

Многомерный параметрический мёссбауэровский спектрометр. 1. Система движения для многократной доплеровской модуляции. Вахоин М. Е., Иркаев С. М., Семенкин В. А. — В кн.: Научное приборостроение. Теоретические и экспериментальные исследования. Л.: Наука, 1984, с. 102—112.

Описывается система движения для мёссбауэровского спектрометра, использующего при измерении спектра многократную доплеровскую модуляцию. Синтез системы движения проведен на основе принципа инвариантности, оптимальной передаточной функции вибратора и спектральной методики выбора частоты первой гармоники задающего сигнала скорости. На основании полученных теоретических данных разработана комбинированная адаптационная схема управления доплеровским модулятором и генератор необходимых опорных сигналов. Приведенная в работе система движения позволяет добиться ошибки отработки сигнала скорости меньше 0.05% одновременно на нескольких вибраторах, менять двоичным кодом эксперимента число вибраторов и закон изменения скорости их движения, проводить без вмешательства оператора оптимальное автоматическое регулирование, осуществлять последовательный контроль допустимого уровня ошибки с автоматическим прерыванием накопления. Лит. — 15 назв., ил. — 7, табл. — 2.

## **МНОГОМЕРНЫЙ ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ МЁССБАУЭРОВСКИЙ СПЕКТРОМЕТР. 1. СИСТЕМА ДВИЖЕНИЯ ДЛЯ МНОГОКРАТНОЙ ДОППЛЕРОВСКОЙ МОДУЛЯЦИИ**

### **1. Введение**

В последнее время в мёссбауэровской спектроскопии складывается новое перспективное направление, связанное с использованием методики многократной доплеровской модуляции энергии гамма-излучения. Эта методика реализуется рядом механически не связанных, электрически синхронизированных систем движения, которые используются одновременно для модуляции энергии резонансного излучения сразу в нескольких точках пространства для получения одного результирующего спектра.

В качестве примера можно указать на методику селективно индуцированного двойного эффекта Мёссбауэра [1, 2] и компенсацию изомерного сдвига при резонансном детектировании [3, 4]. Однако при измерении мёссбауэровского спектра по принципу многократной модуляции конечный результат содержит в себе больше вкладов от аппаратурных ошибок, чем при измерении по общепринятой схеме. Поэтому развитие таких методик сдерживается пределом точности отработки опорного сигнала и линейностью скорости движения, достигаемыми в современной аппаратуре. Сводка данных (табл. 1), составленная по материалам [5, 6] показывает относительные успехи в конструировании систем движения для наиболее широко употребляемых мёссбауэровских изотопов: для большинства из них практически достижимое значение полуширины линии и разрешение по скорости на 0.5—1 порядок хуже теоретически возможных. А использование многократной модуляции требует улучшения характеристик аппаратуры, приведенных в табл. 1, по крайней мере в два раза даже

Т а б л и ц а 1

Характеристики систем движения мёссбауэровских спектрометров для некоторых изотопов

Изотоп	Энергия перехода	Полуширина линии, мм/с		Скоростной диапазон, мм/с	Требуемое скоростное разрешение	
		теоретическая	экспериментальная		теоретическое	экспериментальное
$^{67}\text{Zn}$	93.3	$3.2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-2}$
$^{181}\text{Ta}$	6.3	$6.4 \cdot 10^{-3}$	0.05	25	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-4}$
$^{237}\text{Np}$	59.5	$6.7 \cdot 10^{-2}$	1.2	200	$5 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-3}$
$^{56}\text{Fe}$	14.4	$1.94 \cdot 10^{-1}$	0.22	10	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$
$^{161}\text{Dy}$	25.7	$3.78 \cdot 10^{-1}$	2.1	250	$5 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-5}$
$^{119}\text{Sn}$	23.9	$6.46 \cdot 10^{-1}$	0.8	15	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$
$^{151}\text{Eu}$	21.6	1.31	2.5	50	$5 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$
$^{170}\text{Yb}$	84.3	2.02	2.5	40	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$
$^{169}\text{Tm}$	8.4	8.14	20	700	$2 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$

для тех изотопов, у которых теоретические и практически достигнутые значения совпадают ( $^{119}\text{Sn}$ ,  $^{57}\text{Fe}$ ,  $^{170}\text{Yb}$ ).

Поэтому решение такой задачи не может идти по пути копирования известных схем или использования промышленных спектрометров, а связано с разработкой средствами теории автоматического регулирования общего алгоритма проектирования систем доплеровской модуляции (СДМ), в котором возможна теоретическая оценка уровня достигаемой точности.

В данной работе приведен синтез системы движения мёссбауэровского спектрометра, базирующийся на принципе инвариантности, оптимальной передаточной функции вибратора и спектральной методике выбора частоты первой гармоники задающего сигнала скорости. На основании полученных теоретических данных разработана комбинированная адаптационная схема управления доплеровским модулятором и генератор необходимых опорных сигналов.

## 2. Принципы проектирования СДМ, отвечающих требованиям многократной доплеровской модуляции

Рассмотрим систему движения мёссбауэровского спектрометра как систему автоматического регулирования (САР). В такой системе (рис. 1) величина ошибки  $x$  складывается из двух составляющих — ошибки отработки возмущающего воздействия  $x_f$  и ошибки отработки задающего воздействия  $x_g$ :

$$x = g - z = x_g + x_f. \quad (1)$$

Функция задающего воздействия удовлетворяет условиям Дирихле и при задании определенной точности характеризуется конечным частотным диапазоном. Следовательно, понятие ошибки можно сузить путем введения в САР фильтра с частотным передаточным коэффициентом

$$W_\phi(j\omega)|_{j\omega=p} = \begin{cases} 1 & \text{при } \omega \in \Delta\omega, \\ 0 & \text{при } \omega \notin \Delta\omega. \end{cases} \quad (2)$$

При этом (1) переходит в

$$x|_{\Delta\omega} = x_g|_{\Delta\omega} + x_f|_{\Delta\omega}. \quad (3)$$

Снижение ошибки отработки совпадает с понятием инвариантности. Если ввести передаточные функции ошибки от задающего и возмущающего воздействий  $W_{x_g}(p)$  и  $W_{x_f}(p)$  соответственно, то условие полной инвариантности ошибки по задающему и возмущающему воздействию, учитывая (3), примет вид [7]

$$W_{x_g}(p)|_{\Delta\omega} = 0; \quad W_{x_f}(p)|_{\Delta\omega} = 0. \quad (4)$$

Условия выполнения (4) для частных случаев САР (рис. 1) приведены в табл. 2. Для удобства записи введено обозначение  $W(p) = W_\phi(p) W_{г.м}(p) \times W_{вибр}(p) W_\lambda(p)$ .

Примером САР 1-го типа (в терминах табл. 1) могут служить системы, описанные в [8—10], 3-го типа — системы, описанные в [11—15]; САР 2-го типа не рекомендуются к использованию в мёсбауэровских спектрометрах из-за невозможности компенсации шумов, случайных возмущающих воздействий

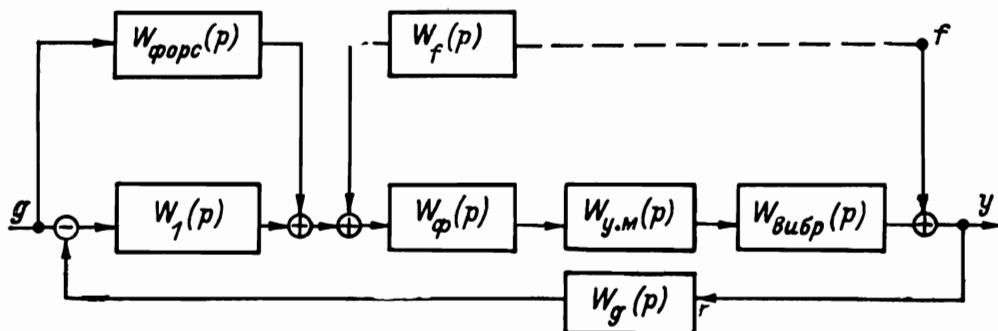


Рис. 1. Обобщенная структура системы движения мёсбауэровского спектрометра.

$g$  — задающее воздействие,  $y$  — механическое перемещение штока вибратора,  $f$  — возмущающее воздействие,  $W_\phi(p)$ ,  $W_{г.м}(p)$ ,  $W_{вибр}(p)$ ,  $W_g(p)$  — передаточные функции фильтра, усилителя мощности, вибратора и датчика параметра движения соответственно.

и нелинейностей. Из табл. 2 видно, что комбинированный принцип управления наиболее полно обеспечивает условие инвариантности, а следовательно, и минимум ошибки обработки сигнала движения. Реализация этой возможности в первую очередь обеспечивается передаточной функцией форсирующего звена  $W_{форс}(p)$ .

Передаточная функция идеального вибратора может быть представлена в виде колебательного звена [7]:

$$W_{вибр}(p) = \frac{1}{1 + 2\eta Tp + T^2 p^2} = \frac{X(p)}{I(p)}, \quad (5)$$

где  $\eta = \frac{b}{2\sqrt{k_m}}$ ;  $T^2 = \frac{m}{k}$ ;  $m$  — масса подвижной части вибратора;  $k$ ,  $b$  — коэффициенты пружины и успокоителя;  $X(p)$ ,  $I(p)$  — Лапласовские изображения механического перемещения штока и входного тока вибратора.

Таблица 2

Условия полной инвариантности в известных системах доплеровской модуляции

Тип управления САР	Передаточная функция		Условие полной инвариантности	
	$W_{x_g}(p)$	$W_{x_f}(p)$	по задающему воздействию	по возмущающему воздействию
1. Управление по отклонению $W_{форс}(p) = 0$	$\frac{1}{1 + W(p) W_1(p)}$	$\frac{-W_g(p)}{1 + W_g(p) W(p) W_1(p)}$	$W_1(p) = \infty$	$W_1(p) = \infty$
2. Управление по задающему воздействию	$1 - W_1(p) W_\phi(p)$	$-W_g(p)$	$W_{форс}(p) = W(p)$	—
3. Комбинированное управление	$\frac{1 - W(p) W_\phi(p)}{1 + W(p) W_1(p)}$	$\frac{-W_g}{1 + W_g(p) W(p) W_1(p)}$	$W_{форс}(p) = \frac{1}{W(p)}$	$W_f(p) = \frac{1}{W(p)}$

Вследствие конечной механической жесткости, начиная с  $\omega_{\text{вбр}}$  передаточная функция вибратора принимает вид

$$W_{\text{вбр}}(p) = \frac{1}{(1 + 2\eta T p + T^2 p^2)(T_n p^n + T_{n-1} p^{n-1} + \dots + 1)}.$$

Полная инвариантность ошибки по задающему воздействию в этом случае не имеет физической реализации, так как  $W_{\text{форс}}(p)$  должна производить  $(n+2)$  производных от задающего сигнала (см. табл. 2). Но если ограничить верхнюю границу полосы пропускания вибратора частотой  $\omega_{\text{вбр}}$ , то его можно рассматривать как идеальный с передаточной функцией  $W_{\text{вбр}}(p)$ , т. е. как (5).

Примем

$$W_g(p) = T_g p, \quad W_{y.m}(p) = \frac{I(p)}{U(p)}, \quad W_\phi = 1,$$

где  $T_g$  — коэффициент датчика;  $I(p)$ ,  $U(p)$  — Лапласовские изображения выходного тока и входного напряжения усилителя мощности.

Тогда условие (4) относительно задающего воздействия принимает вид

$$W_{\text{форс}}(p) = [W(p)]^{-1} = \frac{1}{T_g} p^{-1} + 2\eta \frac{T}{T_g} + \frac{T}{T_g} p. \quad (6)$$

Так как задающее воздействие  $g$  детерминировано и постоянно, управляющее воздействие  $gW_{\text{форс}}(j\omega)|_{\Delta\omega}$  может быть сформировано программным блоком с необходимой точностью. Например, в случае  $g(t)$  треугольной формы (системы движения с постоянным ускорением) формула (6) соответствует сумме сигналов параболической, треугольной и прямоугольной формы (рис. 2). Из рисунка видно, что уменьшение  $\omega_1$  снижает амплитуды высокочастотных составляющих в канале прямого регулирования, а значит ведет к снижению ошибки отработки. Нижний предел  $\omega_1$  определяется условием сохранения линейности  $W_{\text{вбр}}(p)$

$$\omega_1 \geq \frac{\pi}{4} \frac{v_{\text{max}}}{y_{\text{max}}}, \quad (7)$$

где  $v_{\text{max}}$  — заданная максимальная скорость движения штока вибратора;  $y_{\text{max}}$  — наибольшее отклонение штока, при котором выполняется закон Гука для пружин вибратора. Степень достижения полной инвариантности в различных типах САР можно оценить из расчета теоретически возможной точности отработки сигнала скорости. Для примера используем реальный вибратор, аналогичный описанному в [9], характеристики которого приведены на рис. 3, и ограничимся случаем движения с постоянным ускорением.

Величина  $\omega_{\text{вбр}}$  определяется по частоте расхождения АЧХ реального вибратора  $L_{\text{вбр}}(p)$  и идеального  $L_{\text{н.вбр}}(p)$ . В нашем примере  $\omega_{\text{вбр}} = 4$  кГц. Частоту первой гармоники опорного сигнала определим из (7). Принимая  $v_{\text{max}} = 10$  мм/с;  $y_{\text{max}} = 1$  мм, получаем  $\omega_1 = 6$  Гц.

Подсчитаем достижимую точность отработки движения при управлении по отклонению. Для соблюдения условия устойчивости полный коэффициент усиления разомкнутой системы  $K_1$  на частоте  $\omega_{\text{вбр}}$  (где  $\omega_{\text{вбр}}$  переходит значение  $\varphi = -180^\circ$ , см. рис. 3) определится из выражения

$$20 \lg(K_1 + 15) = 48 \text{ дБ}. \quad (8)$$

Для САР по отклонению передаточная функция  $W_{x_g}(j\omega)$  из табл. 2 для амплитудных значений принимает вид

$$\frac{x_{\text{max}}}{y_{\text{max}}} \approx \frac{1}{|W(j\omega)W_1(j\omega)|}. \quad (9)$$

Модуль знаменателя выражения (9) представляет собой полный коэффициент усиления системы при разомкнутой цепи отрицательной обратной связи. Его величину на частоте  $\omega_1$  (рис. 3) можно найти из равенства

$$20 \lg |W(j\omega)W_1(j\omega)| = 20 \lg(K_1 + 15) - L_1. \quad (10)$$

Решение (10) с учетом (8) при  $L_1=8$  дБ дает относительную ошибку обработки ( $x_{\max}/y_{\max}$ )  $100 \approx 1\%$ . Но из (9) и (10) видно, что минимальное значение ошибки обработки достигается в САР по отклонению при  $\omega_1 = \omega_p$ . Аналогичный расчет при этом условии дает  $(x_{\max}/y_{\max}) 100 \geq 0.6\%$ .

Для САР с комбинированным управлением  $x_g/\Delta\omega=0$ . Так как ряд Фурье для  $g(t)$  ограничивается значением  $\omega_{\text{внбр}}$ , точность задания движения определяется следующим расчетом.

Число гармоник опорного сигнала  $l$  в полосе пропускания  $\Delta\omega$  определяется как  $\omega_l = (2l+1)\omega_1$ , т. е.  $\omega_l \leq \omega_{\text{внбр}}$ . Отсюда  $l=350$ . Сумма ряда, представляющего амплитуды Фурье-разложений треугольного сигнала, имеет вид

$$\sum_{l=0}^{\infty} \frac{1}{(2l+1)^2} = \frac{\pi^2}{8}.$$

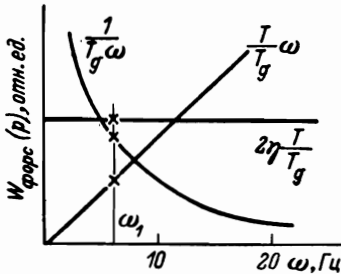
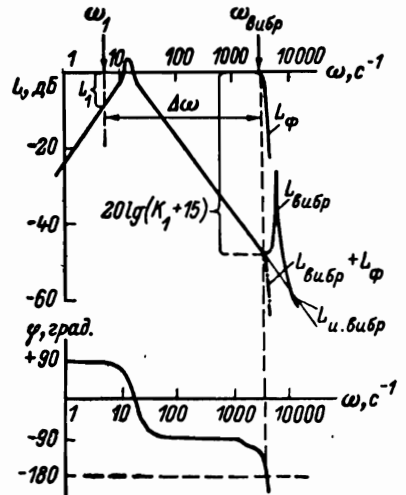


Рис. 2. Зависимость составляющих  $W_{\text{Фурье}}(p)$  от частоты первой гармоники опорного сигнала скорости  $\omega$  [12].

Рис. 3. Логарифмические амплитудно-частотные  $L$  и фазочастотные  $\varphi$  характеристики САР, используемые для оценки предела точности обработки задающего сигнала скорости.



Тогда при  $l=350$  относительная ошибка обработки

$$\frac{x}{y} = \frac{\sum_{l=0}^{\infty} \frac{1}{(2l+1)^2} - \sum_{l=0}^{350} \frac{1}{(2l+1)^2}}{\frac{\pi^2}{8}} \cdot 100 = 0.06\%.$$

Таким образом, в мёссбауэровских спектрометрах с многократной доплеровской модуляцией только САР с комбинированным принципом управления в состоянии обеспечить требуемую для проведения эксперимента точность обработки сигнала движения.

Так как доплеровский модулятор электромеханического типа содержит колебательные звенья выше первого порядка, то величина ошибки обработки опорного сигнала определяется числом физически реализуемых производных  $g$ , которые должен производить канал прямого регулирования  $W_\phi$ . Расчет показывает, что для  $x=0.01\%$  (именно такая ошибка обработки сигнала скорости необходима для схемы многократной доплеровской модуляции) опорный сигнал должен иметь пять производных.

Таким образом, анализ системы движения средствами теории автоматического регулирования позволяет связать точность задания скорости движения поглотителя или источника с порядком дифференцируемости сигнала скорости.

Используемые до настоящего времени в мёссбауэровских спектрометрах формы сигнала  $g$  не имеют физически реализуемых производных при  $n > 1$  и поэтому не могут быть приняты для спектрометра.

### 3. Функциональная схема системы движения для многократной доплеровской модуляции

Предлагаемая система СДМ является САР комбинированного типа с регулировкой и стабилизацией параметров, основанной на принципе адаптации. Это позволяет измерять мёсбауэровские спектры с постоянной точностью отработки сигнала скорости при изменяющихся условиях эксперимента и увеличении кратности модуляции. На рис. 4 приведена функциональная схема предлагаемой системы движения.

Мёсбауэровский контролер *МК* осуществляет в соответствии с полученным кодом эксперимента необходимые коммутации связей, генерирует программы адаптации, контроля и прерываний; он состоит из трех блоков — *БКЭ*, *БОС*, *БСА*.

Блок кодирования условий эксперимента *БКЭ* задает адрес и число вибраторов, необходимых в схеме эксперимента, определяет соответствующую последовательность и направление прохождения цифровых и аналоговых сигналов регулирования.

Блок опорных сигналов *БОС* генерирует все аналоговые сигналы: опорные (законы скорости движения) и форсирующие (определяющие инвариантность ошибки), обеспечивает требуемую стабильность их периода и амплитуд, осуществляет тактирование всех цифровых схем и в системе.

Блок системы адаптации *БСА* обеспечивает автоматическую, однозначную и воспроизводимую настройку всех выбранных кодом *БКЭ* систем движения на требуемый уровень ошибки отработки скорости; настройка производится перед началом каждого эксперимента, а также при изменении нагрузки на штоке вибратора, скоростного диапазона или замене вибратора на другой, не идентичный по амплитудно-частотной характеристике; осуществляет во время эксперимента последовательный контроль уровня ошибки в каждом канале движения, а в случае ухода его за допустимые заданные пределы, прерывает накопление информации на время повторной настройки.

Блок доплеровской модуляции (*БДМ*) энергии резонансного излучения регулирует скорость движения подвижных частей вибраторов по формам опорных сигналов, задаваемых мёсбауэровским контроллером в соответствии с кодом эксперимента, полученным из контроллера крейта; построен по принципу комбинированной системы автоматического регулирования, сочетающей отрицательную обратную связь, фильтрацию и прямое регулирование; требуемая точность отработки опорного сигнала скорости в соответствии с опорными и форсирующими функциями достигается последовательными шагами адаптации (генерированием двоичного восьмиразрядного кода, управляющего цифроаналоговыми делителями опорных и форсирующих сигналов). *КД* — коммутатор входных сигналов детекторной электроники на вход схемы прерываний эксперимента.

Конструктивно система движения выполнена в стандарте *КАМАК*, что позволяет уже известными способами задавать программное управление модулей. В зависимости от типа используемого контроллера крейта *КК*, программа эксперимента может быть задана от мини-ЭВМ или вызвана из ППЗУ контроллера. Код эксперимента по магистрали данных *КАМАК* поступает в мёсбауэровский контроллер *МК*. Магистральный интерфейс в *МК* дешифрирует этот код и производит предварительную установку состояния блоков коммутатора ошибок *БДМ*, распределителя сигналов на *БДМ* и автомата адаптации. Одновременно на все входы распределителя поступают сфазированные опорные и форсирующие сигналы, но число работающих *БДМ*, их адрес и закон модуляции полностью задаются кодом эксперимента. Сигнал ошибки от САР по отклонению из *БДМ*, который выбран коммутатором ошибок, поступает на анализатор ошибки в блоке адаптации, где происходит вычисление интеграла функции ошибки за период опорного сигнала скорости. Результат выполнения задает количество и направление шагов адаптации, определяемых автоматом адаптации. Каждый шаг выражается двоичным кодом адреса и состоянием циф-

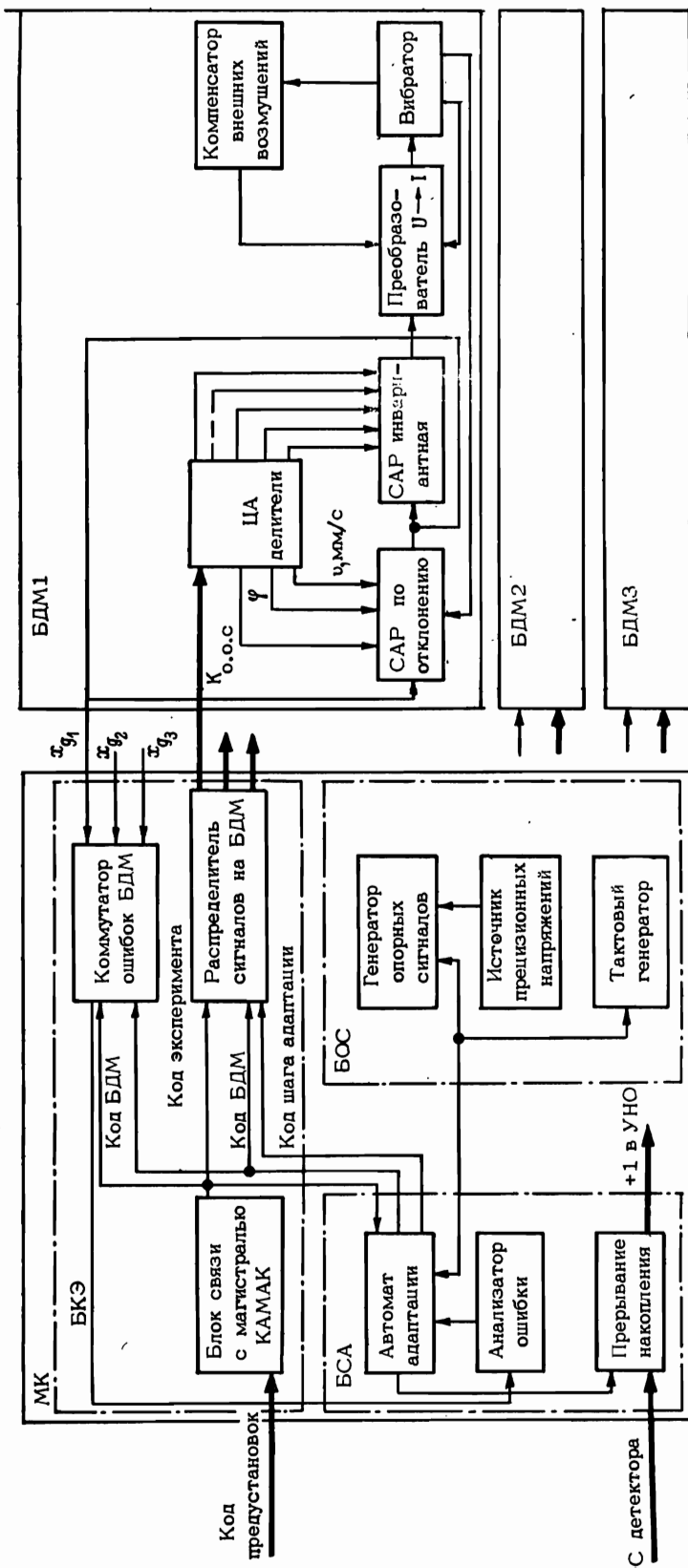


Рис. 4. Схема мессбауэровского контроллера и блока доплеровской модуляции.



роаналогового делителя, который изменяет значение определенного параметра регулирования САР. В САР по отклонению такими параметрами являются: коэффициент передачи по петле отрицательной обратной связи и частоты режекции фильтра высокочастотных резонансов. В системе прямого регулирования САР — это амплитуда опорного сигнала, его производных и интеграла. Минимизация интеграла ошибки происходит по всем параметрам регулирования синхронно с опорным сигналом и последовательно от САР по отклонению к САР прямого регулирования.

После достижения требуемого значения ошибки, которое задается кодом эксперимента и хранится в БКЭ, процесс адаптации для данного БДМ заканчивается. Оптимальные значения параметров регулирования в форме двоичного кода запоминаются на регистрах цифроаналоговых делителей. Затем автомат адаптации изменяет код БДМ и на входе блока адаптации проявляется ошибка обработки от следующего БДМ и процесс адаптации повторяется. Когда будут настроены все затребованные в соответствии с кодом эксперимента БДМ, блок адаптации блокирует систему прерываний и информация поступает в память накопителя, т. е. начинается измерение, определяемое кодом эксперимента. При этом блок адаптации переходит в тестовый режим и производит периодический контроль уровня ошибок. Уровень ошибки может превзойти предельно допустимый при замене вибратора на другой, с неидентичной амплитудно-частотной характеристикой, изменение нагрузки на штоке, задании в эксперименте нового скоростного диапазона или при проявлении флуктуации параметров в аналоговой части схемы. В этом случае система адаптации прерывает эксперимент и производит повторное регулирование.

Таким образом, система движения многомерного параметрического мессбауэровского спектрометра имеет несколько блоков доплеровской модуляции, сочетающих в себе системы автоматического регулирования по отклонению с инвариантным регулированием. Цифроаналоговые делители на входах этих САР запоминают двоичный код регулирования параметров САР. Все эти блоки управляются и контролируются общей схемой адаптации. Предустановки в этой схеме производятся двоичным кодом эксперимента.

#### 4. Формирование опорного и форсирующего сигнала скорости

Решение задачи о нахождении вида функции, отвечающей противоречивому условию — наличию линейно изменяющегося участка на большой области определения и существованию пяти производных на всем периоде изменения

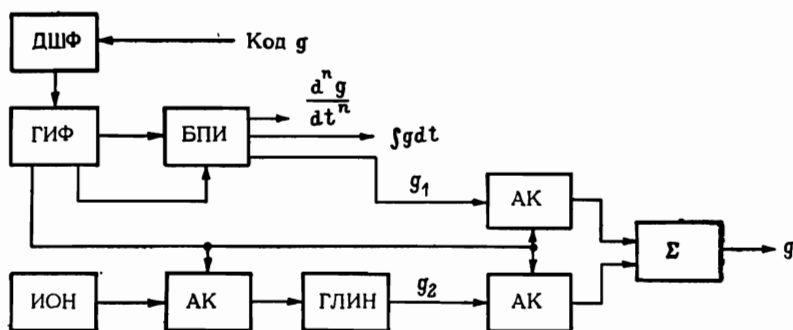


Рис. 5. Функциональная схема генератора опорных сигналов.

ДШФ — дешифратор; ИОН — источник опорного напряжения; ГИФ — генератор импульсных знакопеременных функций; БПИ — блок последовательных интеграторов; ГЛИН — генератор линейно изменяющихся напряжений; АК — аналоговый коммутатор; Σ — сумматор.

скорости движения — потребовало решить вопрос о синтезе опорного сигнала  $g$  специальной формы, имеющей в качестве пятой производной суперпозицию знакопеременных импульсных функций. Последовательное интегрирование этой суперпозиционной формы дает все необходимые форсирующие сигналы

и нерабочий участок  $g_1$ . Линейно изменяющийся рабочий участок  $g_2$  синхронно формируется по параллельному каналу и шивается с нерабочим участком. Этот путь формирования  $g$  позволил снизить уровень шума, так как отсутствует аналоговое дифференцирование, и получить нелинейность рабочего участка

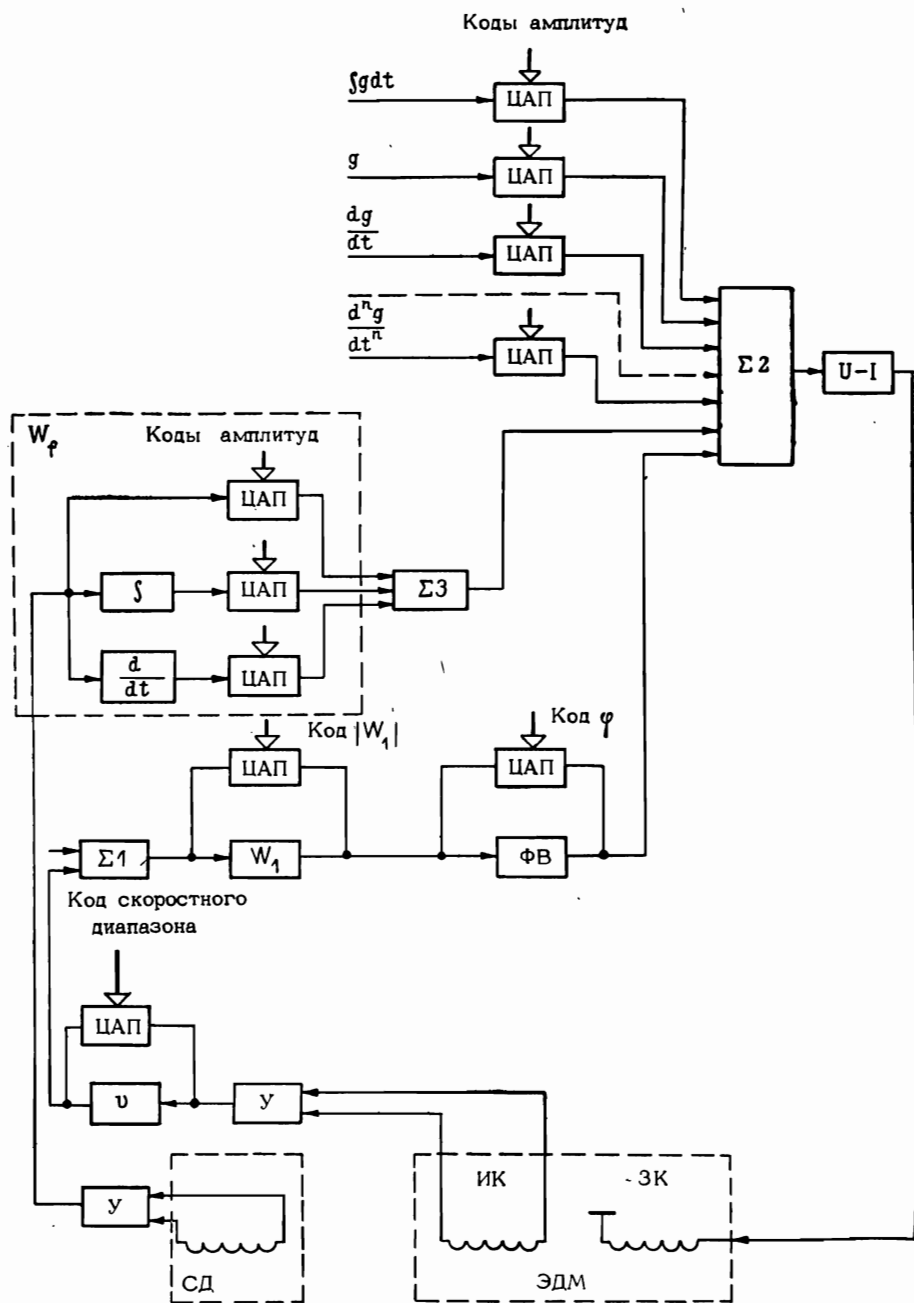


Рис. 6. Функциональная схема блока доплеровской модуляции.

ЦАП — цифроаналоговые преобразователи;  $\Sigma 1$ ,  $\Sigma 2$ ,  $\Sigma 3$  — сумматоры;  $\int$  — интегратор; У — усилители; ИК — измерительная катушка; ЗК — задающая катушка. Остальные обозначения объяснены в тексте.

равную или меньшую 0.01%, при формировании которого не используется аналоговое интегрирование. Опорные функции могут быть представлены последовательным двоичным кодом и поэтому генерируются цифровым методом. На рис. 5 представлена блок-схема формирования  $g$ ,  $\frac{d^n g}{dt^n}$  и  $\int g dt$ .

## 5. Функциональная схема системы доплеровской модуляции

Структурная схема САР комбинированного типа, показанная на рис. 1, представлена в виде функциональной схемы на рис. 6.

В отличие от традиционно используемых САР, дополнительно введены следующие узлы.

Преобразователь напряжение—ток ( $U-I$ ), компенсирующий реактивный характер входного сопротивления электродинамического модулятора ЭДМ. Фильтр  $\Phi B$  высокочастотных гармоник  $g$  для увеличения устойчивости в петле отрицательной обратной связи. Задатчик требуемого диапазона изменения скорости  $v$ , введенный в отличие от существующих спектрометров не в канал  $g$ , а в канал отрицательной обратной связи, что снижает вклад шума в величину ошибки  $x$ . Система компенсации сейсмических и акустических возмущений  $W_j$ . Вместе с петлей отрицательной обратной связи (ООС) она снижает ошибки обработки скорости по возмущающему воздействию. Построенная по принципу САР прямого регулирования, она позволяет для измерения использовать не идентичный ЭДМ, а малогабаритный сейсмодатчик СД. Необходимость введения  $W_j$  определяется тем, что модуль ограничен условием устойчивости канала регулирования по отклонению.

## 6. Функциональная схема системы адаптации

Система адаптации (рис. 7) построена на базе микропроцессора, который реализует программу синтеза цифрового автомата поиска минимума функционала. Алгоритм поиска построен по схеме Гаусса—Зайделя. Перед началом

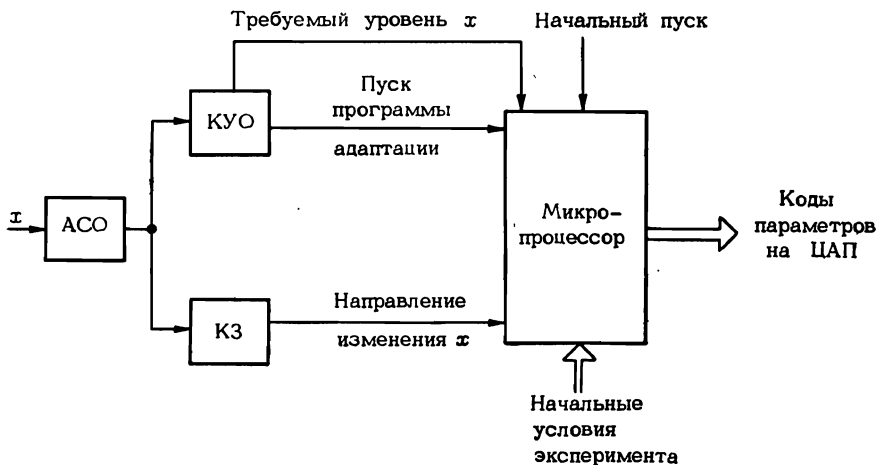


Рис. 7. Функциональная схема системы адаптации.

АСО — анализатор сигнала ошибки, КУО — компаратор уровня ошибки, КЗ — компаратор знака.

измерения с магистрали крейта в микропроцессор заносятся начальные условия эксперимента и требуемый уровень ошибки обработки опорного сигнала скорости. Пуск программы адаптации совершается автоматически сигналом коммутатора уровня ошибки, если величина интеграла ошибки превысит требуемый уровень. Микропроцессор до тех пор изменяет коды параметров регулирования, пока величина ошибки  $x$  не станет меньше требуемого значения.

## 7. Выводы

Описанное в данной работе функциональное решение системы движения позволяет:

1) добиться ошибки обработки сигнала скорости меньше 0.05% одновременно на нескольких вибраторах, участвующих в одном многомерном эксперименте;

2) с необходимой гибкостью менять кодом эксперимента число вибраторов и закон изменения скорости их движения;

3) проводить без вмешательства оператора оптимальное автоматическое регулирование по принципу адаптации, т. е. сохранять оптимальное значение заданной величины ошибки обработки опорного сигнала скорости при всех реальных в мёсбауэровском эксперименте систематических и случайных возмущающих воздействиях;

4) осуществлять последовательный контроль допустимого уровня ошибки с автоматическим прерыванием накопления, что позволяет ослабить влияние флуктуирующих параметров аппаратуры на форму регистрируемой резонансной линии, так что относительная величина этих искажений становится меньше ошибки обработки сигнала скорости.

Эффективность применения в комбинированных системах автоматического регулирования логики прерываний, экстремального принципа управления обеспечивается использованием новой по сравнению с используемой в современной мёсбауэровской аппаратуре (как в отечественных, так и в зарубежных образцах) элементной базы. Аналоговые блоки спектрометра выполнены на высокоточных интегральных операционных усилителях 153УД5А, 551УД1А, 574УД1А, коммутаторах 143КТ1, прецизионных цифроаналоговых микросхемных преобразователях 572ПА1А, высокочувствительных компараторах 554СА3. Цифровая часть схемы построена на микросхемах серии К155 средней и большой степени интеграции, а также на микропроцессорном комплекте 580 серии. Это позволило получить реальные высокие характеристики спектрометра, которые принципиально обеспечиваются его структурой.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Артемьев А. Н., Алешин К. П., Скляревский В. А., Степанов Е. П. — ПТЭ, 1972, № 4, с. 48.
2. Valko V., Hou G. R. — Phys. Rev., 1976, v. B13, p. 2729.
3. Иркаев С. М., Семенкин В. А., Соколов М. М. — Письма в ЖТФ, 1979, № 5, с. 984.
4. Иркаев С. М., Семенкин В. А., Соколов М. М. — ПТЭ, 1981, № 5, с. 53.
5. Mössbauer effect data Index covering 1970—1976 literature / Ed. by J. G. Stevens, V. E. Stevens. New York, 1976, v. 4.
6. Kalvius G. M., Kankeleit E. — In: Mössbauer spectroscopy and its applications. Vienna, 1972, p. 9.
7. Бесекирский В. А., Попов Е. Н. Теория систем автоматического регулирования. М., 1972.
8. Рубин Д. — Приборы для научных исследований, 1982, № 12, с. 50.
9. Канкелайт Е. — Приборы для научных исследований, 1974, № 2, с. 50.
10. Трузманов В. А., Корытко Л. А., Суздальев И. П. — Заводская лаборатория, 1965, № 12, с. 1519.
11. Pahor J., Kelsin D., Kodre A., Hanzel D., Molik A. — Nucl. Instr. Meth., 1967, v. 46, p. 289.
12. Clark P. E., Nichol A. W., Carlrow J. S. — J. Sci. Instrum., 1967, v. 44, p. 1001.
13. Zane R. — Nucl. Instrum. Meth., 1966, v. 43, p. 333.
14. Алешин К. П., Артемьев А. Н., Степанов Е. П. — ПТЭ, 1972, № 4, с. 54.
15. Корсон М. Р. — Приборы для научных исследований, 1980, № 3, с. 69.