

А. Н. Дмитриев, А. Д. Бойков,  
Н. Д. Егупов

## АВТОМАТИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ

Работа посвящена решению задач синтеза систем автоматического управления при случайных воздействиях. Решение находится в виде ортогонального ряда.

На вход фильтра поступает сигнал вида  $y(t) = g(t) + n(t)$ , где  $y(t)$  — регулярная составляющая входного сигнала;  $n(t)$  — помеха.

На случайный процесс  $n(t)$  наложены следующие ограничения:

1. Процесс  $n(t)$  непрерывен, статистические характеристики его изменяются в весьма широких пределах, однако на достаточных больших интервалах времени процесс  $n(t)$  можно считать «почти стационарным».

2. Для корреляционной функции процесса  $n(t)$  справедливо условие:

$$\int_0^{\infty} |R_{nn}(\tau)| d\tau < \infty.$$

Рассмотрим случай, когда полезный сигнал представляет собой заданную функцию с известными значениями параметров  $a_1, a_2, \dots$ , а помеха имеет неизвестные статистические характеристики. Зная значения коэффициентов  $a_1, a_2, \dots$ , характеризующих сигнал  $g(t)$ , всегда можно выбрать значения коэффициентов ошибки  $C'_0, C'_1, \dots, C'_r$  так, чтобы обеспечить удовлетворение условия  $|\varepsilon_g| < \varepsilon_{g \max}$ .

Именно в этом смысле задание коэффициентов ошибки определяет динамическую точность воспроизведения системой заданной неслучайной составляющей  $g(t)$  полезного сигнала.

Будем считать оптимальной систему, которая удовлетворяет следующим требованиям:

1. Обеспечивает воспроизведение полезного входного сигнала с динамической ошибкой, не превышающей некоторого, наперед заданного, значения  $\varepsilon_g \max$

$$|\varepsilon_{\partial}| \leq \varepsilon_{\partial \max};$$

2. Обеспечивает минимальную дисперсию воспроизведения сигнала  $n(t)$ ;

3. Удовлетворяет условию физической осуществимости, т. е.  $\kappa(t) = 0$  при  $t < 0$ .

Задача оптимизации математически формулируется так: найти минимум функционала

$$\bar{\varepsilon}^2 = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} R_{nn}(\tau - u) k(\tau) k(u) d\tau du \quad (1)$$

при следующих ограничениях:

$$\begin{aligned} 1 - \int_0^{\infty} k(\tau) d\tau &= C_0, \\ \int_0^{\infty} \tau k(\tau) d\tau &= C_1, \\ &\dots \dots \dots \\ (-1)^{r+1} \int_0^{\infty} \tau^r k(\tau) d\tau &= C_r. \end{aligned} \quad (2)$$

Будем представлять импульсную переходную функцию в виде ортогонального ряда. На большом числе практических примеров в работе [1] для объектов высокого порядка (до 8÷16) было показано, что достаточно точное представление функции веса достигается 7—9 членами ортогонального ряда. Вместе с тем показано, что эти члены целиком определяют динамическую систему и дают возможность провести ее полный анализ.

Поэтому логичной является задача определения так называемой оптимальной ОСХ, т. е. таких коэффициентов  $\{c_k\}$ , которые обеспечивали бы выполнение заданного критерия качества.

Представление импульсной переходной функции в виде ортогонального ряда является полезным с той точки зрения, что позволяет использовать **прямые методы вариационного исчисления**, с помощью которых задача оптимизации решается значительно проще, чем использование, предположим, метода последовательных приближений в функциональном пространстве. При использовании понятия ОСХ автоматически решается задача реализации найденного оператора. В качестве ортогонального базиса при рассмотрении вопросов построения аналитических самонастраивающихся моделей и систем выбираются функции, определенные на интервале  $(0, \infty)$  и имеющие преобразование Лапласа, при этом эти функции легко физически реализуются с помощью RC-элементов. Использование функциональных пространств ставит в качестве самостоятельной и достаточно серьезной задачу

реализации найденного оператора. Синтез аналитических самонастраивающихся систем в первую очередь требует решения и этой задачи.

Итак, импульсную переходную функцию искомого оператора представим в виде разложения по выбранной системе ортогональных функций, т. е.

$$k(t) = \sum_{i=1}^N c_i \varphi_i(t),$$

где  $\varphi_i(t)$ ,  $i=1, 2, \dots$  — функции выбранной ортогональной системы. Они должны удовлетворять следующим условиям:

1. Функции ортогональной системы  $\{\varphi_k(t)\}$  должны быть непрерывны на интервале;

$$2. \int_0^{\infty} |\varphi_i(t)| dt < \infty, \quad i = 1, 2, \dots, N;$$

3. Функции ортогональной системы, являющиеся импульсными переходными функциями фильтров оптимальной модели и других вычислительных устройств (ортогональный коррелятор) должны быть легко физически реализуемы.

Предполагая, что оптимальный оператор динамической системы с достаточной степенью точности будет определяться координатами в выбранном ортогональном базисе, равенства (1) и (2) перепишутся в виде

$$\bar{\varepsilon}^2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N c_i c_j \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} R_{nn}(\tau - u) \varphi_i(\tau) \varphi_j(u) d\tau du, \quad (3)$$

$$\Phi_1 = c'_0 - 1 + \sum_{i=1}^N c_i A_i,$$

$$\Phi_2 = \sum_{i=1}^N c_i B_i - c'_1, \quad (4)$$

.....

$$\Phi_r = \sum_{i=1}^N c_i G_i - c'_r,$$

где

$$A_i = \int_0^{\infty} \varphi_i(\tau) d\tau,$$

$$B_i = \int_0^{\infty} \tau \varphi_i(\tau) d\tau, \quad (5)$$

.....

$$G_i = (-1)^r \int_0^{\infty} \tau^r \varphi_i(\tau) d\tau.$$

Вводя следующее обозначение

$$W_{ij} = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} K_{nn}(\tau - u) \varphi_i(\tau) \varphi_j(u) d\tau du, \quad (6)$$

задача оптимизации может быть записана так:

Найти минимум функционала

$$\bar{\varepsilon}^2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N c_i c_j W_{ij} \quad (7)$$

при удовлетворении следующих уравнений связи:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= c'_0 - 1 + \sum_{i=1}^N c_i A_i, \\ \Phi_2 &= \sum_{i=1}^N c_i B_i - c'_1, \\ &\dots \dots \dots \\ \Phi_r &= \sum_{i=1}^N c_i G_i - c'_r. \end{aligned} \quad (8)$$

Для нахождения значений коэффициентов  $c_i$  ( $c_i$  — действительные числа), обеспечивающих минимум среднеквадратической ошибки при условии, что удовлетворяются уравнения связи (4), составим функцию Лагранжа (условный экстремум функционала находится с помощью множителей Лагранжа):

$$\Phi = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N c_i c_j W_{ij} + \lambda_1 \Phi_1 + \lambda_2 \Phi_2 + \dots + \lambda_r \Phi_r, \quad (9)$$

где  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_r$  — неопределенные множители Лагранжа,  $i, j = 1, 2, \dots, N$ .

Дифференцируя выражение для вспомогательной функции Лагранжа по  $c_i$  и приравнявая каждую из полученных зависимостей нулю, получим  $N$  уравнений:

$$2 \sum_{j=1}^N c_j W_{ij} + \lambda_1 A_i + \lambda_2 B_i + \dots + \lambda_r G_i = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (10)$$

Используя  $N$  уравнений (10), а также уравнения связи (8), получим  $N+r$  алгебраических уравнений для определения неизвестных коэффициентов  $\{c_k\}$  и неопределенных множителей Лагранжа  $\lambda_i$  ( $i=1, 2, \dots, N$ ).

В случае, если на вход системы подается помеха типа белого шума, вспомогательная функция Лагранжа принимает вид

$$\Phi = \sum_{i=1}^N c_i^2 + \lambda_1 \Phi_1 + \lambda_2 \Phi_2 + \dots + \lambda_r \Phi_r$$

и процесс нахождения данных для составления системы алгебраических уравнений и сами уравнения значительно упрощаются.

Анализируя систему уравнений для определения координат  $c = (c_1, c_2, \dots, c_n)$ , легко видеть, что для непрерывного определе-

ния оптимальных значений  $c_i (i=1, 2, \dots, N)$  необходимо непрерывно определять матрицу  $W_{ij}(t)$ .

Так как входной сигнал  $y(t)$  имеет переменное математическое ожидание (регулярную составляющую  $g(t)$  — полезный входной сигнал), то для вычисления матрицы  $W_{ij}$  необходимо с помощью ЦВМ провести центрирование случайного процесса  $y(t)$ .

Здесь же необходимо отметить, что операция центрирования иногда значительно искажает кривую спектральной плотности на низких частотах.

Можно показать, что [2]

$$W_{ij}(t) = \frac{1}{t} \int_0^t g_i(\tau) g_j(\tau) d\tau, \quad (11)$$

где

$$g_i(t) = \int_0^t n(\tau) g_i(t - \tau) d\tau. \quad (12)$$

В самонастраивающейся модели непрерывно должна решаться следующая система алгебраических уравнений:

$$2 \sum_{j=1}^N c_j(t) W_{ij}(t) + \lambda_1 A_i + \lambda_2 B_i + \dots + \lambda_r G_i = 0, \quad (13)$$

$$\begin{aligned} c'_0 - 1 + \sum_{i=1}^N c_i(t) A_i &= 0, \\ \sum_{i=1}^N c_i(t) B_i - c'_1 &= 0, \\ \dots & \dots \dots \dots \\ \sum_{i=1}^N c_i(t) G_i - c'_r &= 0. \end{aligned} \quad (14)$$

В общем случае можно показать, что система уравнений (13) и (14) для определения координат  $c_i (i=1, 2, \dots, N)$  имеет единственное решение  $c = (c_1, c_2, \dots, c_N)$ , при этом при  $t \rightarrow \infty W_{ij} \rightarrow W_{ij}$  и, следовательно, решение системы стремится к решению системы, определенной формулами (7) и (8).

Таким образом, в результате реализации алгоритма (13) и (14) оптимальная модель определяется равенством

$$k(t) = \sum_{i=1}^N c_i \varphi_i(t).$$

Можно показать, что  $\lim_{t \rightarrow \infty} \bar{\varepsilon}_t^2 = \bar{\varepsilon}^2$ .

На основе утверждения о том, что система (13) и (14) позволяет найти оптимальные значения элементов обобщенной спектральной характеристики динамической модели в выбранном ортогональном базисе, можно сделать вывод, что среднеквадратическая ошибка на выходе фильтра, определяемого коэффициентом

ми  $c = (c_1, c_2, \dots, c_N)$  при  $t > T_0$  ( $T_0$  — интервал времени, через который значения матрицы  $W_{ij}(t)$  достаточно мало отличаются от значений  $W_{ij}$ ), будет близка к величине среднеквадратической ошибки на выходе оптимального фильтра, а динамическая ошибка воспроизведения регулярной составляющей  $g(t)$  не будет превышать наперед заданной величины  $\epsilon_g \max$ .

Так как возможности аналогового фильтра ограничены, а также при  $t < T_0$  в решении системы уравнений (13), (14) могут иметь место значительные ошибки, на фильтр, реализующий оптимальный оператор, необходимо в этих случаях подавать значения  $c_i(t)$  в соответствии со следующими соотношениями [3]:

$$\begin{aligned} \tilde{c}_i(t) &= c_i(t), \text{ при } |c_i(t)| < \xi_i, \\ \tilde{c}_i(t) &= +\xi_i, \text{ при } |c_i(t)| \geq \xi_i, \\ \tilde{c}_i(t) &= -\xi_i, \text{ при } c_i(t) \leq -\xi_i, \end{aligned}$$

$\xi_i$  — установленное заранее значение границы изменения  $i$ -го — коэффициента разложения.

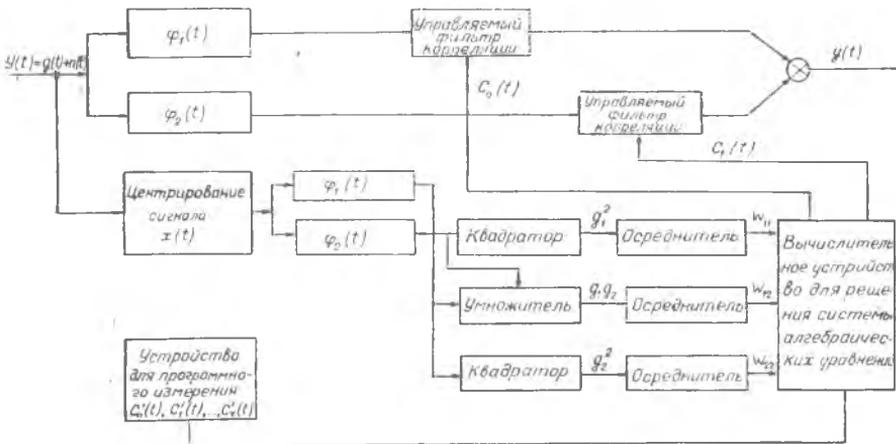


Рис. 1.

Структурная схема получения оптимальной модели для  $N=2$  изображена на рис. 1.

В качестве примера рассмотрим методику синтеза ортогональной модели, если за помеху принять сигнал типа белого шума, а ортогональным базисом служат функции Лягерра

$$\begin{aligned} \varphi_0(t) &= ke^{-\frac{kt}{2}}, \\ \varphi_1(t) &= (1 - kt)ke^{-\frac{kt}{2}}, \\ \varphi_2(t) &= \left(1 - 2kt + \frac{1}{2!}k^2t^2\right)ke^{-\frac{kt}{2}}, \\ &\dots \end{aligned}$$

Выражение для СКО в рассматриваемом нами случае (помеха — белый шум) имеет вид

$$\varepsilon^2 = \rho \int_0^{\infty} \left[ \sum_{i=0}^7 c_i \varphi_i(t) \right]^2 dt = \rho k \sum_{i=0}^7 c_i^2$$

(в этом примере взято восемь элементов ОСХ).

Уравнения связи запишутся так:

$$c'_0 = 1 - \int_0^{\infty} k(\tau) d\tau = 1 - \sum_{i=0}^7 c_i A_i,$$

$$c'_1 = \int_0^{\infty} \tau k(\tau) d\tau = \sum_{i=0}^7 c_i B_i,$$

$$c'_2 = - \int_0^{\infty} \tau^2 k(\tau) d\tau = - \sum_{i=0}^7 c_i D_i,$$

или, что то же самое:

$$\Phi_1 = c'_0 - 1 + \sum_{i=0}^7 c_i A_i,$$

$$\Phi_2 = c'_1 - \sum_{i=0}^7 c_i B_i,$$

$$\Phi_3 = c'_2 + \sum_{i=0}^7 c_i D_i,$$

где

$$A_i = \int_0^{\infty} \varphi_i(\tau) d\tau,$$

$$B_i = \int_0^{\infty} \tau \varphi_i(\tau) d\tau,$$

$$D_i = \int_0^{\infty} \tau^2 \varphi_i(\tau) d\tau, \quad (i = 0, 1, 2, \dots, 7).$$

Значения  $c'_0$ ,  $c'_1$ ,  $c'_2$  — заданы.

В нашем случае вспомогательная функция Лагранжа имеет вид

$$F' = \rho k \sum_{i=0}^7 c_i^2 + \lambda_1 \sum_{i=0}^7 c_i A_i - \lambda_2 \sum_{i=0}^7 c_i B_i + \lambda_3 \sum_{i=0}^7 c_i D_i.$$

Тогда для нахождения оптимальной (в указанном выше смысле) ортогональной модели необходимо реализовать следующий алгоритм:

$$\begin{aligned} 2 k \rho c_0 + \lambda_1 A_0 - \lambda_2 B_0 + \lambda_3 D_0 &= 0, \\ 2 k \rho c_1 + \lambda_1 A_1 - \lambda_2 B_1 + \lambda_3 D_1 &= 0, \\ 2 k \rho c_2 + \lambda_1 A_2 - \lambda_2 B_2 + \lambda_3 D_2 &= 0, \\ 2 k \rho c_3 + \lambda_1 A_3 - \lambda_2 B_3 + \lambda_3 D_3 &= 0, \\ \dots & \dots \end{aligned}$$

$$2k\rho c_7 + \lambda_1 A_7 - \lambda_2 B_7 + \lambda_3 D_7 = 0,$$

$$c'_0 - 1 + \sum_{i=0}^7 c_i A_i = 0,$$

$$c'_1 - \sum_{i=0}^7 c_i B_i = 0,$$

$$c'_2 + \sum_{i=0}^7 c_i D_i = 0,$$

где постоянные  $A_i, B_i, D_i$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, 7$ ) для функций Лягерра имеют следующие значения:

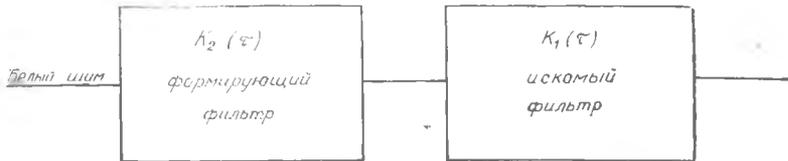


Рис. 2.

$$A_0 = 2, \quad B_0 = \frac{4}{k}; \quad B_1 = -\frac{12}{k}; \quad B_2 = \frac{68}{k};$$

$$A_1 = -2, \quad B_3 = \frac{116}{k}; \quad B_4 = \frac{324}{k}; \quad B_5 = \frac{436}{k};$$

$$A_2 = 2,$$

$$\dots$$

$$A_n = (-1)^n 2, \quad B_6 = \frac{772}{k}; \quad B_7 = \frac{948}{k}.$$

$$D_0 = \frac{16}{k^2}; \quad D_1 = -\frac{80}{k^2}; \quad D_2 = \frac{112}{k^2}; \quad D_3 = -\frac{688}{k^2};$$

$$D_4 = \frac{80}{k^2}; \quad D_5 = -\frac{1936}{k^2}; \quad D_6 = -\frac{80}{k^2}; \quad D_7 = -\frac{3824}{k^2}.$$

Система работает следующим образом. На  $RC$  — элементах набирается схема, реализующая ортогональные функции Лягерра, коэффициенты которых можно в заданных пределах изменять.

С помощью коррелятора замеряется уровень шума  $\rho$  и решается система алгебраических уравнений (13), (14). Масштабный множитель  $k$  выбирается в процессе работы системы, исходя из достижения наилучшей сходимости ряда, аппроксимирующего импульсную переходную функцию фильтра. Найденные из решения системы (13), (14) значения коэффициентов  $c_i$  ( $i = 0, 1, 2, \dots, 7$ ) подаются на управляемый ортогональный фильтр.

Покажем еще один, более простой, метод реализации самонастраивающегося фильтра (предыдущий метод построения адаптивного фильтра при  $n=8$  требует 88 умножителей и осреднителей, не считая устройства для решения системы алгебраических уравнений).

В качестве ортогонального базиса, как и прежде, будем использовать функции Лягерра.

Выражение для среднеквадратической ошибки при использовании понятия ОСХ имеет вид

$$\bar{\varepsilon}^2 = \rho \int_0^{\infty} k_3^2(t) dt = \rho k \sum_{i=0}^{\infty} g_i^2, \quad (15)$$

где  $k_3(t) = \sum_{i=0}^n g_i L_i(t)$  — импульсная переходная функция эквивалентного фильтра (см. рис. 2);

$k_1(t) = \sum_{i=0}^n c_i L_i(t)$  — импульсная переходная функция искомого фильтра;

$k_2(t) = \sum_{i=0}^{n*} g'_i L_i(t)$  — импульсная переходная функция формирующего фильтра.

Используя зависимости, связывающие элементы обобщенной спектральной характеристики последовательного соединения двух звеньев с элементами ОСХ каждого звена, получим (для  $n=7$ ):

$$\begin{aligned} g_0 &= c_0 a_{00}, \\ g_1 &= c_0 a_{01} + c_1 a_{11}, \\ g_2 &= c_0 a_{02} + c_1 a_{12} + c_2 a_{22}, \\ g_3 &= c_0 a_{03} + c_1 a_{13} + c_2 a_{23} + c_3 a_{33}, \\ g_4 &= c_0 a_{04} + c_1 a_{14} + c_2 a_{24} + c_3 a_{34} + c_4 a_{44}, \\ g_5 &= c_0 a_{05} + c_1 a_{15} + c_2 a_{25} + c_3 a_{35} + c_4 a_{45} + c_5 a_{55}, \\ g_6 &= c_0 a_{06} + c_1 a_{16} + c_2 a_{26} + c_3 a_{36} + c_4 a_{46} + c_5 a_{56} + c_6 a_{66}, \\ g_7 &= c_0 a_{07} + c_1 a_{17} + c_2 a_{27} + c_3 a_{37} + c_4 a_{47} + c_5 a_{57} + c_6 a_{67} + c_7 a_{77}, \end{aligned} \quad (16)$$

где  $a_{ij}$  — коэффициенты, которые элементарным образом выражаются через элементы обобщенной спектральной характеристики формирующего фильтра.

Таким образом, ставится задача нахождения минимума функционала

$$\varepsilon^2 = \rho k \sum_{i=0}^7 g_i^2 \quad (17)$$

при выполнении уравнений связи:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= c'_0 - 1 + \sum_{i=0}^7 c_i A_i, \\ \Phi_2 &= c'_1 - \sum_{i=0}^7 c_i B_i, \\ \Phi_3 &= c'_2 + \sum_{i=0}^7 c_i D_i. \end{aligned} \quad (18)$$

Условный экстремум будем искать при помощи множителей Лагранжа. Выражение для вспомогательной функции Лагранжа запишется так:

$$F = \rho k' \sum_{i=0}^7 g_i^2 + \lambda_1 \sum_{i=0}^7 c_i A_i - \lambda_2 \sum_{i=0}^7 c_i B_i + \lambda_3 \sum_{i=0}^7 c_i D_i. \quad (19)$$

Так же, как и в предыдущем случае, значения коэффициентов ошибок  $c'_0, c'_1, c'_2$  заданы, в общем случае они могут быть функциями времени.

Если от выражения (19) взять производные по  $c_i (i=0, 1, 2, \dots, 7)$  и каждое из полученных зависимостей приравнять нулю, то получим алгоритм, который необходимо реализовать, чтобы получить импульсную переходную функцию искомого фильтра в виде разложения по ортогональным функциям:

$$E_{00}C_0 + E_{01}C_1 + E_{02}C_2 + E_{03}C_3 + E_{04}C_4 + E_{05}C_5 + E_{06}C_6 + E_{07}C_7 + \lambda_1 A_0 - \lambda_2 B_0 + \lambda_3 D_0 = 0,$$

$$E_{10}C_0 + E_{11}C_1 + E_{12}C_2 + E_{13}C_3 + E_{14}C_4 + E_{15}C_5 + E_{16}C_6 + E_{17}C_7 + \lambda_1 A_1 - \lambda_2 B_1 + \lambda_3 D_1 = 0,$$

$$E_{20}C_0 + E_{21}C_1 + E_{22}C_2 + E_{23}C_3 + E_{24}C_4 + E_{25}C_5 + E_{26}C_6 + E_{27}C_7 + \lambda_1 A_2 - \lambda_2 B_2 + \lambda_3 D_2 = 0,$$

$$E_{30}C_0 + E_{31}C_1 + E_{32}C_2 + E_{33}C_3 + E_{34}C_4 + E_{35}C_5 + E_{36}C_6 + E_{37}C_7 + \lambda_1 A_3 - \lambda_2 B_3 + \lambda_3 D_3 = 0,$$

$$E_{40}C_0 + E_{41}C_1 + E_{42}C_2 + E_{43}C_3 + E_{44}C_4 + E_{45}C_5 + E_{46}C_6 + E_{47}C_7 + \lambda_1 A_4 - \lambda_2 B_4 + \lambda_3 D_4 = 0,$$

$$E_{50}C_0 + E_{51}C_1 + E_{52}C_2 + E_{53}C_3 + E_{54}C_4 + E_{55}C_5 + E_{56}C_6 + E_{57}C_7 + \lambda_1 A_5 - \lambda_2 B_5 + \lambda_3 D_5 = 0,$$

$$E_{60}C_0 + E_{61}C_1 + E_{62}C_2 + E_{63}C_3 + E_{64}C_4 + E_{65}C_5 + E_{66}C_6 + E_{67}C_7 + \lambda_1 A_6 - \lambda_2 B_6 + \lambda_3 D_6 = 0,$$

$$E_{70}C_0 + E_{71}C_1 + E_{72}C_2 + E_{73}C_3 + E_{74}C_4 + E_{75}C_5 + E_{76}C_6 + E_{77}C_7 + \lambda_1 A_7 - \lambda_2 B_7 + \lambda_3 D_7 = 0,$$

$$A_0 C_0 + A_1 C_1 + A_2 C_2 + A_3 C_3 + A_4 C_4 + A_5 C_5 + A_6 C_6 + A_7 C_7 = 1 - C'_0,$$

$$B_0 C_0 + B_1 C_1 + B_2 C_2 + B_3 C_3 + B_4 C_4 + B_5 C_5 + B_6 C_6 + B_7 C_7 = C'_1,$$

$$D_0 C_0 + D_1 C_1 + D_2 C_2 + D_3 C_3 + D_4 C_4 + D_5 C_5 + D_6 C_6 + D_7 C_7 = -C'_2.$$

В системе (20) значения постоянных  $A_i, B_i, D_i (i=0, 1, 2, \dots, 7)$  приведены выше, а коэффициенты  $E_{ij}$  с помощью уравнений связи (табл. 1) выражаются через постоянные числа  $a_{ij}$ .

Описанный здесь метод может использоваться для получения оптимальной обобщенной спектральной характеристики динамической системы, если известны статистические характеристики помехи и значения коэффициентов ошибок.

В связи с тем, что изложенный метод определения оптималь-

ной ОСХ легко поддается алгоритмизации, то его применение должно в необходимой мере опираться на использование цифровой вычислительной техники. В последнем случае применение аналоговых вычислительных устройств представляется не рациональным.

Теперь перейдем к рассмотрению метода, позволяющего автоматически определять значения элементов обобщенной спектральной характеристики формирующего фильтра.

Это делается весьма просто. С помощью ортогонального коррелятора находится корреляционная функция помехи в виде разложения по некоторой системе ортогональных функций. Элементы обобщенной спектральной характеристики формирующего фильтра можно легко выразить через коэффициенты разложения корреляционной функции помехи.

Таким образом, процесс самонастройки осуществляется следующим образом. С помощью фильтра или ЦВМ производится центрирование «почти стационарного» на некоторых, достаточно длительных интервалах времени случайного процесса  $n(t)$ , после чего он подается на ортогональный коррелятор, на выходе которого получаем

$$R(\tau) = \sum_{i=0}^{\infty} V_i \varphi_i(t).$$

Величины коэффициентов разложения  $\{V_i\}$  преобразуются в цифровую форму и подаются в ЦВМ, в которой вычисляются элементы ОСХ формирующего фильтра.

После того, как ОСХ формирующего фильтра найдена, по формулам табл. 1 вычисляются коэффициенты  $E_{ij}$ . Теперь имеются все данные для решения системы алгебраических уравнений (20).

Такой процесс повторяется непрерывно, чем обеспечивается

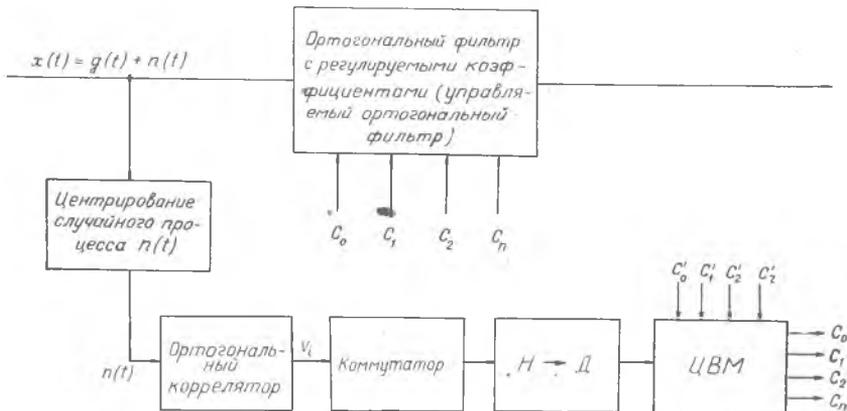


Рис. 3.

$i$	0	1
0	$a_{00}^2 + a_{01}^2 + a_{02}^2 + a_{03}^2 + a_{04}^2 + a_{05}^2 + a_{06}^2 + a_{07}^2$	$a_{01}a_{11} + a_{02}a_{12} + a_{03}a_{13} + a_{04}a_{14} + a_{05}a_{15} + a_{06}a_{16} + a_{07}a_{17}$
1	$a_{01}a_{11} + a_{02}a_{12} + a_{03}a_{13} + a_{04}a_{14} + a_{05}a_{15} + a_{06}a_{16} + a_{07}a_{17}$	$a_{11}^2 + a_{12}^2 + a_{13}^2 + a_{14}^2 + a_{15}^2 + a_{16}^2 + a_{17}^2$
2	$a_{02}a_{22} + a_{05}a_{23} + a_{08}a_{24} + a_{05}a_{25} + a_{06}a_{26} + a_{07}a_{27}$	$a_{12}a_{22} + a_{13}a_{23} + a_{14}a_{24} + a_{15}a_{25} + a_{16}a_{26} + a_{17}a_{27}$
3	$a_{03}a_{33} + a_{04}a_{34} + a_{05}a_{35} + a_{06}a_{36} + a_{07}a_{37}$	$a_{13}a_{33} + a_{14}a_{34} + a_{15}a_{35} + a_{16}a_{36} + a_{17}a_{37}$
4	$a_{04}a_{44} + a_{05}a_{45} + a_{06}a_{46} + a_{07}a_{47}$	$a_{14}a_{44} + a_{15}a_{45} + a_{16}a_{46} + a_{17}a_{47}$
5	$a_{05}a_{55} + a_{06}a_{56} + a_{07}a_{57}$	$a_{15}a_{55} + a_{16}a_{56} + a_{17}a_{57}$
6	$a_{06}a_{66} + a_{07}a_{67}$	$a_{16}a_{66} + a_{17}a_{67}$
7	$a_{07}a_{77}$	$a_{17}a_{77}$

$i$	2	3
0	$a_{02}a_{22} + a_{03}a_{23} + a_{04}a_{24} + a_{05}a_{25} + a_{06}a_{26} + a_{07}a_{27}$	$a_{03}a_{33} + a_{04}a_{34} + a_{05}a_{35} + a_{06}a_{36} + a_{07}a_{37}$
1	$a_{12}a_{22} + a_{13}a_{23} + a_{14}a_{24} + a_{15}a_{25} + a_{16}a_{26} + a_{17}a_{27}$	$a_{13}a_{23} + a_{14}a_{34} + a_{15}a_{35} + a_{16}a_{36} + a_{17}a_{37}$
2	$a_{22}^2 + a_{23}^2 + a_{24}^2 + a_{25}^2 + a_{26}^2 + a_{27}^2$	$a_{23}a_{34} + a_{24}a_{34} + a_{25}a_{35} + a_{26}a_{36} + a_{27}a_{37}$
3	$a_{23}a_{33} + a_{24}a_{34} + a_{25}a_{35} + a_{26}a_{36} + a_{27}a_{37}$	$a_{33}^2 + a_{34}^2 + a_{35}^2 + a_{36}^2 + a_{37}^2$
4	$a_{24}a_{44} + a_{25}a_{45} + a_{26}a_{46} + a_{27}a_{47}$	$a_{34}a_{44} + a_{35}a_{45} + a_{36}a_{46} + a_{37}a_{47}$
5	$a_{25}a_{55} + a_{26}a_{56} + a_{27}a_{57}$	$a_{35}a_{55} + a_{36}a_{56} + a_{37}a_{57}$
6	$a_{26}a_{66} + a_{27}a_{67}$	$a_{36}a_{66} + a_{37}a_{67}$
7	$a_{27}a_{77}$	$a_{37}a_{77}$

$i$	4	5
0	$a_{04}a_{44} + a_{05}a_{45} + a_{06}a_{46} + a_{07}a_{47}$	$a_{05}a_{55} + a_{06}a_{56} + a_{07}a_{57}$
1	$a_{14}a_{44} + a_{15}a_{45} + a_{16}a_{46} + a_{17}a_{47}$	$a_{15}a_{55} + a_{16}a_{56} + a_{17}a_{57}$
2	$a_{24}a_{44} + a_{25}a_{45} + a_{26}a_{46} + a_{27}a_{47}$	$a_{25}a_{55} + a_{26}a_{56} + a_{27}a_{57}$
3	$a_{34}a_{44} + a_{35}a_{45} + a_{36}a_{46} + a_{37}a_{47}$	$a_{35}a_{55} + a_{36}a_{56} + a_{37}a_{57}$
4	$a_{44}^2 + a_{45}^2 + a_{46}^2 + a_{47}^2$	$a_{45}a_{55} + a_{46}a_{56} + a_{47}a_{57}$
5	$a_{45}a_{55} + a_{46}a_{56} + a_{47}a_{57}$	$a_{55}^2 + a_{56}^2 + a_{57}^2$
6	$a_{46}a_{66} + a_{47}a_{67}$	$a_{56}a_{66} + a_{57}a_{67}$
7	$a_{47}a_{77}$	$a_{57}a_{77}$

$i$	6	7
0	$a_{06}a_{66} + a_{07}a_{67}$	$a_{07}a_{77}$
1	$a_{16}a_{66} + a_{17}a_{67}$	$a_{17}a_{77}$
2	$a_{26}a_{66} + a_{27}a_{67}$	$a_{27}a_{77}$
3	$a_{36}a_{66} + a_{37}a_{67}$	$a_{37}a_{77}$
4	$a_{46}a_{66} + a_{47}a_{67}$	$a_{47}a_{77}$
5	$a_{56}a_{66} + a_{57}a_{67}$	$a_{57}a_{77}$
6	$a_{66}^2 + a_{67}^2$	$a_{67}a_{77}$
7	$a_{67}a_{77}$	$a_{77}^2$

непрерывное определение оптимальной в указанном выше смысле обобщенной спектральной характеристики.

Блок-схема самонастраивающейся модели, построенной по указанному выше методу, изображена на рис. 3.

## ВЫВОДЫ

В работе решена задача автоматического синтеза систем автоматического управления при случайных воздействиях для случая, когда полезный сигнал представляет собой функцию с известными значениями параметров, а помеха имеет неизвестные статистические характеристики.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Солодовников, А. Н. Дмитриев, Н. Д. Егупов. Ортогональный метод анализа и синтеза линейных систем автоматического управления на основе понятия моментов. Сб. «Автоматическое управление и вычислительная техника», № 8. «Машиностроение», 1968.

2. А. Д. Бойков, А. Н. Дмитриев, Н. Д. Егупов. Ортогональный принцип построения аналитических самонастраивающихся систем автоматического управления. Научные труды вузов Поволжья «Автоматические измерительные и регулирующие устройства», вып. 4. Куйбышев, 1968.

3. O. Sefl, Filters and predictors which adapt their values to the unknown parameters of input process. Trans of the Second Prague conference on the information theory and statistica. decision funktions, Prague, 1960.