

# КОМПЬЮТЕРНАЯ МАТЕМАТИКА В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

## MATHEMATICS IN MEASURING INSTRUMENTS

Дьяконов В.П. (V. Dyakonov), д.т.н., проф., Смоленский государственный университет

Основными задачами современной измерительной техники являются исследование явлений и процессов окружающего нас мира и создаваемых на их основе различных устройств и систем, а также измерение их параметров с приемлемой погрешностью. Ныне такое исследование трудно представить без компьютерной обработки результатов исследования. Порою без нее получение достоверных измерений просто невозможно. Компьютеры позволяют также управлять, даже из Интернет, измерительными приборами и нередко задавать алгоритмы их работы.

Упрощенная функциональная схема компьютеризированной измерительной установки для экспериментального исследования некоего испытуемого устройства показана на рис. 1. Она состоит из генератора тестовых сигналов, подаваемых на вход испытуемого устройства, и анализатора сигналов (осциллографа, анализатора спектра и т.д.) с выхода устройства. Генератор может отсутствовать, если исследуемые сигналы порождает само испытуемое устройство. Установка связана с персональным компьютером (ПК) через сеть LAN или шину USB.

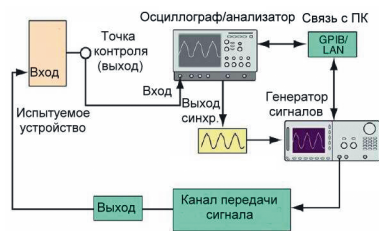


Рис. 1. Типовая функциональная схема исследования испытуемого устройства

Экспериментальное исследование дает исследователю и разработчику того или иного устройства возможность изучить реальные процессы в нем. Но, особенно при создании устройств на основе микроэлектроники и нанотехнологий, огромное значение имеют теоретические методы исследования и проектирования устройств и систем и математическое моделирование их работы. В этом случае широко применяются средства компьютерной математики [1-6]. Они позволяют исследовать свойства и поведение систем и устройств задолго до их натурной реализации и оптимизировать их характеристики, что значительно снижает время разработки устройств и внедрения в серийное производство.

В наше время имеется прогрессивная тенденция к интеграции средств экспериментальных измерений со средствами компьютерной математики. В крупной монографии автора [1] компьютерная математика определена как совокупность аппаратных и программных средств автоматического решения математических и основанных на них прикладных научно-технических и образовательных задач практически любой сложности. В этой статье сделана попытка показать роль и место компьютерной математики в современной индустрии радиоэлектронных измерений. Материал статьи был доложен на семинарах журнала «КИПиС» и на 10-й научной конференции «Системы компьютерной математики и их приложения», проведенной в Смоленском государственном университете (СмоЛГУ) в мае 2009 г.

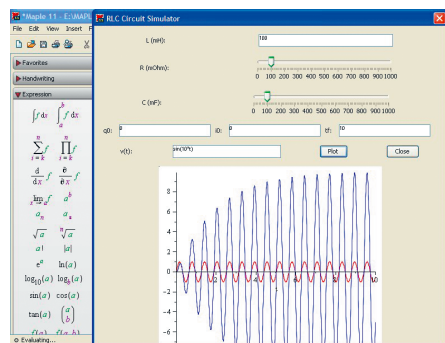


Рис. 2. Окно СКМ Maple с палитрами математических знаков (слева) и макет-окном моделирования переходных процессов в линейной RLC-цепи

К программным средствам компьютерной математики относятся системы компьютерной математики (СКМ) Mathcad, Maple, Mathematica, MATLAB и др. [2-7]. Все они имеют современный Windows-подобный интерфейс с удобными средствами набора математических выражений — чаще всего в виде палитры математических знаков (рис. 2). Некоторые из СКМ (Maple 12/13, Mathematica 6/7) имеют порядка 4000 функций для выполнения как простых, так и сложных математических и научно-технических расчетов. Получаемые в ходе математических вычислений и моделирования результаты (например, графические) поразительно схожи с реальными осциллограммами и диаграммами и порою являются более точными из-за отсутствия неизбежных в измерительных цепях паразитных параметров.

В наше время можно с уверенностью утверждать, что в число аппаратных средств компьютерной математики уже вошли многие современные цифровые измерительные приборы [8-13]. В первую очередь к ним относятся цифровые запоминающие осциллографы с расширенными функциями (в том числе математическими) по обработке осциллограмм наблюдаемых сигналов и генераторы сигналов и функций сложной и произвольной формы. Реализация таких чисто математических операций, как суммирование, перемножение, дифференцирование, интегрирование, сглаживание сигналов, быстрое преобразование Фурье (БПФ) стала вполне обычной в современных цифровых осциллографах, например серий 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000, 70000 и др. корпорации Tektronix и в приборах ряда других фирм. Некоторые современные приборы, например анализаторы спектра реального времени или анализаторы цепей, используют самые изысканные методы анализа и представления сигналов из арсенала компьютерной математики.

Необходимость в серьезных математических вычислениях, например интегрировании, возникает уже при проведении измерений параметров переменных напряжений (и токов) произвольной формы  $u(t)$  с периодом  $T$ , например: среднего значения (постоянной составляющей)

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt;$$

средневыпрямленного значения

$$U_{CP} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt;$$

эффективного или действующего значения

$$U_d = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt}.$$

В электротехнике при оценке мощности принято пользоваться действующим значением синусоидального напряжения и тока:

$$I_d = I_M / \sqrt{2} \quad \text{или} \quad U_d = U_M / \sqrt{2}.$$

Отклонение формы переменного напряжения от синусоидальной принято учитывать коэффициентом формы:

$$k_\Phi = U_d / U_{CP}.$$

Для прямоугольного сигнала (мандра)  $k_\Phi = 1$ , а для синусоидального

$$k_0 = \pi/2\sqrt{2} = 1,1107$$

(т.е. различие в оценках достигает 11%). При более сложных сигналах погрешность измерений их мощности может достигать 50%, что уже совершенно недопустимо. Поэтому ныне даже такие простые измерители напряжения и тока, как мультиметры, оснащаются средствами измерения истинных среднеквадратических значений (True RMS) переменных напряжений и токов [8]. В их основе лежит та или иная реализация представленных выше математических выражений.

**Примеры обработки сигналов в цифровых осциллографах**

Интерполяция между отсчетами  $e(t) \cong \sum_{i=0}^{2^m-1} a(i \cdot dt) \frac{\sin(2^m \pi f_{max}(t-i \cdot dt))}{2^m \pi f_{max}(t-i \cdot dt)}$

Представление сигнала набором дельта-функций:  $s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} y_k \delta(t - t_k)$

Комплексный ряд Фурье  $\hat{Y}_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} s_k W_N^k \exp(-j \frac{2\pi nk}{N})$

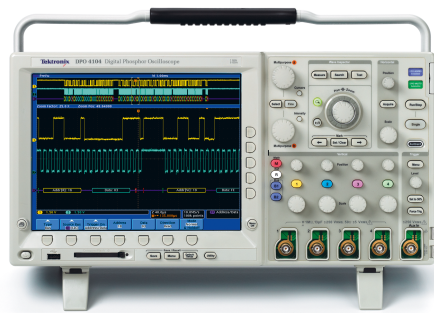
с взвешивающими окнами  $W_k = \sum_{m=0}^{M-1} a_m \cos(\frac{2\pi km}{M})$ , где  $0 \leq k \leq N$ .

Тип окна	a0	a1	A
Прямоугольное	1	0	0
Хэмминга	0,5	-0,5	0
Хэмминга	0,54	-0,46	0
С плоской вершиной	0,281	-0,521	0,198
Блэкмана-Харриса	0,423	-0,497	0,079

**Рис. 3. Некоторые методы компьютерной математики, используемые в цифровых осциллографах**

Намного дальше в использовании средств компьютерной математики пошли разработчики цифровых осциллографов. Последние, как и многие другие современные цифровые приборы, представляют измеряемый сигнал в виде ряда дискретных отсчетов  $y_0, y_1, \dots, y_{N-2}, y_{N-1}$ , обычно размещаемых через постоянные (реже произвольные) промежутки времени и хранящихся в памяти. Для представления такого сигнала на экране прибора используется ряд типовых методов компьютерной математики (рис. 3). Из них, в первую очередь, стоит отметить методы интерполяции сигналов, представленных ограниченным числом отсчетов (порядку до 3-5 при интерполяции по базису Котельникова типа  $\sin(x)/x$ ), и их представления на экране дисплея. Они положены в основу отображения осциллограмм в современных цифровых осциллографах [7-9].

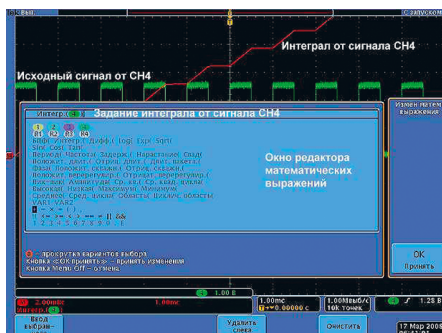
Для реализации тех или иных средств компьютерной математики важное значение приобретает архитектура аппаратных средств измерительных приборов. Ныне все цифровые приборы имеют встроенный микрокомпьютер на основе микропроцессора (или даже нескольких микропроцессоров). Дешевые и массовые приборы, например цифровые запоминающие осциллографы Tektronix серий 1000/2000/3000, обычно реализованы на основе закрытой архитектуры, основанной на применении специализированного встроенного компьютера. Это удешевляет приборы, поскольку они не требуют применения персональных ком-



**Рис. 4. Осциллограф DPO4101 со средством Wave Inspector, длинной памятью и математическим редактором (прибор имеет 4 канала с полосой частот каждого до 1 ГГц и частотой выборок 5 ГГц)**

пьютеров (ПК). Такие приборы обычно имеют до 10-15 автоматических измерений, реализующих приемы обработки массива данных осциллограмм, а также некоторые средства компьютерной математики на основе формул, в том числе показанных на рис. 3. Впрочем, некоторые новейшие типы бюджетных цифровых осциллографов, например АКТАКОМ АСК-2xxx, уже имеют 28 автоматических измерений [9]! В их числе многие амплитудные, временные и частотные измерения.

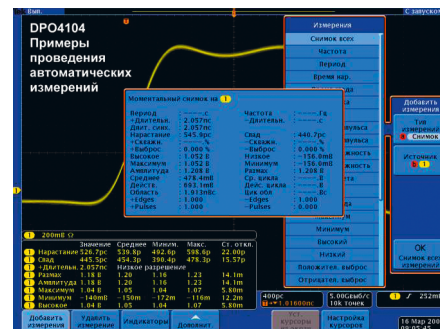
Осциллографы с закрытой архитектурой среднего класса, например серии Tektronix DPO/MSO4000 (для обычных и смешанных сигналов) реализуют технологию «цифрового фосфора» и имеют гораздо более мощные математические возможности. Так, в DPO4000 (рис. 4) было впервые введено средство Wave Inspector, позволяющее просматривать длинные данные (до 10 Мбайт на канал) с меняющейся скоростью удобным вращением двух совмещенных круглых ручек — одна перемещает окно просмотра вдоль цепочки данных, а другая меняет ширину окна. С позиций математики это означает введение прямоугольного перемещаемого временного окна, которое используется для реализации «лупы времени» (удобного средства просмотра деталей сложных сигналов) и выполнения быстрого оконного преобразования Фурье (БПФ). Возможна автоматическая и ручная прокрутка окна, простановка меток его положения для последующего быстрого перехода к ним, привязка окон к особенностям осцилло-



**Рис. 5. Пример работы с редактором математических формул осциллографа DPO4104**

грамм и регулируемое по скорости ускорение/замедление перемещения окна. Ныне Tektronix ввела это оригинальное фирменное средство и в младшие модели своих приборов, что привело к дальнейшей унификации их внешнего вида и органов управления приборами.

Но осциллографы DPO/MSO4000 удобны не только этим. Они имеют редактор математических формул, применяемых для обработки осциллограмм и подготовки опорных (расчетных) осциллограмм. Таким образом, в осциллографы заложены типичные возможности СКМ, обычно используемые учеными и инженерами для задания и обработки сигналов при их теоретическом и экспериментальном исследовании. На рис. 5 показано окно редактора математических формул и пример проведения операции интегрирования для наблюдаемой осциллограммы (она показана зеленым цветом, а кривая интеграла — красным цветом). К сожалению, математическая нотация формул при их вводе в редакторе строго не выдержана и некоторые функции приходится задавать сокращенными словами, например, «Интегр.» для функции интегрирования. Это повод переходить к СКМ, где формулы задаются намного удобнее и естественнее. Такая возможность есть почти у всех приборов, даже с закрытой архитектурой.



**Рис. 6. Пример вывода автоматических измерений в осциллографе DPO4101**

Осциллографы DPO/MSO4000 с новым фирменным программным обеспечением (оно обновляется загрузкой из Интернета) имеют 29 автоматических измерений и выводят внизу таблицу до 8 измерений (против 25 и 4, соответственно, изначально) — рис. 6. Можно также вывести окно с данными всех автоматических измерений одновременно. Рис. 6 дает хорошее представление о технике работы с меню осциллографа, которая очень напоминает работу в меню СКМ. Автоматические измерения превращают осциллограф в целый измерительный комплекс, заменяющий осциллографы, анализаторы спектра, частотомеры, вольтметры и др. приборы. А осциллографы смешанных сигналов серии MSO выполняют еще и функции логических анализаторов, отображая логические диаграммы — до 16 цифровых сигналов.

С появлением СКМ резко возрос интерес к программному спектральному анализу сигналов с помощью рядов Фурье (или Фурье-анализу). Это связано с тем, что такой анализ дает новое качество для оценки сигналов — их частотное представление. В целом ряде случаев оно предпочтительнее временного представления, характерного для обычных осциллограмм. Например, частотное представление позволяет легко выявлять и отфильтровывать слабые синусоидальные компоненты сигналов на фоне шумов, оценивать степень даже слабой нелинейности систем, вычислять коэффициент нелинейных искажений (гармоник), оценивать вид и параметры модуляции синусоидальных сигналов и т. д. Основные математические соотношения для представления спектра периодических сигналов представлены на рис. 7. Они подробно описаны [7-11] и потому здесь подробно не обсуждаются.

**Спектральный анализ периодических сигналов**

Ряд Фурье 
$$y(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^N M_k \cos(2\pi kft + \phi_k)$$

Модуль и фаза гармоник  $M_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$   $\phi_k = -\arctan(b_k / a_k)$

Коэффициенты Фурье  $a_k = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \cos(2\pi kft) dt$   $b_k = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \sin(2\pi kft) dt$

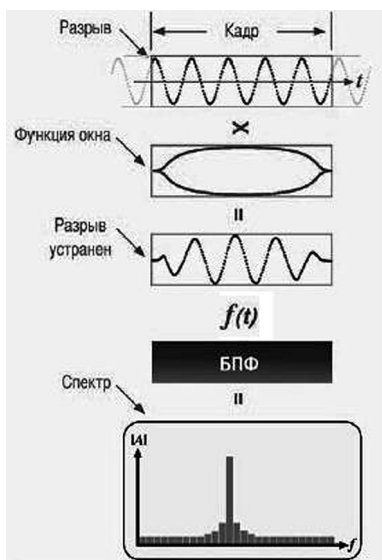
Вычисление коэффициентов Фурье методом прямоугольников:

$$a_k = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N y_n \cos\left(\frac{2\pi kn}{N}\right) \quad \text{и} \quad b_k = \frac{2}{N} \sum_{n=1}^N y_n \sin\left(\frac{2\pi kn}{N}\right)$$

Недостатки: низкая скорость и большая погрешность из-за эффекта Гиббса

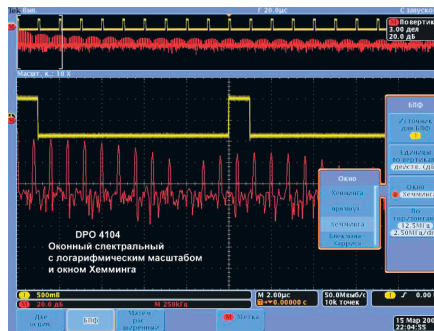
**Рис. 7. Основные соотношения для Фурье спектрального анализа**

К сожалению, ограничение числа преобразуемых отсчетов ведет к тому, что в общем случае полученный сигнал приобретает на концах разрывы, что приводит к появлению в его спектре несуществующих спектральных линий. При этом спектр из линейчатого становится сплошным и, порой, искажается до неузнаваемости. При восстановлении сигнала по его спектру сказывается и известный эффект Гиббса — появле-



**Рис. 8. Иллюстрация спектрального анализа с применением временного окна**

ние характерных колебаний в местах разрывов при ограничении числа гармоник. Для устранения этого и повышения разрешающей способности спектрального анализа используется оконное дискретное преобразование Фурье (ДПФ). Оно заключается в введении в формулу ДПФ весовых множителей  $W_k$  (см. выражение для комплексного дискретного ряда Фурье на рис. 4). Число типов окон в осциллографах составляет от 3 до 6 и имеет тенденцию к росту.



**Рис. 9. Спектральный анализ прямоугольных импульсов с помощью осциллографа DPO4101**

Временное окно с плавно спадающими до нуля границами обеспечивает спад вырезанного сигнала на границах начала и конца кадра анализируемого сигнала (рис. 8). В результате спектр одной синусоиды приобретает вид пика с небольшими боковыми лепестками. Вид этого пика и его лепестков зависит от спектра примененного временного окна. Его можно менять и с помощью частотных окон. О выборе типа окон и их спектре достаточно сведений есть в [10, 11]. Окна принято называть по их виду или по фамилии исследователей, впервые их предложивших.

Нередко предпочтительны окна с наименьшим уровнем боковых лепестков в их спектре. В осциллографах Tektronix серий 5000, 6000 и 7000 наряду с хорошо известными окнами (прямоугольным, Блэкмана, Хэннинга, Хэмминга и др.) применяются специальные типы: окно Кайзера-Бесселя с уровнем боковых лепестков менее -67 дБ, окно Блэкмана-Харриса с уникально малым уровнем боковых лепестков (менее -92 дБ), окно Плоское 2, тоже с очень малым уровнем боковых лепестков (менее -90 дБ) и уникальное несимметричное экспоненциальное окно разработки корпорации Tektronix с уровнем боковых лепестков менее -67 дБ и треугольным видом пика спектральной линии. Несмотря на это, по числу применяемых окон цифровые осциллографы все еще заметно уступают СКМ, где их число достигает 20-25 и может задаваться пользователем. Разработка окон с очень малыми боковыми лепестками остается актуальной математической задачей в измерительной технике и решается применением СКМ с после-

дующей реализацией в приборах на микропрограммном уровне.

Большинство современных цифровых осциллографов и анализаторов спектра реализует быстрое преобразование Фурье (БПФ) — особый алгоритм ДПФ, позволяющий уменьшить число комплексных умножения до  $(N/2) \cdot \log_2 N$ , где  $N$  — число дискретных отсчетов сигнала. Это достигается, если число отсчетов составляет  $2^k$ , где  $k$  — целое число. Если это не так, добавляются нулевые отсчеты. Обычное ДПФ требует  $N^2$  комплексных умножений. При  $N$  порядка 1000 и более уменьшение числа операций и ускорение Фурье-анализа могут достигать трех и более порядков. Любопытно, что по времени реализации БПФ измерительные приборы обогнали СКМ — у многих из них преобразования Фурье были изначально реализованы в аналитическом виде, а средства БПФ появились лишь в последних версиях. Это говорит о взаимном обогащении средств СКМ и современной измерительной техники.

На рис. 9 представлено построение спектра прямоугольных импульсов с помощью осциллографа DPO4104, полученных вырезкой из сигнала с помощью средства Wave Inspector (вырезаемая часть отмечена в верхней части экрана большими белыми квадратными скобками). Спектр построен с логарифмическим масштабом, что расширяет динамический диапазон спектра, но приводит к появлению заметной шумовой дорожки внизу спектра. На рисунке



**Рис. 10. Первые осциллографы корпорации Tektronix серии TDS5000 с открытой архитектурой**

показано также меню спектрального анализа (справа) и выбор с его помощью вида окна. Нетрудно заметить, что возможен как логарифмический, так и линейный масштаб спектров. Разрешающая способность спектрального анализа зависит от числа выборок сигнала и тем выше, чем больше память осциллографа под хранение выборок. Именно поэтому есть явная тенденция к увеличению емкости этой памяти. К сожалению, возможность плавной установки ширины окна у этих приборов отсутствует.

Теперь перейдем к другому классу осциллографов — с открытой архитектурой. Они строятся на основе обычно-

го ПК, наследуя все его возможности по цифровой обработке и визуализации сигналов. Ныне они хорошо отработаны с помощью тех же СКМ. Стоимость массовых ПК не очень велика и при конструировании дорогих осциллографов высокого класса их построение на основе открытой архитектуры становится предпочтительным и умеренно дорогим. В частности благодаря возможности их интеграции с СКМ.

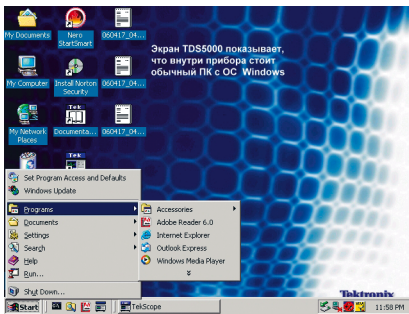


Рис. 11. Экран осциллографа TDS5000 с открытой архитектурой

Первыми приборами корпорации Tektronix этого класса стали осциллографы серии TDS5000 (рис. 10). Эти приборы имеют полосу исследуемых частот от 0 до 350, 500 и 1000 МГц при 2-х или 4-х каналах. Одно время выпуск этих приборов был прекращен из-за появления более совершенных и более дорогих приборов серии 7000. Но, ввиду дешевизны и массового спроса на такие приборы, он был возобновлен.

Принадлежность TDS5000 к ПК видна с первого взгляда на его экран (рис. 11). Он представляет собой типичный экран ПК с операционной системой Windows 2000. Прибор имеет встроенный жесткий диск достаточного объема, небольшую часть которого занимает операционная система Windows 2000. Это означает, что на жесткий диск этого осциллографа может быть загружена любая СКМ, например, Mathcad или MATLAB. Эти две СКМ, изначально лидирующие в области численных методов вычислений, и рекомендуются в описаниях к прибору и его специальным программным средствам в качестве дополнительных средств расширения его функциональных возможностей. Например, для анализа джиттера цифровых устройств, исследования телевизионных сигналов, от-



Рис. 12. Пример построения осциллограммы сигнала SIN(CH1)+CH2 осциллографом TDS5000

ладки импульсных источников электропитания и др.

У этого осциллографа интересно решен редактор математических вычислений (рис. 12). Для их задания используется панель математических выражений, расположенная внизу экрана. Работа с ней вполне очевидна. На рис. 12 показан пример построения осциллограммы в виде синуса сигнала первого канала, просуммированного с сигналом второго канала. Видно, что в приборе используется Windows-подобный интерфейс.

На рис. 13 показан пример задания автоматических вычислений у осциллографа TDS5000. Внизу его экрана представлена панель выбора автоматических измерений с пятью вкладками для амплитудных, временных и иных измерений и диаграмм. Вывод результатов автоматических измерений в виде желтых надписей с прозрачным фоном довольно оригинален, так как позволяет избежать сужения поля самих осциллограмм и не заслоняет участки осциллограмм, накрытые надписями таблицы автоматических измерений. Элементы интерфейса прибора имеют строгий, но очень наглядный вид.



Рис. 13. Настройка вывода результатов автоматических измерений у осциллографа TDS5000

Разумеется, панели снизу экрана всегда можно убрать и получить экран только с осциллограммами и результатами автоматических вычислений. Стоит обратить внимание на то, что в таблице автоматических измерений приводятся не только текущие результаты автоматических вычислений, но и их текущие статистические параметры: среднее значение, максимальное и минимальное значение, среднеквадратичное отклонение и объем выборки. Они вычисляются осциллографом по мере его работы и позволяют постоянно судить о точности и стабильности измерений.

Ныне ту или иную реализацию ДПФ имеют все цифровые осциллографы. Вовсе не обязательно, что лучшей является реализация в дорогих осциллографах. Зачастую вполне приемлемый характер спектра дают даже дешевые приборы. Однако, у простых приборов установки параметров спектрального анализа зависят от установки скорости развертки. Заметно это и у модели TDS5000 (рис. 14). Независимый выбор



Рис. 14. Пример спектрального анализа без настройки осциллографа TDS5034B

параметров спектрального анализа от параметров установки развертки, к сожалению, невозможен.

Спектр вырезки треугольного сигнала, выданный осциллографом TDS5034B без настройки (рис. 14), разочарует тех, кто надеется на то, что вид спектра будет похож на приводимый в учебниках по спектральному анализу. Спектрограммы получаются далекими от идеальных (в виде вертикальных отрезков прямых) и сильно засорены шумами. Требуется серьезная настройка осциллографа для получения более приемлемого вида спектра. Но есть и важное достоинство — осциллограф этого типа, помимо амплитудного спектра, позволяет строить и фазовый спектр (средняя фиолетовая кривая на рис. 14).

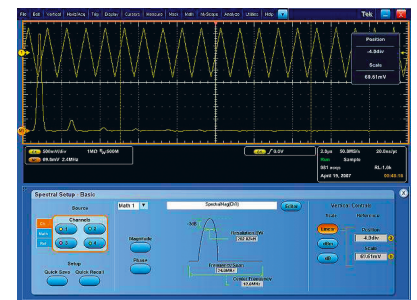


Рис. 15. Спектральный анализ с помощью осциллографа DPO7000

Осциллографы более высокого класса с открытой архитектурой, например серии Tektronix 7000/70000 имеют более совершенные средства спектрального анализа. Пример спектрального анализа треугольного сигнала у осциллографа DPO7000 показан на рис. 15. Обратите внимание на то, что (как и у TDS5000) при построении спектра можно задать область частот, используя три параметра: центральную частоту (Center Frequency), полосу пропускания частот (Frequency Span) и разрешение (ширину спектральной линии — Resolution BW).

(Продолжение следует)

*In this article attempt to show a role of computer mathematics in the modern industry of radio-electronic measurements is made.*

# КОМПЬЮТЕРНАЯ МАТЕМАТИКА В ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКЕ

## MATHEMATICS IN MEASURING INSTRUMENTS

Дьяконов В.П. (V. Dyakonov), д.т.н., проф., Смоленский государственный университет

(Окончание, начало см. № 5-2009)

Именно так и задается область частотного анализа у современных анализаторов спектра радиочастот. Такие приборы иногда неплохо справляются с получением спектра узкополосных (например, амплитудно-модулированных) сигналов. Разрешающая способность их при спектральном анализе улучшается с ростом числа отсчетов и памяти под них. А она выше у дорогих моделей. В целом же, осциллографы предназначены, в основном, для получения спектра видеосигналов, тогда как специальные анализаторы спектра ориентированы на получение спектра радиосигналов с невысокой относительной полосой частот. Впрочем, из этого правила есть и исключения.

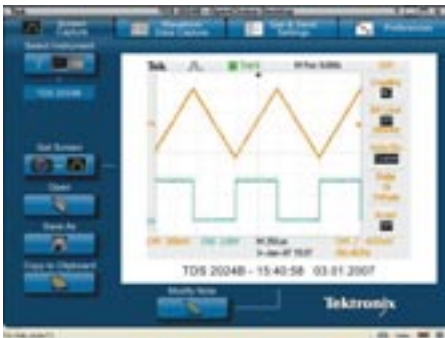


Рис. 16. Окно программы OpenChoice

Цифровые осциллографы оснащены довольно простыми фирменными программами, обеспечивающими ввод осциллограмм в ПК для их последующей обработки. К примеру, осциллографы фирмы Tektronix могут использовать программы OpenChoice (рис. 16) или NI Signal Express (рис. 17). При этом последняя программа имеет обширные средства по обработке осциллограмм, включая их представление на экране компьютера, проведение автоматических вычислений, спектральный анализ, построение частотных характеристик и т.д.

Однако поистине неисчерпаемые возможности открывает совместная работа осциллографов (да и других приборов) с современными СКМ. Несомненно, тут лидирует мощная матричная лаборатория MATLAB, имеющая многие десятки пакетов расширения в различных областях науки, техники и производства, например в области обработки сигналов [3], вейвлет-преобразований [6], био-

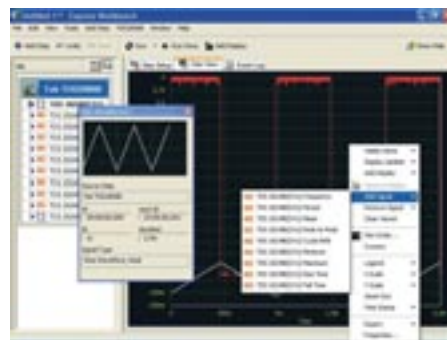


Рис. 17. Пример работы с программой NI Signal Express

информатики, искусственного интеллекта и т. д. На рис. 18 представлена небольшая выборка функций для работы этой системы с измерительными приборами. Они входят в состав специального пакета расширения Instrumental Toolbox, предназначенного для стыковки с MATLAB огромного числа цифровых измерительных приборов всех ведущих фирм мира.

Простые программы на языке системы MATLAB для ввода осциллограмм в ПК описаны в [10, 12]. Такие программы идентифицируют осциллограф и распознают файлы осциллограмм формата .CSV. После ввода данных осциллограмм в рабочую область системы MATLAB доступны все возможности последней по обработке сигналов (рис. 19). Могут обрабатываться и сложные сигналы, например изображений.

Спектральный анализ на простых осциллографах имеет ряд недостатков. Например, у приборов Tektronix массовых серий 1000/2000 он возможен только в логарифмическом масштабе, что ведет к сильному проявлению шумов и искажению вида спектра, представленного часто в линейном масштабе, мало число окон. Это можно устранить, применяя СКМ. На рис. 20 представлен пример построения спектра прямо-

### Функции пакета расширения MATLAB Instrument Control Toolbox

```
instrhwinfo - возвращает информацию об устройстве;
visa - конструирование VISA-объекта;
fopen - подключение VISA-объекта к прибору;
query - запрос/чтение форматированных данных с прибора;
fprintf - запись текста в прибор;
fclose - отключает связь с прибором;
binblockread - чтение блоками данных с прибора.
```

Рис. 18. Подборка функций для стыковки матричной лаборатории MATLAB с цифровыми осциллографами

угольных импульсов (меандра с двойной амплитудой 1 В и частотой 1 МГц) от осциллографа TDS2024В, построенного СКМ MATLAB в линейном масштабе. Фрагмент программы, реализующий эту операцию, вписан в окно графика спектра. Нетрудно заметить, что он достаточно прост и подобные программы может готовить пользователь со средними навыками в программировании.

В MATLAB спектральная оценка плотности мощности сигнала осуществляется с помощью функции построения периодограммы. На рис. 21 показано ее применение для построения спектра меандра. Здесь использовано окно Блэкмана-Харриса, которое у примененного осциллографа TDS2024В отсутствует. Это еще раз говорит о том, что применение системы MATLAB может дать даже дешевым приборам новые качества, у них изначально отсутствующие. Заметим, что в данном случае использован массивный осциллограф закрытой архитектуры.

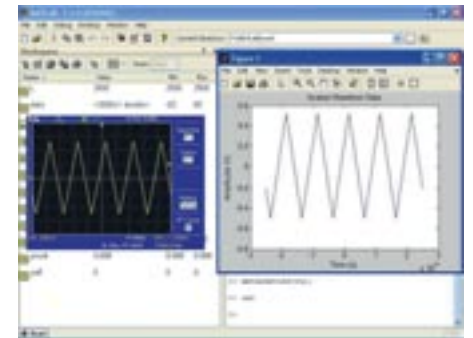


Рис. 19. Пример ввода осциллограммы осциллографа TDS2024В (окно слева с черным фоном) в систему MATLAB (графическое окно справа)

Классический Фурье-анализ и синтез возможен только для стационарных сигналов, параметры которых (амплитуда гармоник, их частота и фаза) неизменны во времени. Однако в наше время многие процессы и сигналы являются нестационарными. Анализ таких сигналов возможен методами кратковременного скользящего оконного преобразования Фурье и с помощью вейвлетов [6, 11]. Кратковременное преобразование Фурье заключается в последовательном во времени стробировании сигналов окном малой длительности (в сравнении с длительностью сигнала) с обычным БПФ внутри окна. Это позволяет строить

спектрограмму — график, отражающий зависимость частоты спектральных составляющих от времени и амплитуды. При этом амплитуда отображается цветом или интенсивностью полутонов, либо дополнительной ординатой (трехмерная спектрограмма). Принципиальное достоинство спектрограммы перед обычным спектром не только в том, что она отражает свойства нестационарных сигналов, но и в том, что она дает привязку ко времени их особенностей. Это же дает и вейвлет анализ сигналов, причем с большим разрешением.

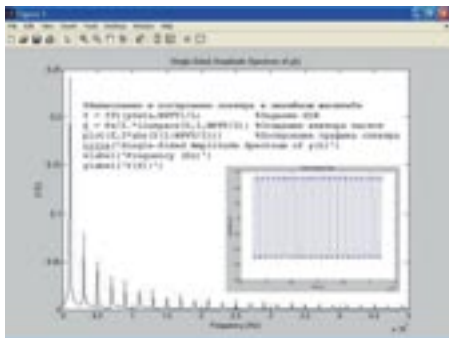


Рис. 20. Спектральный анализ реальной осциллограммы меандра средствами СКМ MATLAB

Пока эти новейшие методы в серийных осциллографах, даже дорогих и мощных, не применяются, хотя кратковременное скользящее Фурье-преобразование уже используется в некоторых современных анализаторах спектра радиочастот реального времени, например Tektronix серий RSA2000/3000/5000 [10, 11]. В тоже время стыковка СКМ MATLAB даже с дешевым массовым осциллографом позволяет получать спектрограммы наблюдаемых осциллограмм даже при применении дешевого осциллографа (рис. 22).

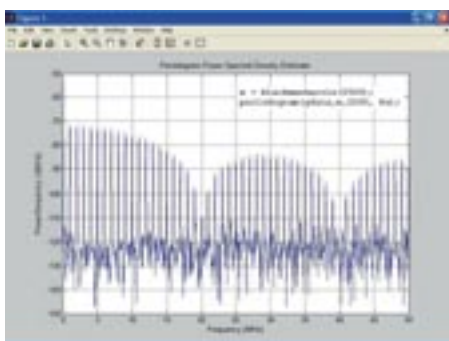


Рис. 21. Получение периодограммы меандра

Разумеется, возможности применения СКМ, интегрированных в осциллографы открытой архитектуры, несравненно богаче и охватывают все возможности обработки осциллограмм, которые можно вообразить! Не случайно многие фирмы (например, Agilent Technologies, LeCroy и Tektronix) стали выпускать осциллографы с опциями в виде установленной в них системы MATLAB (рис. 23). Заметим, что легальная стоимость

СКМ MATLAB вполне сопоставима со стоимостью высококлассного цифрового осциллографа. Тем не менее, применение этой СКМ считается вполне оправданным.

Помимо уже отмеченных возможностей, осциллографы с опцией MATLAB открывают обширные возможности в различном представлении сигнальных процессов самыми изысканными средствами. Например, многие осциллографы строят двумерные глазковые диаграммы в виде наложения входных и инвертированных выходных сигналов (см. ее вид на экранах осциллографов рис. 23 в центре). По степени их перекрытия или захода на введенную маску судят о допустимости зашумленности или нестабильности сигналов. MATLAB позволяет получить красочную трехмерную диаграмму, вроде показанной на рис. 24. Она позволяет хорошо оценивать шум или тонкости модуляции сигналов по уровню их пиков. С помощью мыши эту диаграмму можно вращать.

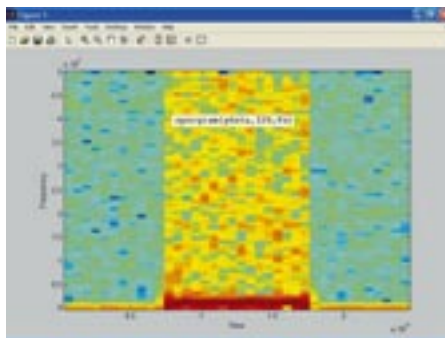


Рис. 22. Спектрограмма осциллограммы пачки, полученной от осциллографа TDS2024B

Резко увеличены встроенные средства компьютерной математики в специальных приборах для спектрального анализа — анализаторах спектра радиосигналов. Ввиду достаточно полного описания этих приборов в [6, 11] отметим лишь, что новые разработки анализаторов спектра реального времени, созданные фирмой Tektronix, реализуют все описанные выше методы программного анализа спектров в сочетании с супергетеродинным методом для выделения полосы спектрального анализа. Они способны строить спектрограммы нестационарных сигналов, подобные приведенной на рис. 22, а также динамические спектры, использующие технологию цифрового фосфора. Скорость вывода спектров на экран дисплея у этих приборов повышена в тысячи раз.

При всей важности Фурье-преобразований очевидны их существенные недостатки. Достаточно отметить принципиальные ограничения базисных функций синуса и косинуса — они непрерывны, не способны описать скачки сигнала, определены в бесконечном времени как вперед, так и назад, дают медленно сходящиеся ряды и не позво-

ляют корректно представлять нестационарные сигналы, параметры которых меняются во времени. Скользящее окно частично решает эту задачу, но в пределах окна все принципиальные ограничения Фурье-преобразований сохраняются.



Рис. 23. Осциллографы фирмы Agilent Technologies с опцией MATLAB

В связи с этим в последние два десятилетия возникла и быстро развивается новая область представления произвольных сигналов с помощью вейвлетов — коротких «волночек», масштабируемых и перемещаемых по оси времени. Основы вейвлет-преобразования для русскоязычного читателя описаны в [10]. В ряде СКМ (MATLAB, Mathcad и Mathematica) есть пакеты расширения по вейвлетам, детально описанные в [6-8, 10]. Число вейвлетов ныне достигает многих десятков. Пакеты по вейвлетам содержат функции прямого и обратного дискретного вейвлет-преобразования и многочисленные функции по вейвлет-обработке сигналов, в частности по очистке их от шумов, вейвлет-компрессии и декомпрессии, приближению произвольных зависимостей, построения вейвлет-спектрограмм и др. При этом приближение произвольных зависимостей основано на их представлении совокупностью вейвлетов, перемещаемых, масштабируемых и помноженных на вейвлет-коэффициенты. Ограничением последних реализуется сглаживание и фильтрация сигналов, в

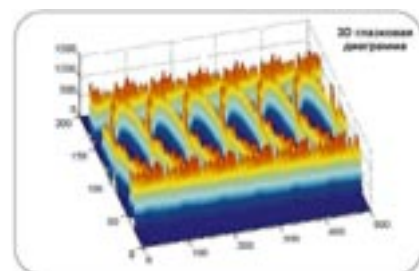


Рис. 24. Трехмерная глазковая диаграмма, полученная с помощью СКМ MATLAB

том числе изображений, их сжатие в десятки раз и очистка от шума. Очень эффективны вейвлеты для локализации и наблюдения различных аномалий и артефактов сигналов, имеющих разрывы производных [6].

Нельзя не отметить и новое поколение цифровых приборов, интенсивно использующих средства компьютерной математики в области комплексных чи-

сел и волновых процессов — это анализаторы цепей ВЧ и СВЧ диапазонов. В общем случае они применяются для анализа 2- и 4-полосников, а иногда и многополосников, используя наглядные понятия об отражении света или волн падающих на объект. Как известно, это ведет к появлению отраженного и проходящего света (или отраженной и проходящей волны), см. рис. 25.



Рис. 25. Аналогия со светом и волной при исследовании 4-полосников

Простота этих понятий обманчива — все компоненты волн являются комплексными величинами и их модули и фазы существенно зависят от частоты. Поэтому анализаторы цепей вынуждены работать с комплексными сигналами в очень широком диапазоне частот (обычно от сотни кГц до нескольких ГГц и выше). Это резко усложняет их аппаратную реализацию и делает эти приборы сложными и дорогими. В анализатор этого типа обычно входит векторный широкодиапазонный генератор качающейся частоты и фазочувствительные приемники с мостами для разделения проходящего и отраженного сигналов. Получили распространение различные системы параметров для описания цепей. Наибольшее применение нашла система S-параметров, в несколько упрощенном виде представленная на рис. 26.

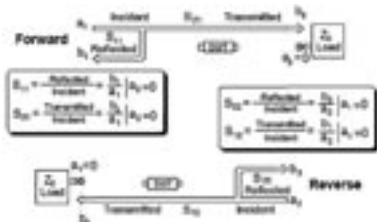


Рис. 26. К определению S-параметров 4-полосника

Классическими анализаторами цепей стали многочисленные варианты цифрового анализатора Tektronix/Advantest R3765. Этот прибор, выпущенный в десятках вариантах, обеспечивает построение графиков зависимостей всех S-параметров от частоты, выделение их активной и мнимой частей и вычисление множества сопутствующих параметров. Прибор содержит порт широкодиапазонного генератора (например, от

150 кГц до 3,8 ГГц для R3765CG) качающейся частоты и порт (или даже несколько портов) приемника, принимающего сигналы и реагирующего на их фазы. Есть разновидность скалярных анализаторов цепей, не позволяющих оценивать фазу сигналов.

На рис. 28 показан пример построения таким анализатором графиков амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) СВЧ фильтра и его фазо-частотной характеристики (ФЧХ). Последняя имеет зеленый цвет. Ее своеобразный вид связан с тем, что фазовый сдвиг приводится в диапазон углов от  $-90$  до  $+90$  угловых градусов, хотя на деле многократно выходит за эти пределы. Для проектирования и макетирования таких фильтров, перед их натурным испытанием могут использоваться пакеты расширения системы MATLAB Simulink (блочное имитационное моделирование), Signal Processing Toolbox (обработка сигналов), Filter Design Toolbox (проектирование фильтров), RF Toolbox (анализ радиочастотных цепей) и др. [3].



Рис. 27. Цифровой анализатор цепей Tektronix/Advantest R3765CG

Замечательной возможностью анализаторов цепей является возможность построения круговых диаграмм (диаграмм Смита-Вольперта) [15], которые (разумеется, при хорошем знакомстве с ними пользователей этими приборами) позволяют оценивать параметры линий передачи, устойчивость анализируемых цепей и их поведение в широком диапазоне частот. Максимальные частоты таких анализаторов достигают единиц и десятков ГГц, а порою и выше. Обратите внимание на возможность применения маркеров для отсчета положения особых точек диаграмм и измерения их параметров. Кстати, большое число подобных диаграмм позволяет строить пакет

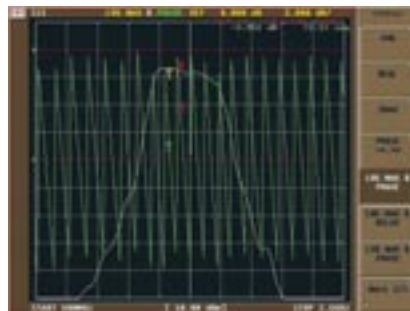


Рис. 28. АЧХ и ФЧХ СВЧ фильтра на экране анализатора цепей

расширения RF Toolbox, а пакет расширения RF Blockset обеспечивает (средствами пакета расширения Simulink) блочное имитационное моделирование радиочастотных цепей. Таким образом, анализаторы цепей, в частности, аппаратно обеспечивают реализацию указанных средств компьютерной математики, в частности, входящих в СКМ MATLAB.

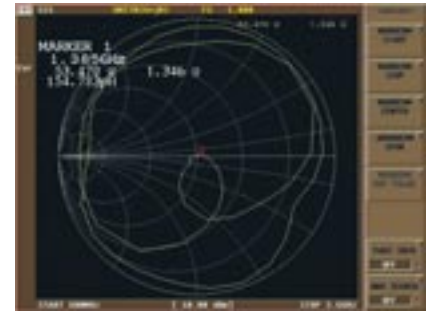


Рис. 29. Диаграмма Смита на экране анализатора цепей

Некоторые анализаторы содержат дополнительные блоки для измерения параметров отражения, S- и других параметров. Это достаточно громоздкие и дорогие приборы. Современные анализаторы, например фирмы Agilent Technologies (рис. 30) имеют одноблочную конструкцию и вполне умеренные габариты и массу. Уже одного взгляда на их экран (рис. 30 и рис. 31), отображающий разом несколько диаграмм ясно, что эти приборы имеют уникальные возможности в измерении и отображении параметров ВЧ- и СВЧ-компонентов. Все они были давно реализованы в многочисленных пакетах расширения по комплексному анализу сигналов и цепей в СКМ различного типа. Целый ряд мощных анализаторов цепей выпускает фирма Rohde&Schwarz.

Средства системы MATLAB, в частности пакет расширения Communication Toolbox, используются в специальных пакетах расширения по исследованию источников электропитания, изучению и измерению джиттера в импульсных устройствах нано- и пикосекундного диапазона длительностей и во многих других приложениях.

Обширные возможности в обработке сложных, например, телекоммуникационных сигналов открывают и новейшие осциллографы с системами компьютерной математики. Пример этого в виде построения трехмерной глазковой диаграммы уже приводился (рис. 24).

Наиболее высокочастотными являются стробоскопические (сэмплирующие) осциллографы. Обычно они выполняют и функции последовательных анализаторов сложных сигналов и даже анализаторов цепей. Примером может служить один из самых мощных осциллографов нашего времени — последовательный цифровой осциллограф-анализатор Tektronix DSA8200

(рис. 32). Прибор имеет максимальные частоты анализируемых сигналов в стробоскопическом режиме до 70 ГГц и рассчитан на широкое применение программ внешних разработчиков — от табличного процессора Microsoft Excel до матричной лаборатории MATLAB. Осциллограф обеспечивает наблюдение и измерение сигналов с временными нарастаниями в единицы пс и измерение S-параметров многополюсников в диапазоне частот до 50 ГГц. Обеспечивает все возможные формы представления результатов измерений. К сожалению, это уникальные и очень дорогие приборы.



Рис. 30. Современный анализатор цепей Agilent E5071

Ныне на смену многочисленным громоздким и тяжелым генераторам звуковых, ультразвуковых, высоких и сверхвысоких частот, а также различным типам импульсных и функциональных генераторов приходят многофункциональные генераторы произвольных функций и сигналов, например серий AFG3000, AWG5000, AWG7000 и др. корпорации Tektronix [12-14]. Подобные приборы выпускает и ряд других фирм, например, Agilent Technologies и др. Помимо цифрового синтеза более десятка сигналов стандартных форм (синусоидальной, прямоугольной, треугольной, пилообразной и т.д.) такие приборы позволяют синтезировать

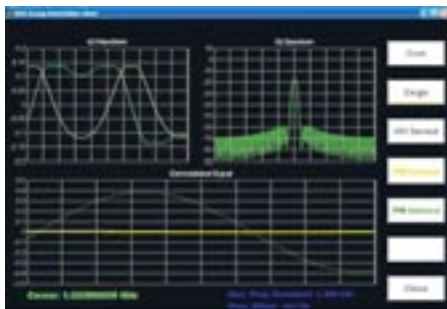


Рис. 31. Вид экрана анализатора цепей Agilent E5071 с данными I/Q модуляции и демодуляции

сигналы произвольной формы, заданной таблицей значений, математическими выражениями или графиками. С помощью программ OpenChoice и ArbExpress [14] обеспечивается связь приборов с персональным компьютером, управление с ПК всеми их функциями и возможность задания сигналов, описываемых их графиками и математическими выражениями. Для обеспечения по-

следней возможности программа ArbExpress имеет простой редактор математических выражений.

Однако возможности этого редактора намного уступают возможностям графического и формульного интерфейса пользователя современных СКМ, например, Excel, Mathcad или MATLAB. Их применение уже реализовано в новейших генераторах произвольных сигналов AWG5000 и AWG7000 класса HiFi корпорации Tektronix. Многие фирмы выпускают также скалярные и векторные генераторы синусоидальных сигналов с максимальными верхними частотами в единицы и даже десятки ГГц и разнообразными видами модуляции.

Для обеспечения работы ArbExpress с СКМ MATLAB нужно знать идентификационный номер USB порта, через который генератор подключается к компьютеру. Его нетрудно получить с помощью программы OpenChoice. Для обеспечения связи между программами ArbExpress имеет в каталоге Program Files\Tektronix\ArbExpress\tools\Matlab набор из нескольких функций, нужных



Рис. 32. Последовательный цифровой осциллограф-анализатор Tektronix DSA8200

для работы с генератором. Их назначение можно найти в фирменном описании программы. Недавно на Интернет-сайте корпорации Tektronix была выложена доступная для загрузки расширенная версия комплекта функций и драйверов для работы приборов этой фирмы совместно с системой MATLAB. А на сайте корпорации MathWorks (разработчика MATLAB) можно найти средства для работы и примеры такой работы для многих типов измерительных приборов ведущих компаний мира.

Итак, мы видим, что возможности СКМ и современных измерительных приборов взаимно дополняют друг друга. Включение СКМ в современные приборы актуально, перспективно и своевременно. Но грамотное применение этих средств требует существенного повышения квалификации инженеров и научных работников, использующих современное радиоизмерительное оборудование. Печальным является тот факт, что в области его разработки ныне мы сильно отстаем от зарубежного уровня.

Чтобы это отставание не стало окончательным, необходима (даже во время кризиса) серьезная поддержка исследований и разработок в области применения средств компьютерной математики в измерительных системах и приборах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Дьяконов В. П. Компьютерная математика. Теория и практика. М.: Нолидж, 2001.
2. Дьяконов В. П. Mathcad 11/12/13 в математике. Справочник. М.: Горячая линия — Телеком, 2007.
3. Дьяконов В. П. MATLAB 6.5 SP1/7.0 + Simulink 5/6. Обработка сигналов и проектирование фильтров. М.: СОЛОН-Пресс, 2005.
4. Дьяконов В. П. Mathematica 5.1/5.2/6 в математических и научно-технических расчетах. М.: СОЛОН-Пресс, 2008.
5. Дьяконов В. П. Maple 9.5/10 в математике, физике и образовании. М.: СОЛОН-Пресс, 2006.
6. Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории к практике. Изд-е 2-е переработанное и дополненное. М.: СОЛОН-Пресс, 2004.
7. Дьяконов В. П. Современная осциллография и осциллографы. М.: СОЛОН-Пресс, 2005.
8. Афонский А. А., Дьяконов В. П. Измерительные приборы и массовые электронные измерения. М.: СОЛОН-Пресс, 2007.
9. Афонский А. А. Новые модели цифровых осциллографов АКТАКОМ — большой шаг в автоматизацию измерений. Контрольно-измерительные приборы и системы, 2009, № 2.
10. Афонский А. А., Дьяконов В. П. Анализаторы спектра, сигналов и логики. М.: СОЛОН-Пресс, 2009.
11. Дьяконов В. П. Современные методы Фурье- и вейвлет-анализа и синтеза сигналов. Контрольно-измерительные приборы и системы, 2009, № 2.
12. Дьяконов В. П. Генерация и генераторы сигналов. М.: ДМК-Пресс, 2009.
13. Дьяконов В. П. Многофункциональные генераторы Tektronix AFG3000. Контрольно-измерительные приборы и системы, 2006, № 6 (начало), 2007, № 1 (окончание).
14. Дьяконов В. П. Управление генераторами произвольных функций Tektronix AFG3000 с помощью программы ArbExpress. Контрольно-измерительные приборы и системы, 2007, № 2.
15. Лосев А. К. Теория линейных электрических цепей. М.: Высшая школа, 1987. ☑

*In this article attempt to show a role of computer mathematics in the modern industry of radio-electronic measurements is made.*