

## ЛИТЕРАТУРА

1. Нестерихин Ю. Е., Золотухин Ю. Н., Лившиц З. А. Автоматизация: итоги десятилетия.— Автометрия, 1984, № 4.
2. Системы «Микро-КАМАК-лаб»: Проспект.— Новосибирск: ИАиЭ СО АН СССР, 1982.
3. Бредихин С. В., Песляк П. М. САТУ-М: система для программирования аппаратуры КАМАК. Модифицированный вариант.— Новосибирск, 1984. (Препринт/АН СССР, Сиб. отд-ние, ИАиЭ; № 166).
4. Ян А. П. Развитие базового комплекта микро-ЭВМ «Электроника-60».— Новосибирск, 1982. (Препринт/АН СССР, Сиб. отд-ние, ИАиЭ; № 194).
5. Приманчук Н. А. и др. Модули телевизионного дисплея в стандарте КАМАК.— Автометрия, 1980, № 4.
6. Купер Э. А. и др. Цветной графический дисплей.— Новосибирск, 1978. (Препринт/АН СССР, Сиб. отд-ние, ИЯФ; № 79-38).
7. Гусев О. З. и др. Модули широкого применения в стандарте КАМАК.— В кн.: Автоматизация научных исследований на основе применения ЭВМ: Тез. докл. VI Всесоюз. конф. Новосибирск: ИАиЭ СО АН СССР, 1984.

*Поступила в редакцию 11 марта 1984 г.*

УДК 621.317.757

**С. В. БРЕДИХИН, К. И. БУДНИКОВ, О. З. ГУСЕВ, В. М. ЕФИМОВ,  
Ю. Н. ЗОЛОТУХИН, М. А. ЗОЛОТУХИНА, А. Я. ИВАНЧЕНКО,  
А. Н. КОЛЕСНИКОВ, В. В. КУЗНЕЦОВ, П. М. ПЕСЛЯК,  
В. И. ПРОКОПЕНКО, Л. Ф. ТОМАШЕВСКАЯ, В. С. ЯКУШЕВ**

*(Новосибирск)*

### СИСТЕМА ЦИФРОВОГО ЧАСТОТНОГО АНАЛИЗА СИГНАЛОВ

Спектральный анализ представляет собой один из основных инструментов получения информации о характеристиках различного рода процессов. В частности, актуальная задача как в научных исследованиях, так и в промышленности — автоматизация виброакустических измерений. Во многих случаях конечной целью анализа являются данные о спектре мощности исследуемого сигнала. Немаловажно то, что эти данные, как правило, должны выдаваться в реальном времени. По-видимому, единственным разумным путем получения спектра мощности в реальном времени, т. е. текущего спектра мощности, может быть использование классической схемы «полосовой фильтр — квадратичный детектор — интегратор», в основу которой положено математическое определение понятия спектра мощности. В этой схеме полосовой фильтр выделяет спектральные составляющие сигнала, лежащие в требуемой полосе, затем отфильтрованный сигнал возводится в квадрат и усредняется. Система спектрального анализа должна содержать совокупность (линейку) описанных выше устройств, покрывающих исследуемый частотный диапазон и работающих одновременно и непрерывно.

Таким образом, в классической схеме при определении спектра мощности измеряется совокупность энергий сигнала на выходе линейки полосовых фильтров

$$E_k(t) = \int_{-\infty}^t d\tau \psi_k(t - \tau) \left[ \int_{-\infty}^{\tau} d\Theta \varphi_k(\tau - \Theta) X(\Theta) \right]^2,$$

где  $X(\Theta)$  — анализируемый сигнал;  $\varphi_k(\tau - \Theta)$  и  $\psi_k(t - \tau)$  — весовые функции  $k$ -го фильтра и интегратора. При этом определение спектра мощности связано с двумя типами ошибок: систематической и случайной. Первая из них обусловлена тем, что оценка спектра мощности в элементарной полосе

$$S_k^* = \langle E_k(t) \rangle / \Delta f_k = \int d\omega S(\omega) |\tilde{\varphi}_k(\omega)|^2 / \Delta f_k$$

является сглаженной ( $\Delta f_k$  — эффективная ширина полосы пропускания  $k$ -го фильтра). Вторая ошибка обусловлена тем, что величина  $E(t)$  — случайный процесс. Относительная дисперсия оценки  $S_k^*$  определяется соотношением

$$\langle (S_k - S_k^*)^2 \rangle / S_k^{*2} \cong \tau_{\phi k} / \tau_{\text{ин}} = 1 / \Delta f_k \tau_{\text{ин}},$$

где  $\tau_{\text{ин}}$  и  $\tau_{\phi k}$  — постоянные времени интегратора и полосового фильтра. Для уменьшения первой составляющей ошибки необходимо сужать эффективную ширину полосовых фильтров, наращивая их число, что, в свою очередь, приводит к увеличению постоянной времени интегратора, так как при сужении эффективной полосы возрастает случайная составляющая ошибки. Очевидно, что при спектральном анализе стационарных сигналов предельная достижимая точность принципиально ограничена. В случае анализа стационарных сигналов также имеются трудности, одна из которых, например, связана с тем, что с уменьшением эффективной ширины  $\Delta f_k$  возрастает длительность переходного процесса в полосовых фильтрах.

До недавнего времени спектральный анализ осуществлялся при помощи аналоговой аппаратуры. Основным «строительным» элементом таких систем является двухполосный резонатор, реализованный на базе активного RC-фильтра. Каждый полосовой фильтр представляет собой в этом случае набор последовательно соединенных двухполосников, обеспечивающий близкую к равномерной частотную характеристику в полосе пропускания и требуемую скорость ее спада вне этой полосы. Необходимо отметить, что обеспечение температурной стабильности характеристик аналоговых фильтров связано с серьезными технологическими трудностями, которые в области низких и инфранизких частот становятся практически непреодолимыми. Кроме того, существенные осложнения возникают и при создании многополосных полосовых фильтров.

Достижения последних лет в области микроэлектроники позволили перейти к цифровой реализации спектральных анализаторов [1, 2]. Основное преимущество цифрового спектрального анализа — это прецизионность, обусловленная неизменностью цифровых эквивалентов соответствующих параметров аналоговых фильтров.

В настоящее время можно выделить две разновидности цифрового спектрального анализа: с одинаковой абсолютной шириной элементарной полосы и с одинаковой относительной шириной элементарной полосы в исследуемом диапазоне частот. Если не учитывать требований к скорости спада частотной характеристики полосового фильтра вне полосы пропускания, то, по-видимому, подходящей процедурой, реализующей линейку полосовых фильтров, при анализе с одинаковой абсолютной шириной элементарной полосы является периодически выполняющийся алгоритм быстрого преобразования Фурье с последующим усреднением по времени квадратов модулей коэффициентов. Наиболее адекватная процедура анализа с одинаковой относительной шириной элементарной полосы — алгоритмы рекурсивной фильтрации. Отметим, что анализ с одинаковой относительной полосой традиционен для промышленности. Это так называемый  $1/m$ -октавный анализ. При  $1/m$ -октавном анализе отношение правой и левой границы элементарной полосы равно  $2^{1/m}$ , при  $1/4$ -октавном анализе — 2, при  $1/3$ -октавном анализе —  $2^{1/3}$  и т. п. Частотные характеристики полосовых фильтров для  $1/m$ -октавного анализа стандартизованы как в нашей стране, так и за рубежом\*.

Необходимо отметить, что цифровой частотный анализ в реальном масштабе времени в настоящее время, как правило, не может быть выполнен на универсальных ЭВМ и требует разработки специальной аппа-

\* ГОСТ 17168—71 и ГОСТ 17169—71. Фильтры электрические октавные и треть-октавные. МЭК 225—1966.

ратуры, так как скорость выполнения вычислений оказывается достаточной, где  $N$  — число элементарных полос анализа,  $f_k$  — правая граница  $k$ -й элементарной полосы анализа, множитель 2 перед суммой соответствует минимальному числу отсчетов на период максимальной частоты в элементарной полосе.

При анализе с одинаковой абсолютной шириной полосы пропускания

$$\Delta f = (f_{\max} - f_{\min})/N$$

( $f_{\max}$  и  $f_{\min}$  — верхняя и нижняя частоты анализируемого диапазона), а

$$F \geq (f_{\max} + f_{\min})N. \quad (2)$$

Если же постоянна относительная ширина элементарной полосы, то  $f_{k-1} = qf_k$ , где  $q < 1$ , и

$$F \geq 2f_{\max}(1 - q^N)/(1 - q). \quad (3)$$

При использовании для фильтрации в элементарной полосе рекурсивного фильтра с частотной характеристикой

$$\tilde{\varphi}(z) = Q(z)/P(z), \quad (4)$$

где  $Q(z)$  и  $P(z)$  — полиномы степени  $l$  и  $m$  соответственно;  $z = \exp[-i\omega T]$  ( $T$  — шаг дискретизации по времени), на обработку каждого отсчета в общем случае затрачивается около  $n = l + m$  операций умножения и столько же операций сложения. Следовательно, минимальная необходимая производительность (выраженная в числе операций типа сложения или умножения) определяется соотношением

$$F_0 = 2F(l + m). \quad (5)$$

Рассмотрим в качестве примера 1/3-октавный анализ в звуковом диапазоне частот. В этом случае центральная частота старшей октавы равна 16 кГц и  $f_{\max} = \sqrt{2} \cdot 16 = 22,4$  кГц. Требованиям ГОСТа 17169—74 по частотной характеристике полосового фильтра удовлетворяет шестиполосный рекурсивный фильтр, т. е.  $n \approx 12$ . Так как при 1/3-октавном анализе  $q = 2^{-1/3}$ , то из (3) и (5) вытекает, что производительность частотного анализатора должна составить около  $5 \cdot 10^6$  опер./с. Фактически требуемая производительность оказывается существенно большей, так как для реализации условий, при которых справедливо соотношение (1), необходима дополнительная обработка потока отсчетов.

Система цифрового спектрального анализа «Енисей» разработана на основе типовой конфигурации «Микро-КАМАК-лаб» [3] и является конкретным примером развития этой конфигурации в направлении проблемной ориентации (внешний вид системы показан на рис. 1).

Разработанный для системы специпроцессор [4] реализует классический вариант спектрального анализа, включающий гребенку полосовых цифровых рекурсивных фильтров, квадратичные детекторы и интеграторы. Производительность специпроцессора такова, что позволяет осуществлять в реальном времени в полосе частот до 11,2 кГц 1/4-октавный (в 14 полосах) и 1/3-октавный анализ (в 42 полосах). Кроме того, возможен последовательный во времени анализ в 1/12-октавном режиме. По своим характеристикам специпроцессор системы близок к спектральному анализатору [1]. При уменьшении частоты тактового генератора специпроцессора и соответствующем уменьшении частоты среза аналогового фильтра нижних частот система позволяет осуществлять спектраль-

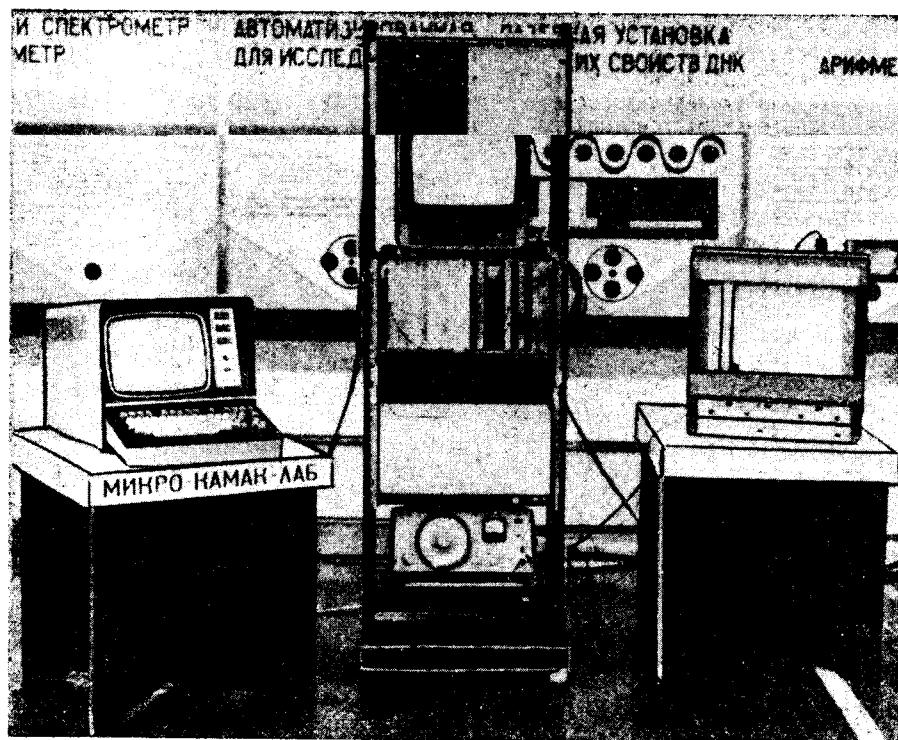


Рис. 1.

ный анализ в области низких и инфранизких частот. Наличие в системе микро-ЭВМ «Электроника-60» обеспечивает широкие возможности для вторичной обработки данных спектрального анализа. В частности, система «Енисей» использовалась в качестве широкополосного спектрографа в исследованиях речевого сигнала. Блок-схема системы показана на рис. 2.

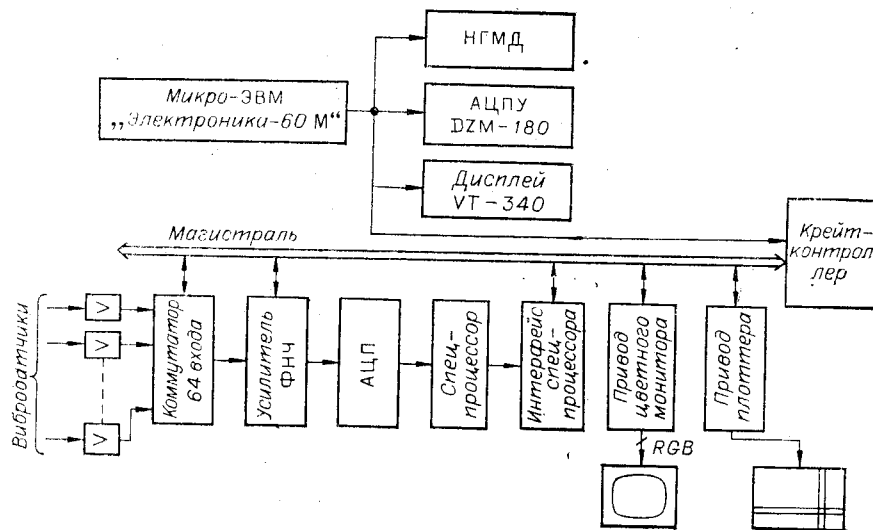


Рис. 2.

```

:РЕЖИМ АНАЛИЗА          : 1/3
:РЕЖИМ УСРЕДНЕНИЯ      : ЭКСП.
:ВРЕМЯ УСРЕДНЕНИЯ/УР. ДОСТ. : 1/32 С
:КАНАЛ ВХОДНОГО СИГНАЛА : 1
:КОЭФФИЦИЕНТ УСИЛЕНИЯ  : 100
:УСИЛЕНИЕ ВНЕШНЕГО УСИЛИТЕЛЯ : 0.00

```

ЧАСТОТА	УРОВЕНЬ	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0
0.800	26.53	II*****						
1.000	0.00	I						
1.250	23.98	II****						
1.600	29.54	II*****I						
2.000	33.42	II*****I***						
2.500	23.01	II***						
3.150	0.00	I						
4.000	0.00	I						
5.000	0.00	I						
6.300	0.00	I						
8.000	0.00	I						
10.000	0.00	I						
12.500	0.00	I						
16.000	0.00	I						
20.000	0.00	I						
25.000	0.00	I						
31.500	0.00	I						
40.000	0.00	I						
50.000	0.00	I						
63.000	0.00	I						
80.000	0.00	I						
100.000	0.00	I						
125.000	0.00	I						
160.000	0.00	I						
200.000	0.00	I						
250.000	0.00	I						
315.000	28.75	II*****						
400.000	57.48	II*****I*****I*****I*****						
500.000	69.37	II*****I*****I*****I*****I*****I*****						
630.000	39.14	II*****I*****						
800.000	24.77	II*****						
1000.000	0.00	I						
1250.000	23.01	II***						
1600.000	21.76	II**						
2000.000	23.98	II***						
2500.000	26.99	II*****						
3150.000	25.44	II****						
4000.000	26.53	II*****						
5000.000	32.43	II*****I**						
6300.000	29.63	II*****						
8000.000	29.78	II*****						
10000.000	30.41	II*****						

Рис. 3.

В состав системы входит базовый комплект «Микро-КАМАК-лаб», включающий микро-ЭВМ «Электроника-60», накопитель на гибких магнитных дисках (НГМД), цифрорпечатающее устройство (DZM-180), буквенно-цифровой дисплей (VT-340), контроллер К-16 для связи микро-ЭВМ «Электроника-60» с аппаратурой КАМАК и сервисные модули КАМАК: «Привод цветного монитора» и «Привод плоттера» для вывода информации на экран цветного телевизора и графопостроитель. Базовый комплект дополнен аппаратурой КАМАК для ввода и оцифровки аналоговых сигналов: «Коммутатор 128 каналов», «Усилитель», «Аналого-цифровой преобразователь» (АЦП) и «Специпроцессор», состоящий из следующих основных блоков, выполненных в конструктиве КАМАК: «Циф-

ровой фильтр», «Усреднитель», «Синхронизатор» и «Интерфейс специпроцессора».

Коммутационное оборудование позволяет выбрать для анализа один из 64 датчиков. Исследуемый сигнал усиливается в модуле с программно-изменяемым коэффициентом усиления, проходит через аналоговый фильтр нижних частот (ФНЧ) с полосой пропускания (на уровне 3 дБ) от 0,1 Гц до 11,7 кГц и спадом частотной характеристики вне полосы пропускания порядка 72 дБ на октаву и преобразуется в цифровую форму (период квантования 30 мкс).

Вычисление спектра мощности сигнала производится в модулях «Цифровой фильтр», реализующий рекурсивный алгоритм цифровой фильтрации, и «Усреднитель», обеспечивающий возведение данных в квадрат и усреднение. Режим усреднения (показательный или линейный) и время усреднения выбираются оператором.

Полученные результаты выводятся на экран цветного телевизора и могут быть отображены на графопостроителе.

Развитое прикладное программное обеспечение предназначено для поддержки различных операций, связанных с наладкой, настройкой и использованием системы.

Программный комплекс обеспечивает четыре основных режима работы системы: наладочный, калибровочный, исследовательский, режим контрольных измерений.

Процедуры пакета тестов, входящие в комплекс, реализуют первый режим работы. Они облегчают процессы тестирования и настройки тракта специпроцессора и некоторых других аппаратных средств (например, модуля «Привод цветного монитора»). Пакет калибровочных процедур позволяет производить калибровку аналоговой части системы и запоминание во внешней памяти поправочных коэффициентов, необходимых для компенсации разброса чувствительности датчиков, подключенных к разным входным каналам. Процедуры исследовательского режима позволяют пользователю системы в диалоговом режиме определять частотный спектр сигнала, поступающего от одного из входных датчиков. При этом пользователь может выбирать входной канал и любой из трех режимов частотного анализа: октавный, 1/3-октавный, 1/12-октавный. Используя процедуры режима контрольных измерений, пользователь системы может снять виброакустические характеристики объекта в октавном (для микрофонов) и 1/3-октавном (для датчиков вибрации) режимах анализа сигналов для нескольких (определяемых пользователем) групп датчиков. Для этих групп находятся среднеквадратичные спектры и спектры по огибающей, производится контроль мощности сигнала в каждой полосе спектра на максимально допустимое значение.

Программный комплекс системы «Енисей» предоставляет пользователю развитый сервис, в том числе и вывод на различные типы внешних устройств, а также возможности документирования (рис. 3).

Наличие в системе микро-ЭВМ позволяет компенсировать систематические погрешности частотных характеристик на центральных частотах фильтров. Динамический диапазон системы составляет около 110 дБ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Цифровой частотный анализатор, модель 2131.— Каталог «Брюль и Кьсер», 1981/82.
2. Узкополосный частотный анализатор, модель 2031.— Там же.
3. Гусев О. З., Золотухин Ю. Н., Прохожев О. В., Ян А. П. Базовые конфигурации систем «Микро-КАМАК-лаб».— Автометрия, 1984, № 4.
4. Ефимов В. М., Золотухина М. А., Кузнецов В. В., Якушев В. С. Специпроцессор системы цифрового частотного анализа сигналов.— Там же.

*Поступила в редакцию 26 января 1984 г.*