КУЙБЫШЕВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ им. С. П. КОРОЛЕВА
Труды, выпуск XXIX, 1967 г.
Вопросы прочности элементов авиационных конструкций

А. Д. БОЙКОВ, Н. Д. ЕГУПОВ

МЕТОД РЕАЛИЗАЦИИ МНОГОМЕРНОЙ АНАЛИТИЧЕСКОЙ САМОНАСТРАИВАЮЩЕЙСЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Изложенный в работах В. В. Солодовникова [2] ортогональный принцип построения аналитических самонастраивающихся систем автоматического управления распространяется на многомерные объекты. Решаются основные задачи реализации принципа аналитической самонастройки — задачи идентификации и коррекции.

1. Постановка задачи

При решении многих практических вопросов автоматизации производственных процессов встает задача стабилизации динамических характеристик замкнутой системы управления. Эта задача может быть решена только при использовании принципа самонастройки (самоприспособления).

Необходимость создания аналитических самонастраивающихся систем автоматического управления (АСНС) диктуется следующими причинами: во-первых, освоение сложных технологических процессов, интенсификация производства требуют разработки таких систем, которые обеспечивали бы оптимальный ход процессов в условиях, когда параметры объекта управления и внешние воздействия изменяются в широких пределах и часто непредсказуемым заранее образом; во-вторых, для ускорения разработки и внедрения САУ сложными объектами требуются такие системы, которые обеспечивали бы высокие показатели качества процессов независимо от степени изученности и полноты математического описания объекта управления.

В АСНС на вычислительную машину определенной структуры и степени сложности возлагается решение следующих задач: непрерывно или периодически определяются текущие динамические характеристики объекта автоматического управления (идентификация объектов управления).

На основе информации о внутренних изменяющихся условиях (текущие динамические характеристики) и об оптимальных (желаемых) динамических характеристиках вычисляются параметры управляемого корректирующего фильтра.

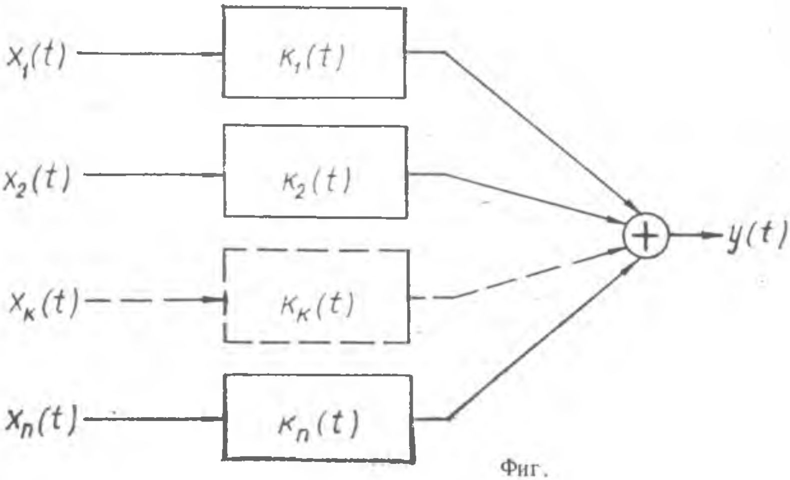
Таким образом, на контур самонастройки АСНС возлагается решение весьма сложных задач анализа и синтеза системы в процессе нормальной эксплуатации.

На всех этапах реализации алгоритма АСНС важно сохранить общность «идеологии» и единство «языка». Здесь одно из первых мест занимают методы представления действующих сигналов или их характеристик, так как анализ и синтез в АСНС ведется в процессе нормальной эксплуатации по текущим экспериментальным данным. Форма представления сигналов или их характеристик должна способствовать упрощению решения интегральных и дифференциальных уравнений в алгоритме АСНС.

Известен ряд работ [1]—[8], где для решения указанных проблем предлагается использовать ортогональные разложения. Действительно, в силу ряда замечательных свойств ортогональных разложений часто можно существенно сократить объем и повысить точность вычислений [5].

В данной работе ортогональные ряды используются для разложения корреляционных функций действующих в многомерной системе сигналов.

Пусть имеется САУ, блок-схема которой имеет вид фиг. 1.



Фиг.

Динамические характеристики звеньев $к_1(t)$, $к_2(t)$, ..., $к_к(t)$..., $к_n(t)$ изменяются заранее неизвестным образом в весьма широких пределах, однако процесс изменения характеристик является медленным. Стоит задача: по статистическим характеристикам действующих в системе сигналов определить динамические свойства отдельных звеньев и найти алгоритм коррекции, с помощью которого можно стабилизировать динамические свойства каждого звена в отдельности.

2. Метод определения динамических характеристик одномерных управляемых объектов

Прежде чем переходить непосредственно к задаче определения динамических характеристик объектов управления, кратко рассмотрим вопрос непрерывного выделения элементов ортогонального спектра корреляционных функций [3], поскольку это является важным этапом реализации описываемого ниже принципа аналитической самонастройки.

В настоящее время для автоматического определения корреляционных функций используются корреляторы, реализующие равенство:

$$R_{xx}(\tau) = \int_0^\infty x(t)\, x(t-\tau)\, dt. \tag{1}$$

Наиболее трудоемкой в смысле аппаратурной реализации операцией является операция осуществления задержки сигнала $x(t)$. Для сигналов с широким спектром можно построить искусственные линии задержки ($\tau < 100$ мк сек), с помощью которых можно получить нужную задержку без заметного искажения формы сигнала. Для получения задержек сигнала $\tau > 100$ мк сек используется запись сигнала на магнитную пленку и затем его считывание с нужной задержкой. Подобные устройства отличаются громоздкостью и часто с их помощью трудно получить необходимые точности.

Использование ортогональных разложений позволяет устранить отмеченные выше недостатки и кроме того получить результаты в аналитическом виде.

Будем находить корреляционную функцию (авто или взаимно) в виде разложения по некоторой полной системе ортогональных функций:

$$R_{xx}(\tau) = \sum_{i=0}^{n} a_i\, \varphi_i(\tau) \qquad \tau > 0. \tag{2}$$

Известно, что коэффициенты a_i $(i = 0, 1, 2, \ldots)$ определяются по формуле

$$a_n = \int_0^\infty R_{xx}(\tau)\, \varphi_n(\tau)\, d\tau. \tag{3}$$

Подставляя в формулу (3) выражение, определяющее корреляционную функцию, получим:

$$a_n = \int_0^\infty \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)\, x(t-\tau)\, \varphi_n(\tau)\, dt\, d\tau =$$

$$= \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \int_0^\infty x(t-\tau)\, \varphi_n(\tau)\, d\tau\, dt = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)\, I(t)\, dt,$$

где

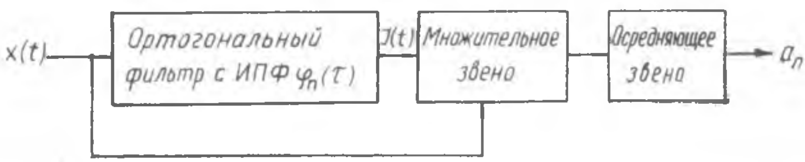
$$I(t) = \int_1^\infty x(t-\tau)\, \varphi_n(\tau)\, d\tau.$$

Таким образом, выражение для n-го коэффициента разложения принимает вид:

$$a_n = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)\, I(\tau)\, dt. \tag{4}$$

Инструментовка выражения (4) легко осуществляется на пассивных элементах.

Блок-схема канала для выделения n-ого коэффициента разложения имеет вид фиг. 2.



Фиг. 2

Легко построить аналогичные каналы для непрерывного выделения необходимого количества коэффициентов ортогонального разложения корреляционной или взаимнокорреляционной функций.

Вычислительное устройство, реализующее указанные выше операции, назовем ортогональным коррелятором.

Перейдем непосредственно к рассмотрению поставленного выше вопроса.

Сначала рассмотрим частный случай, когда имеется одномерная система и функция корреляции входного сигнала является дельта-функцией.

В этом случае справедливо равенство

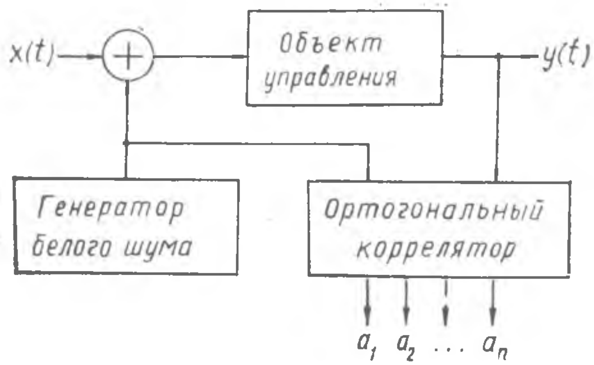
$$R_{xy}(\tau) = \int_0^\infty \delta(\tau - \vartheta)\, k(\vartheta)\, d\vartheta = k(\tau). \tag{5}$$

Используя описанный выше принцип анализа сигналов, с помощью ортогонального коррелятора импульсную переходную функцию объекта управления представляем в виде:

$$R_{xy}(\tau) = k(\tau) = \sum_{i=1}^{n} V_i \varphi_i(\tau). \qquad (6)$$

Используя последнее равенство, можно найти адэкватную физическую модель управляемого объекта.

Теперь легко видеть, что в отличие от описанных методов идентификации схема, представленная на фиг. 3, позволяет найти не точки (дискреты) импульсной переходной функции, а непосредственно ортогональную спектральную характеристику системы (ОСХ), причем, если ОСХ объекта будет медленно, но в широких пределах изменяться, схема позволяет непрерывно уточнять модель объекта.



Фиг. 3

Если входной сигнал отличен от белого шума, для определения динамических характеристик необходимо решать интегральное уравнение Фредгольма I рода с разностным ядром:

$$R_{xy}(\tau) = \int_0^{\infty} R_{xx}(\tau - \vartheta)\, k(\vartheta)\, d\vartheta. \qquad (7)$$

Пусть функции $R_{xy}(\tau)$ и $R_{xx}(\tau)$ определены в $L_2(-\infty, +\infty)$.

С помощью ортогонального коррелятора автокорреляционную и взаимнокорреляционную функции представим в виде:

$$\begin{aligned} R_{xx}(\tau) &= \sum_{j=1}^{\infty} a_j \varphi_j(\tau) && \tau > 0 \\ R_{xx}(\tau) &= \sum_{j=1}^{\infty} a_j \varphi_j(-\tau) && \tau < 0 \\ R_{xy}(\tau) &= \sum_{i=1}^{\infty} (b_i)_{xy} \varphi_i(\tau) = \sum_{i=1}^{\infty} b_i \varphi_i(\tau) && \tau > 0 \end{aligned} \qquad (8)$$

$$R_{xy}(\tau) = \sum_{i=1}^{\infty} (b_i)_{xy} \varphi_i(-\tau) = \sum_{i=1}^{\infty} c_i \varphi_i(-\tau) \qquad \tau < 0.$$

При записи этих формул учитывалось свойство корреляционных функций:

$$R_{xy}(-\tau) = -R_{yx}(\tau).$$

Импульсную переходную функцию, ортогональный спектр которой неизвестен, представим в виде:

$$k(\tau = \sum_{k=1}^{\infty} V_k \varphi_k(\tau) \quad \tau > 0. \tag{9}$$

Подставляя (8) и (9) в (7), получим:

$$\sum_{i=1}^{\infty} b_i \varphi_i(\tau) + \sum_{i=1}^{\infty} c_i \varphi_i(-\tau) =$$
$$= \left[\sum_{k=1}^{\infty} V_k \varphi_k(\tau)\right] * \left[\sum_{j=1}^{\infty} a_j \varphi_j(\tau) + \sum_{j=1}^{\infty} a_j \varphi_j(-\tau)\right]. \tag{10}$$

Применяя к обеим частям равенства (10) преобразование Фурье, имеем следующую зависимость:

$$\sum_{i=1}^{\infty} b_i \Phi_i(j\omega) + \sum_{i=1}^{\infty} c_i \Phi_i(-j\omega) =$$
$$= \sum_{j,k=1}^{\infty} a_j V_k \Phi_j(j\omega) \Phi_k(j\omega) +$$
$$+ \sum_{j,k=1}^{\infty} a_j V_k \Phi_j(-j\omega) \Phi_k(+j\omega).$$

Умножая обе части последнего равенства на $\Phi_j(-j\omega)$, интегрируя каждый член в бесконечных пределах и используя равенство Парсеваля, получим:

$$b_i = \sum_{j,k=1}^{\infty} a_j V_k \overline{C}_{jk}^{i} + \sum_{j,k=1}^{\infty} a_j V_k \overline{C}_{ij}^{k}, \tag{12}$$

где

$$\overline{C}_{jk}^{i} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi_i(-j\omega) \Phi_j(j\omega) \Phi_k(j\omega)\, d\omega, \tag{13}$$

$$\overline{C}_{ij}^{k} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi_i(-j\omega) \Phi_k(j\omega) \Phi_j(-j\omega)\, d\omega =$$
$$= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi_i(j\omega) \Phi_j(j\omega) \Phi_k(-j\omega)\, d\omega. \tag{14}$$

После умножения равенства (11) на $\Phi_i(j\omega)$ и интегрирования в пределах $(-\infty, +\infty)$, аналогично предыдущему случаю, получим:

$$c_i = \sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j V_k \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi_i(j\omega)\,\Phi_j(j\omega)\,\Phi_k(j\omega)\,d\omega + \tag{15}$$

$$+ \sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j V_k \overline{C}^j_{ik},$$

где

$$\overline{C}^j_{ik} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi_i(j\omega)\,\Phi_j(-j\omega)\,\Phi_k(j\omega)\,d\omega. \tag{16}$$

Можно показать [3], что:

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi_i(j\omega)\,\Phi_j(j\omega)\,\Phi_k(j\omega)\,d\omega = 0 \text{ для всех } i, j, k,$$

$$\overline{C}^i_{jk} = 0 \text{ для } j \text{ и (или) } k > i,$$

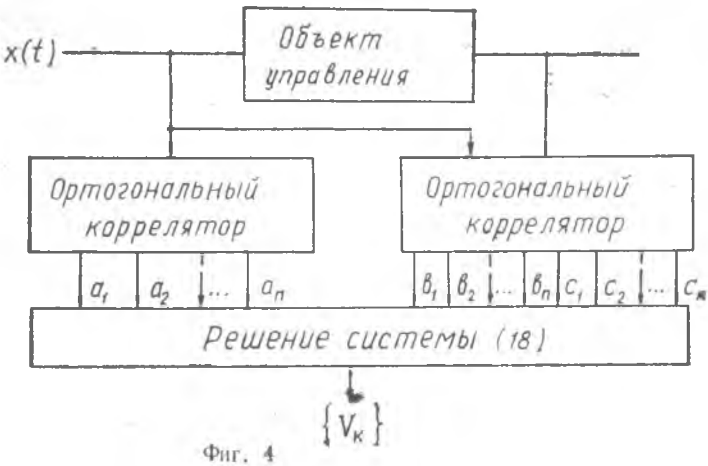
$$\overline{C}^j_{ik} = 0 \text{ для } i \text{ и (или) } k > j,$$

$$\overline{C}^k_{ij} = 0 \text{ для } i \text{ и (или) } j > k.$$

Принимая во внимание, что для аппроксимации корреляционных функций $R_{xy}(\tau)$ и $R_{xx}(\tau)$, а также импульсной переходной функции САУ достаточно взять n — членов разложения, окончательно получаем следующие уравнения связи:

$$b_i = \sum_{j,\,k=1}^{n} a_j V_k \left[\overline{C}^i_{jk} + \overline{C}^k_{ij}\right],$$

$$c_i = \sum_{j,k=1}^{n} a_j V_k \overline{C}^j_{ik}, \tag{18}$$



Фиг. 4

реализуя которые с помощью ЦВМ, имеем зависимость для функции веса:

$$k(\tau) = \sum_{k=1}^{n} V_k \varphi_k(\tau). \tag{19}$$

Можно показать [3], что система (18) имеет единственное решение. Блок-схема решения задачи идентификации описанным здесь методом представлена на фиг. 4.

3. Ортогональные методы статистического анализа многомерных автоматических систем

В предыдущем разделе были изложены методы получения динамических характеристик линейного объекта с одним входом и одним выходом по корреляционной функции входа и взаимной корреляционной функции входа и выхода. Задача при этом сводилась к определению импульсной переходной функции объекта из уравнения (7).

В настоящем разделе рассмотрим статистический метод определения динамических характеристик с использованием ортогональных функций линейных объектов с постоянными параметрами с n входами и m выходами.

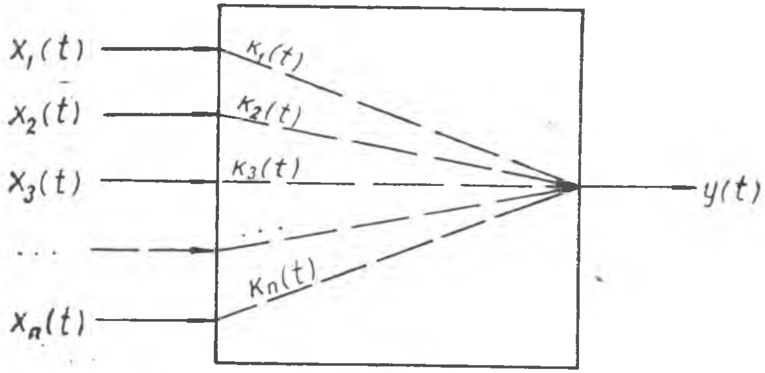
Как легко видеть, в этом случае для получения динамических характеристик необходимо найти nm импульсных переходных функций. Для решения этой задачи достаточно рассмотреть объект с n-входами и одним выходом. Действительно, рассматривая каждый выход независимо от остальных и определяя m-раз динамические характеристики объекта с n входами и одним выходом, можно последовательно определить все nm импульсных переходных функций.

Таким образом, в самом общем виде задача сводится к определению динамических характеристик линейных объектов с n входами и одним выходом. В настоящем разделе мы дадим решение этой задачи с использованием ортогональных разложений корреляционных функций.

Итак, имеется система автоматического управления, блок-схема которой изображена на фиг. 5. В этом случае интегральная связь между входами и выходом в силу принципа суперпозиции имеет вид:

$$y(t) = \int_0^t x_1(t-\tau) k_1(\tau) d\tau + \int_0^t x_2(t-\tau) k_2(\tau) d\tau + \cdots + \int_0^t x_n(t-\tau) k_n(\tau) d\tau, \tag{20}$$

где $k_1(t)$, $k_2(t)$, ... , $k_n(t)$ — импульсные переходные функции отдельных каналов многоканальной системы автоматического уп-



Фиг. 5

равления. Для получения соответствующих статистических характеристик действующих сигналов умножим обе части равенства (20) на $\frac{1}{T} x_1(t-\tau)$, на $\frac{1}{T}(x_2(t-\tau)$ и т. д. и затем на $\frac{1}{T} x_n(t-\tau)$, и проинтегрируем по t в пределах от нуля до T.

После выполнения указанных операций получаем:

$$
\begin{aligned}
R_{yx_1}(\tau) &= \int_{-\infty}^{+\infty} R_{x_1x_1}(\tau-\Theta)\, k_1(\Theta)\, d\Theta + \int_{-\infty}^{+\infty} R_{x_2x_1}(\tau-\Theta)\, k_2(\Theta)\, d\Theta + \\
&+ \cdots + \int_{-\infty}^{+\infty} R_{x_nx_1}(\tau-\Theta)\, k_n(\Theta)\, d\Theta, \\
R_{yx_2}(\tau) &= \int_{-\infty}^{+\infty} R_{x_1x_2}(\tau-\Theta)\, k_1(\Theta)\, d\Theta + \int_{-\infty}^{+\infty} R_{x_2x_2}(\tau-\Theta)\, k_2(\Theta)\, d\Theta + \\
&+ \cdots + \int_{-\infty}^{+\infty} R_{x_nx_2}(\tau-\Theta)\, k_n(\Theta)\, d\Theta, \qquad (21) \\
&\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\
R_{yx_n}(\tau) &= \int_{-\infty}^{+\infty} R_{x_1x_n}(\tau-\Theta)\, k_1(\Theta)\, d\Theta + \int_{-\infty}^{+\infty} R_{x_2x_n}(\tau-\Theta)\, k_2(\Theta)\, d\Theta + \\
&+ \cdots + \int_{-\infty}^{+\infty} R_{x_nx_n}(\tau-\Theta)\, k_n(\Theta)\, d\Theta,
\end{aligned}
$$

где

$$R_{yx_i}(\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_0^T y(t)\, x_i(t-\tau)\, dt,$$

$$R_{x_j x_i}(\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{T} \int_0^T x_j(t-\tau)\, x_i(t)\, dt, \quad (i, j = 1, 2, \ldots, n).$$

Таким образом, имеем систему n линейных интегральных уравнений (21), связывающих n импульсных переходных функций. В частном случае, когда $m_1(t), \ldots, m_n(t)$ статистически независимы или, другими словами, не коррелированы, т. е. когда

$$R_{m_i\,m_j}(\tau) = 0 \quad \text{при всех } \tau \text{ и } i \neq j,$$

из системы (21) получаем:

$$\begin{aligned} R_{xm_1}(\tau) &= \int_0^\infty R_{m_1}(\tau - \vartheta)\, k_1(\vartheta)\, d\vartheta, \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ R_{xm_n}(\tau) &= \int_0^\infty R_{m_n}(\tau - \vartheta)\, k_n(\vartheta)\, d\vartheta. \end{aligned} \tag{23}$$

Уравнения (23) решаются порознь способом, изложенным в предыдущем разделе. Рассмотрим поэтому только общий случай, когда на вход системы подаются коррелированные случайные стационарные сигналы, отличные от белого шума.

Итак, будем искать решение системы (21), удовлетворяющее условию физической осуществимости

$$\begin{aligned} k_1(t) &= 0 \qquad t < 0, \\ k_2(t) &= 0 \qquad t < 0, \\ &\ldots\ldots\ldots \\ k_n(t) &= 0 \qquad t < 0. \end{aligned}$$

С помощью ортогональных корреляторов все входящие в систему (21) автокорреляционные и взаимнокорреляционные функции можно представить в виде:

$$\begin{aligned} R_{x_i\,x_j}(\tau) &= \sum_{j=1}^{\infty} a_j^{x_i\,x_j}\, \varphi_j(\tau) \qquad \tau > 0, \\ R_{x_i\,x_j}(\tau) &= \sum_{j=1}^{\infty} a_j^{x_i\,x_j}\, \varphi_j(-\tau) \qquad \tau < 0, \\ R_{yx_i}(\tau) &= \sum_{i=1}^{\infty} b_i^{yx_i}\, \varphi_i(\tau) \qquad \tau > 0, \\ R_{yx_i}(\tau) &= \sum_{i=1}^{\infty} c_i^{yx_i}\, \varphi_i(-\tau) \qquad \tau < 0. \end{aligned} \tag{24}$$

Импульсные переходные функции, ортогональные спектры которых неизвестны, представим в виде:

$$k_i(\tau) = \sum_{k=1}^{\infty} V_k^i \varphi_k(\tau) \qquad \tau > 0. \tag{25}$$

Подставляя равенства (24) и (25) в формулы (21), получим:

$$\sum_{i=1}^{\infty} b_i^{yx_1}\varphi_i(\tau) + \sum_{i=1}^{\infty} c_i^{yx_1}\varphi_i(\tau) =$$

$$= \left[\sum_{k=1}^{\infty} V_k^1\varphi_k(\tau)\right] * \left[\sum_{j=1}^{\infty} a_j^{x_1x_1}\varphi_j(\tau) + \sum_{j=1}^{\infty} a_j^{x_1x_1}\varphi_j(\tau)\right] +$$

$$+ \left[\sum_{k=1}^{\infty} V_k^2\varphi_k(\tau)\right] * \left[\sum_{j=1}^{\infty} a_j^{x_2x_1}\varphi_j(\tau) + \sum_{j=1}^{\infty} a_j^{x_2x_1}\varphi_j(\tau)\right] +$$

$$+ \cdots + \left[\sum_{k=1}^{\infty} V_k^n\varphi_k(\tau)\right] * \left[\sum_{j=1}^{\infty} a_j^{x_nx_1}\varphi_j(\tau) + \sum_{j=1}^{\infty} a_j^{x_nx_1}\varphi_j(\tau)\right],$$

$$\sum_{i=1}^{\infty} b_i^{yx_2}\varphi_i(\tau) + \sum_{i=1}^{\infty} c_i^{yx_2}\varphi_i(\tau) =$$

$$= \left[\sum_{k=1}^{\infty} V_k^1\varphi_k(\tau)\right] * \left[\sum_{j=1}^{\infty} a_j^{x_1x_2}\varphi_j(\tau) + \sum_{j=1}^{\infty} a_j^{x_1x_2}\varphi_j(\tau)\right] +$$

$$+ \left[\sum_{k=1}^{\infty} V_k^2\varphi_k(\tau)\right] * \left[\sum_{j=1}^{\infty} a_j^{x_2x_2}\varphi_j(\tau) + \sum_{j=1}^{\infty} a_j^{x_2x_2}\varphi_j(\tau)\right] +$$

$$+ \ldots + \left[\sum_{k=1}^{\infty} V_k^n\varphi_k(\tau)\right] * \left[\sum_{j=1}^{\infty} a_j^{x_nx_2}\varphi_j(\tau) + \sum_{j=1}^{\infty} a_j^{x_nx_2}\varphi_j(\tau)\right],$$

$$\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \qquad (26)$$

$$\sum_{i=1}^{\infty} b_i^{yx_n}\varphi_k(\tau) + \sum_{i=1}^{\infty} c_i^{yx_n}\varphi_i(\tau) =$$

$$= \left[\sum_{k=1}^{\infty} V_k^1\varphi_k(\tau)\right] * \left[\sum_{j=1}^{\infty} a_j^{x_1x_n}\varphi_j(\tau) + \sum_{j=1}^{\infty} a_j^{x_1x_n}\varphi_j(\tau)\right] +$$

$$+ \left[\sum_{k=1}^{\infty} V_k^2\varphi_k(\tau)\right] * \left[\sum_{j=1}^{\infty} a_j^{x_2x_n}\varphi_j(\tau) + \sum_{j=1}^{\infty} a_j^{x_2x_n}\varphi_j(\tau)\right] +$$

$$+ \ldots + \left[\sum_{k=1}^{\infty} V_k^n\varphi_k(\tau)\right] * \left[\sum_{j=1}^{\infty} a_j^{x_nx_n}\varphi_j(\tau) + \sum_{j=1}^{\infty} a_j^{x_nx_n}\varphi_j(\tau)\right].$$

Применяя к обеим частям равенств (26) преобразование Фурье, можно получить следующие соотношения:

$$\sum_{i=1}^{\infty} b_i^{yx_1}\Phi_i(j\omega) + \sum_{i=1}^{\infty} c_i^{yx_1}\Phi_i(-j\omega) =$$

$$= \sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_1x_1}V_k^1\Phi_j(j\omega)\Phi_k(\omega) + \sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_1x_1}V_k^1\Phi_j(j\omega)\Phi_k(j\omega) +$$

$$+ \sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_2x_1}V_k^2\Phi_j(j\omega)\Phi_k(j\omega) + \sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_2x_1}V_k^2\Phi_j(-j\omega)\Phi_k(j\omega) +$$

$$+ \ldots + \sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_nx_1}V_k^n\Phi_j(j\omega)\Phi_k(j\omega) + \sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_nx_1}V_k^n\Phi_j(-j\omega)\Phi_k(j\omega),$$

$$\sum_{i=1}^{\infty} b_i^{yx_2}\Phi_i(j\omega)+\sum_{i=1}^{\infty} c_i^{yx_2}\Phi_i(-j\omega)=$$

$$=\sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_1x_2}V_k^1\Phi_j(j\omega)\Phi_k(j\omega)+\sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_1x_2}V_k^1\Phi_j(-j\omega)\Phi_k(j\omega)+$$

$$+\sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{k_1x_2}V_k^2\Phi_j(j\omega)\Phi_k(j\omega)+\sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_2x_2}V_k^2\Phi_j(-j\omega)\Phi_k(j\omega)+$$

$$+\ldots+\sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_nx_2}V_k^n\Phi_j(j\omega)\Phi_k(j\omega)+\sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_nx_2}V_k^n\Phi_j(-j\omega)\Phi_k(j\omega),$$

. . . . (27)

$$\sum_{i=1}^{\infty} b_i^{yx_n}\Phi_i(j\omega)+\sum_{i=1}^{\infty} c_i^{yx_n}\Phi_i(-j\omega)=$$

$$=\sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_1x_n}V_k^1\Phi_j(j\omega)\Phi_k(j\omega)+\sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_1x_n}V_k^1\Phi_j(-j\omega)\Phi_k(j\omega)+$$

$$+\sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_2x_n}V_k^2\Phi_j(j\omega)\Phi_k(j\omega)+\sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_2x_n}V_k^2\Phi_j(-j\omega)\Phi_k(j\omega)+$$

$$+\ldots+\sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_nx_n}V_k^n\Phi_j(j\omega)\Phi_k(j\omega)+\sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_nx_n}V_k^n\Phi_j(-j\omega)\Phi_k(j\omega).$$

Так же как и в предыдущем случае, умножая обе части каждого из входящих в (27) равенства на $\Phi_i(-j\omega)$, интегрируя в пределах $(-\ \ ,+\ \ )$ и используя теорему Парсеваля, получим:

$$b_i^{yx_1}=\sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_1x_1}V_k^1\overline{C}_{jk}^i+\sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_1x_1}V_k^1\overline{C}_{ij}^k+$$

$$+\sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_2x_1}V_k^2\overline{C}_{jk}^i+\sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_2x_1}V_k^1\overline{C}_{ij}^k+$$

$$+\ldots+\sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_nx_1}V_k^n\overline{C}_{jk}^i+\sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_nx_1}V_k^n\overline{C}_{ij}^k,$$

$$b_i^{yx_2}=\sum_{i,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_1x_2}V_k^1\overline{C}_{jk}^i+\sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_1x_2}V_k^1\overline{C}_{ij}^k+$$

$$+\sum_{i,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_2x_2}V_k^2\overline{C}_{jk}^i+\sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_2x_2}V_k^2\overline{C}_{ij}^k+$$

$$+\ldots+\sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_nx_2}V_k^n\overline{C}_{jk}^i+\sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_nx_2}V_k^n\overline{C}_{ij}^k, \qquad (28)$$

. . . .

$$b_i^{yx_n} = \sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_1x_n} V_k^1 \overline{C}_{jk}^{\,i} + \sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_1x_n} V_k^1 \overline{C}_{ij}^{k} +$$

$$+ \sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_2x_n} V_k^2 \overline{C}_{jk}^{i} + \sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_2x_n} V_k^2 \overline{C}_{ij}^{k} +$$

$$+ \ldots + \sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_nx_n} V_k^n \overline{C}_{jk}^{i} + \sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_nx_n} V_k^n \overline{C}_{ij}^{k}.$$

Аналогично, умножая (27) на $\Phi_l(j\omega)$ и интегрируя в $(-\infty, +\infty)$, будем иметь:

$$C_l^{yx_1} = \sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_1x_1} V_k^1 \overline{C}_{lk}^{j} + \sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_2x_1} V_k^2 \overline{C}_{lk}^{j} +$$

$$+ \ldots + \sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_nx_1} V_k^n \overline{C}_{lk}^{j},$$

$$C_l^{yx_2} = \sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_1x_2} V_k^1 \overline{C}_{lk}^{j} + \sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_2x_2} V_k^2 \overline{C}_{lk}^{j} +$$

$$+ \ldots + \sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_nx_2} V_k^n \overline{C}_{lk}^{j}, \tag{29}$$

. . . .

$$C_l^{yx_n} = \sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_1n} V_k^1 \overline{C}_{lk}^{j} + \sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_2x_n} V_k^2 \overline{C}_{lk}^{j} +$$

$$+ \ldots + \sum_{j,\,k=1}^{\infty} a_j^{x_nx_n} V_k^n \overline{C}_{lk}^{j}.$$

Принимая во внимание все сказанное в предыдущем разделе, окончательно запишем равенства, решая которые, можно получить ОСХ отдельных каналов многоканальной системы:

$$b_l^{yx_1} = \sum_{j,\,k=1}^{l} a_j^{x_1x_1} V_k^1 [\overline{C}_{jk}^{i} + \overline{C}_{ij}^{k}] + \sum_{j,\,k=1}^{l} a_j^{x_2x_1} V_k^2 [\overline{C}_{jk}^{l} + \overline{C}_{ij}^{k}] +$$

$$+ \ldots + \sum_{j,\,k=1}^{l} a_j^{x_nx_1} V_k^n [\overline{C}_{jk}^{i} + \overline{C}_{ij}^{k}],$$

$$b_i^{yx_2} = \sum_{j,\,k=1}^{l} a_j^{x_1x_2} V_k^1]\overline{C}_{jk}^{i} + \overline{C}_{ij}^{k}] + \sum_{j,\,k=1}^{l} a_j^{x_2x_2} V_k^2 [\overline{C}_{jk}^{i} + \overline{C}_{ij}^{k}] +$$

$$+ \ldots + \sum_{j,\,k=1}^{l} a_j^{x_nx_2} V_k^n [\overline{C}_{jk}^{i} + \overline{C}_{ij}^{k}],$$

. . . .

$$b_i^{yx_n} = \sum_{j,k=1}^{l} a_j^{x_1x_n} V_k^1 [C_{jk}^i + \overline{C}_{ij}^k] + \sum_{j,k=1}^{l} a_j^{x_2x_n} V_k^2 [\overline{C}_{ik}^j + \overline{C}_{ij}^k] +$$

$$+ \cdots + \sum_{j,k=1}^{l} a_j^{x_nx_n} V_k^n [\overline{C}_{jk}^i + \overline{C}_{ij}^k],$$

$$C_i^{yx_1} = \sum_{j,k=1}^{l} a_j^{x_1x_1} V_k^1 \overline{C}_{ik}^j + \sum_{j,k=1}^{l} a_j^{x_2x_1} V_k^2 \overline{C}_{ik}^j +$$

$$+ \ldots + \sum_{j,k=1}^{l} a_j^{x_nx_1} V_k^n \overline{C}_{ik}^j,$$

$$C_i^{yx_2} = \sum_{j,k=1}^{l} a_j^{x_1x_2} V_k^1 \overline{C}_{ik}^j + \sum_{j,k=1}^{l} a_j^{x_2x_2} V_k^2 \overline{C}_{ik}^j +$$

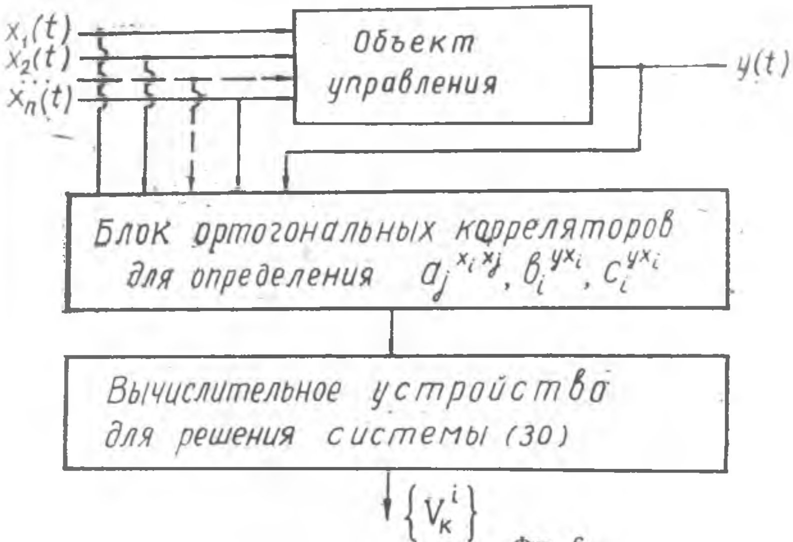
$$+ \ldots + \sum_{j,k=1}^{l} a_j^{x_nx_2} V_k^n \overline{C}_{ik}^j,$$

. . . .

$$C_i^{yx_n} = \sum_{j,k=1}^{l} a_j^{x_1x_n} V_k^1 \overline{C}_{ik}^j + \sum_{j,k=1}^{l} a_i^{x_2x_n} V_k^2 \overline{C}_{lk}^j +$$

$$+ \ldots + \sum_{j,k=1}^{l} a_j^{x_nx_n} V_k^n \overline{C}_{ik}^j.$$

Можно показать, что система (30) имеет единственное решение. Блок-схема практической реализации имеет вид (см. фиг. 6).



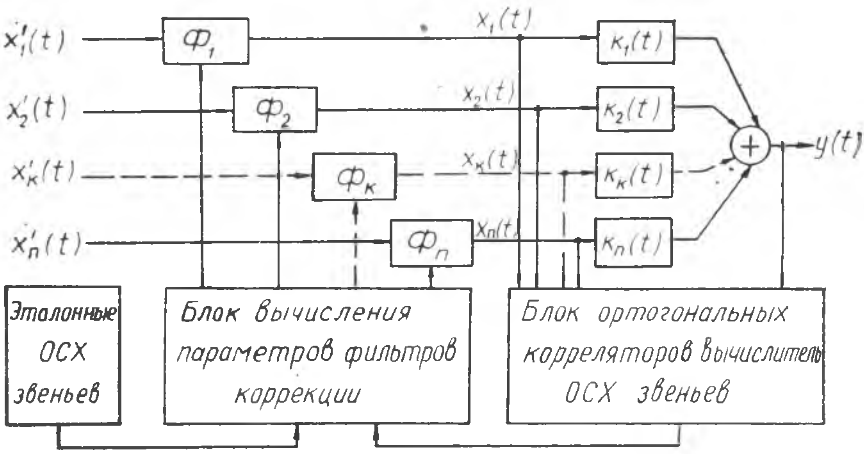
Фиг. 6

4. Решение задачи коррекции и общая структурная схема аналитической самонастраивающейся системы автоматического управления

Выше была решена задача идентификации многомерных управляемых объектов или процессов. Для замыкания алгоритма аналитической самонастройки остается осуществить коррекцию динамических свойств каждого звена в отдельности. Для этого можно воспользоваться схемами ортогональных корректирующих фильтров: а) фильтр с усилителем, имеющим большой коэффициент усиления и ортогональную модель объекта в цепи обратной связи; б) последовательный ортогональный корректирующий фильтр, использующий уравнения связи между ОСХ двух последовательно соединенных звеньев, предложенных в [3].

Как показали эксперименты, указанные здесь схемы коррекции весьма эффективны и могут быть использованы для построения конкретных АСНС.

Полная структурная схема АСНС показана на фиг. 7.



Фиг. 7

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Солодовников. Статистическая динамика линейных систем автоматического управления. Физматгиз, 1960.

2. В. В. Солодовников (ред.). Аналитические самонастраивающиеся системы автоматического управления. Машиностроение, 1965.

3. В. В. Солодовников, А. Н. Дмитриев, Н. Д. Егупов. «Ортогональный метод анализа и синтеза линейных систем автоматического управления на основе понятия моментов» в сб. «Автоматическое управление и вычислительная техника» № 8. Машиностроение, 1967.

4. В. В. Солодовников, А. Н. Дмитриев, Н. Д. Егупов. «Идентификация линейных объектов автоматического управления ортогональным методом моментов». Труды III Международного конгресса ИФАК. Лондон, 1967.

5. А. Н. Дмитриев. Вопросы построения аналитических самонастраивающихся систем автоматического управления ортогональным методом моментов. Диссертация. МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1966.

6. А. Н. Дмитриев. «Методы определения текущих характеристик сигналов в самонастраивающихся системах управления». Труды семинара по теории и практике самонастраивающихся систем, Ленинград, 1966.

7. А. Н. Дмитриев. «Ортогональные методы определения и коррекции динамических характеристик в самонастраивающихся системах». Труды семинара по теории и практике самонастраивающихся систем, Ленинград, 1966.

8. А. Д. Бойков. Идентификация линейных многомерных объектов автоматического управления ортогональным методом моментов. Труды КуАИ им. С. П. Королева, вып. 24. Куйбышев, 1967.