;
- ◆ **1/3 Октавы** - третьоктавные границы;
- ◆ **Шаг** - границы с равномерным шагом по частоте (например, 100, 200, 300, 400, ... Гц);



- ◆ **Гармоники** - границы с равномерным шагом и смещением (например, 50, 150, 250, 350, ... Гц);





◆ **Другие** - произвольные границы частотных полос, указанные пользователем.

В качестве расчетного значения могут быть использованы следующие статис-

тические величины:



- ◆ **Maximum** - максимальное значение;
- ◆ **Minimum** - минимальное значение;
- ◆ **Mean** - среднее арифметическое значение;
- ◆ **10Lg (Mean)** - значение среднего уровня звукового давления;
- ◆ **10Lg (Sum)** - значение суммарного уровня звукового давления.

Результаты расчетов в частотных полосах могут быть представлены на спектральном дисплее в виде индивидуальных графических уровней. Спектральный дисплей имеет несколько режимов визуализации спектров и частотных полос, которые переключаются командами меню **Спектр**:



-  **Спектр** - отображаются только спектры;
-  **Спектр и Максимум** - отображаются только спектры и маркеры максимальных значений;
-  **Спектр и Полосы** - отображаются спектры и расчетные уровни частотных полос;
-  **Полосы** - отображаются только расчетные уровни частотных полос.

### Экспорт результатов спектрального анализа

Результаты спектрального анализа можно экспортировать в текстовом формате для составления отчетов или использования в других программах. PowerGraph позволяет сохранять в файл и копировать в буфер обмена как сами спектры, так и результаты расчетов в частотных полосах. Для экспорта спектров используются следующие команды:

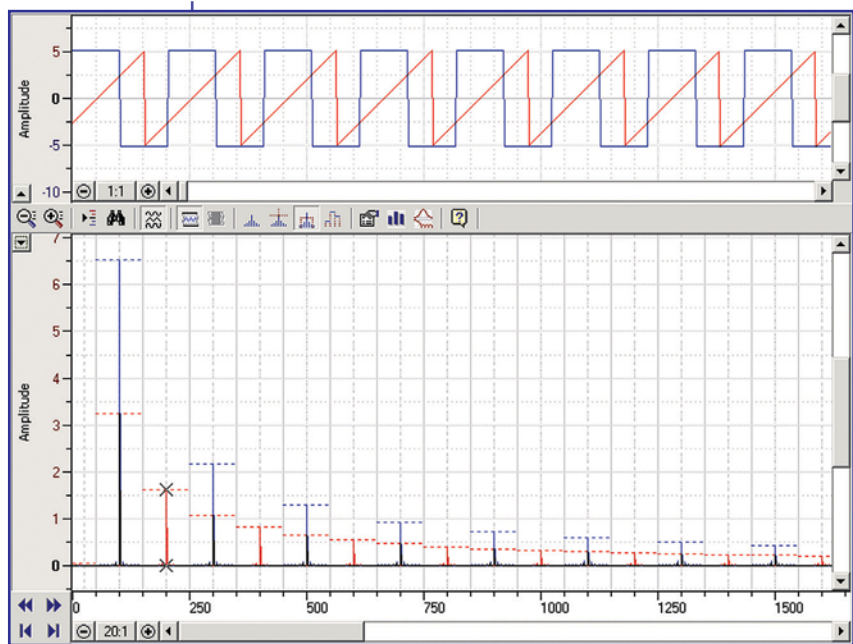
-  **Сохранить спектр...** в меню **Файл** - сохранить спектры в текстовый файл;
-  **Копировать спектр** в меню **Правка** - копировать спектры в буфер обмена.

Спектры экспортируются в виде таблицы, состоящей из столбцов значений, разделенных символом табуляции. Первый столбец содержит значения частоты в Герцах (Hz), а последующие столбцы содержат значения спектров всех анализируемых каналов. Для экспорта статистических значений частотных полос используются следующие команды:

-  **Сохранить полосы...** в меню **Файл** - сохранить значения частотных полос в текстовый файл;
-  **Копировать полосы** в меню **Правка** - копировать значения частотных полос в буфер обмена.

Результаты расчетов в частотных полосах также экспортируются в виде текстовой таблицы значений. В трех первых столбцах содержатся значения начальной, конечной и центральной частот каждой полосы, а последующие столбцы содержат значения анализируемых каналов.

Команда **Конвертировать спектр в Блок** в меню **Файл** конвертирует результаты спектрального анализа в отдельный блок данных, в котором шкала X содержит



значения частоты. Таким образом, файлы PowerGraph могут одновременно содержать как амплитудно-временное, так и амплитудно-частотное представление сигналов. Конвертирование спектров в блоки данных позволяет проводить дальнейшую математическую обработку результатов спектрального анализа с помощью многочисленных функций обработки сигналов, например, осуществлять арифметические действия над спектрами сигналов. При конвертировании спектров в блоки данных также становятся доступными расширенные возможности экспорта результатов спектрального анализа, включающие выбор каналов, прореживание данных, экспорт выделенного участка и использование других файловых форматов.

*Демонстрационная версия, позволяющая протестировать возможность применения PowerGraph для различных задач регистрации, обработки и анализа сигналов доступна в Интернете по адресу: [www.powergraph.ru](http://www.powergraph.ru).*

**☎ КОНТАКТЫ:**  
 тел: 007-495-961-47-30  
 e-mail: [soft@powergraph.ru](mailto:soft@powergraph.ru)

**АКЦИЯ!**  
 Дополнительная лицензия на PowerGraph за публикацию о внедрении программного продукта в журнале "ПиКАД"