

ДЕТЕРМИНИРОВАННЫЕ САМОНАСТРАИВАЮЩИЕСЯ СИСТЕМЫ

В. Г. Чекалин

Душанбе

В статье рассматриваются вопросы проектирования систем автоматического управления для объектов с переменными параметрами заданной структуры. Подобные задачи характерны для систем управления в летательных аппаратах.

Действительно, динамику объекта широкого класса летательных аппаратов можно описать дифференциальным уравнением с переменными во времени коэффициентами вида

$$a_0(t)\varphi + \dots + a_i(t)\frac{d^i\varphi}{dt^i} + \dots + a_n(t)\frac{d^n\varphi}{dt^n} = \mu(t) + n(t), \quad (1)$$

где $\varphi(t)$ — регулируемая величина;

$\mu(t)$ — регулирующее воздействие;

$n(t)$ — помеха, приведенная ко входу объекта;

$a_i(t)$ — параметры объекта.

Будем называть такие объекты объектами с переменными параметрами (под параметрами понимаются коэффициенты дифференциального уравнения).

Для рассматриваемого класса объектов структура (вид уравнения) и область изменения параметров, как правило, известны заранее перед проектированием системы управления. Неизвестными являются только законы изменения параметров объекта, так как они определяются целым рядом неподдающихся учету факторов.

В этом случае задачу проектирования системы автоматического управления можно рассматривать как задачу проектирования при неполной априорной информации относительно объекта. Информация об объекте складывается из информации об его операторе, о состоянии объекта (его координатах) и о возмущениях [1].

За последнее время в литературе появилось большое количество работ [2, 3, 4, 5, 6], посвященных новым типам автоматических систем, в которых управляющее устройство работает в изменяющихся условиях управления, не имея полной информации об управляемом объекте и получая эту информацию в процессе управления. Будем объединять такие системы под общим названием самонастраивающихся систем.

При создании самонастраивающихся систем большое значение имеет объем априорной информации о процессе управления. Например, учет известной структуры и области изменения параметров объекта позволяет значительно упростить контур самонастройки и увеличить его быстродействие. Вообще, чем больше элемент детерминизма (определенности) вносится в самонастраивающуюся систему, тем проще и активнее получается контур самонастройки [7].

Для нашего класса объектов можно использовать значительный объем априорной информации, которая известна перед конструированием системы управления. Это позволяет рассматривать самонастраивающуюся систему как детерминированную самонастраивающуюся систему. Детерминированной самонастраивающейся системой будем называть самонастраивающуюся систему, для которой заранее перед проектированием известна структура оператора, описывающего динамику объекта. Общая блок-схема системы представлена на рис. 1.

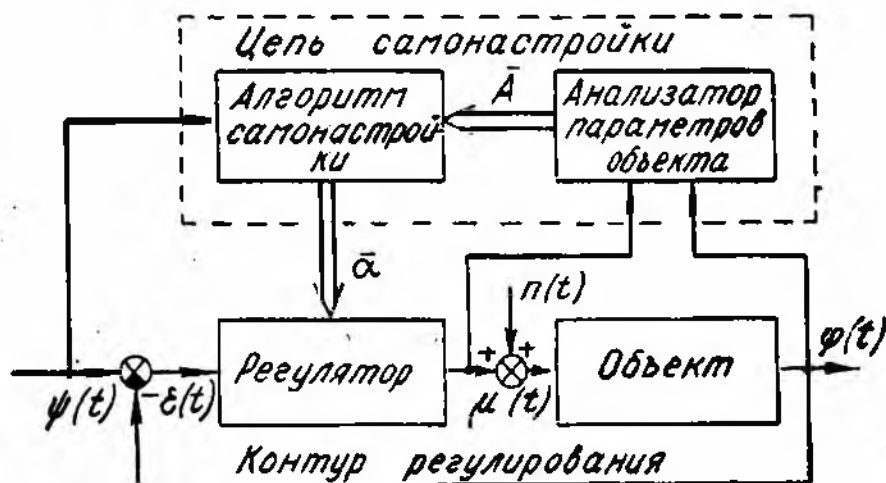


Рис. 1. Блок-схема самонастраивающейся системы.

Контур регулирования решает основную задачу регулирования и строится по замкнутому циклу. Контур самонастройки состоит из двух блоков: блока (опознавания) анализа параметров объекта и блока алгоритма самонастройки. В задачу блока опознавания входит измерение изменяющихся параметров объекта в процессе нормальной работы системы. Выработка командного сигнала для подстройки параметров регулятора производится блоком алгоритма самонастройки.

Быстродействие и качество работы детерминированной самонастраивающейся системы в первую очередь определяется тем, насколько быстро и полно происходит опознавание (измерение) параметров объекта. Эту задачу решает блок опознавания. По своей структуре блок опознавания может представлять сложную систему, поэтому в дальнейшем будем называть его системой опознавания.

Отличительной чертой работы системы опознавания является то, что параметры объекта непосредственному измерению не поддаются и о их величине можно судить только через сигнальные соотношения вход — выход объекта. Задача еще осложняется тем, что опознавание в самонастраивающихся системах должно производиться при нормальном рабочем режиме основного контура системы. Это накладывает определенные ограничения на применимость активных методов опознавания, которые, как правило, намного проще в реализации [6].

При выборе системы опознавания большое значение имеет учет заранее известной информации: чем больше ее объем, тем быстрее и проще могут решаться задачи опознавания. Эффективным методом опознавания коэффициентов дифференциального уравнения может быть метод, основанный на обработке контролируемых выходных и входных сигналов объекта специально подобранной системой ортогональных модулирующих функций. Метод применим как к линейным, так и к нелиней-

ным объектам заданной структуры и позволяет конструировать системы активного и пассивного опознавания. Впервые идея этого метода для случая последовательной обработки применена в [8].

Принцип метода рассмотрим на примере анализа параметров объекта (1). Принимаем, что за время цикла измерения параметры объекта остаются неизменными, тогда для отрезка времени измерения можно рассматривать уравнение объекта, как уравнение с постоянными коэффициентами:

$$a_0 \varphi + \dots + a_i \frac{d^i \varphi}{dt^i} + \dots + a_n \frac{d^n \varphi}{dt^n} = \mu(t) + n(t). \quad (2)$$

Для определения неизвестных параметров объекта $a_0, a_1, \dots, a_n$ необходимо установить взаимосвязь между входным $\mu(t)$ и выходным $\varphi(t)$ сигналами. Однако в реальной системе измерению поддается выходной сигнал с составляющей реакции от помехи $n(t)$ (см. рис. 1), а сама помеха измерению не поддается. Следовательно, задача установления взаимосвязи вход — выход объекта становится неопределенной. Кроме того, при прямом методе [5] она осложняется трудностью измерения производных. Практически можно производить измерение не выше второй производной.

Для преодоления перечисленных трудностей умножим правую и левую части уравнения (2) на известную функцию $\Phi(t)$ и проинтегрируем полученные члены правой и левой частей от 0 до T :

$$a_0 \int_0^T \varphi \Phi dt + \dots + a_i \int_0^T \varphi^{(i)} \Phi dt + \dots + a_n \int_0^T \varphi^{(n)} \Phi dt = \int_0^T \mu \Phi dt + \int_0^T n \Phi dt, \quad (3)$$

где

$$\varphi^{(i)} = \frac{d^i \varphi}{dt^i} \quad (i = 0, 1, \dots, n).$$

Будем вести интегрирование по частям членов, которые содержат производные от регулируемой величины $\varphi(t)$, до тех пор, пока они не исчезнут в подынтегральных выражениях. В результате после группирования будем иметь:

$$\begin{aligned} & a_0 \int_0^T \varphi \Phi dt + \dots + (-1)^i a_i \int_0^T \varphi \Phi^{(i)} dt + \dots + (-1)^n a_n \int_0^T \varphi \Phi^{(n)} dt + \\ & + a_1 [\varphi \Phi]_0^T + \dots + a_i \sum_{j=0}^{i-1} (-1)^j [\varphi^{(i-1-j)} \Phi^{(j)}]_0^T + \dots + a_n \sum_{j=0}^{n-1} (-1)^j \times \\ & \times [\varphi^{(n-1-j)} \Phi^{(j)}]_0^T = \int_0^T \mu \Phi dt + \int_0^T n \Phi dt. \end{aligned} \quad (4)$$

Если теперь потребовать, чтобы функция $\Phi(t)$ и $(n-1)$ первые ее производные в точках 0 и T равнялись нулю, и пренебречь членом от помехи при большом T , то будем иметь следующее соотношение:

$$a_0 \int_0^T \varphi \Phi dt + \dots + (-1)^i a_i \int_0^T \varphi \Phi^{(i)} dt + \dots + (-1)^n a_n \int_0^T \varphi \Phi^{(n)} dt = \int_0^T \mu \Phi dt \quad (5)$$

при

$$\Phi^{(i)}(0) = \Phi^{(i)}(T) = 0 \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n-1).$$

Выражение (5) содержит неизвестными только параметры дифференциального уравнения $a_0, a_1, \dots, a_n$ и представляет собой алгебраическое уравнение с $(n+1)$ неизвестными a_i :

$$c_{00}a_0 + \dots + c_{0l}a_l + \dots + c_{0n}a_n = u_0,$$

где

$$c_{0i} = (-1)^i \int_0^T \varphi \Phi^{(i)} dt; \quad u_0 = \int_0^T \mu \Phi dt. \quad (6)$$

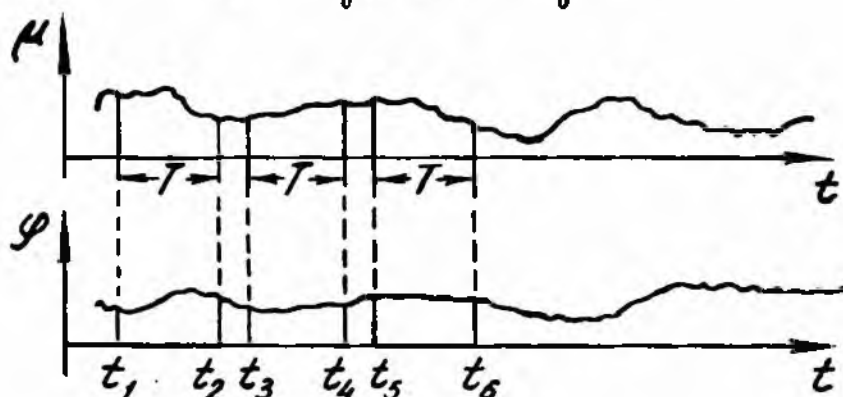


Рис. 2.

Однако для нахождения $(n + 1)$ неизвестных a_i нужно соответственно сформировать систему из $(n + 1)$ уравнения вида

$$\begin{aligned} c_{00}a_0 + \dots + c_{0l}a_l + \dots + c_{0n}a_n &= u_0 \\ \dots & \\ c_{j0}a_0 + \dots + c_{jl}a_l + \dots + c_{jn}a_n &= u_j \\ \dots & \\ c_{n0}a_0 + \dots + c_{nl}a_l + \dots + c_{nn}a_n &= u_n. \end{aligned} \quad (7)$$

Систему уравнений (7) можно формировать двумя различными способами, используя приведенную методику обработки исходного уравнения модулирующей функцией $\Phi(t)$. Первый способ будем называть последовательным, так как при нем уравнения системы (7) получаются последовательно. Суть способа заключается в том, что входной и выходной сигналы (рис. 2) последовательно на отрезках времени $t_0 - t_1$; $t_2 - t_3$ и т. д. обрабатываются одной и той же модулирующей функцией $\Phi(t)$. В результате будем иметь все коэффициенты системы уравнений (7), вычисленные по формулам:

$$c_{ii} = (-1)^i \int_{t_{2i}}^{t_{2i+1}} \varphi \Phi^{(i)} dt; \quad u_i = \int_{t_{2i}}^{t_{2i+1}} \Psi \Phi dt. \quad (8)$$

Второй способ — способ параллельного формирования системы (7). Здесь нужно различать два варианта. Первый вариант, когда для получения каждого из уравнений используется своя модулирующая функция $\Phi_j(t)$, ортогональная относительно других. Тогда коэффициенты системы определяются по формулам:

$$c_{\mu}^{\prime} = (-1)^{\mu} \int_0^T \varphi_i \Phi_i^{(\mu)} dt; \quad u_i = \int_0^T u_i \Phi_i dt. \quad (9)$$

Специализированная система опознавания может быть выполнена аналоговой, цифровой или цифро-аналоговой, но во всех этих случаях неизменной остается алгоритм ее действия, который определяется видом параллельной или последовательной обработки контролируемых сигналов объекта, а также структурой объекта.

На рис. 3 приведена общая блок-схема специализированной аналитической системы опознавания. Функционально необходимыми элементами такой системы опознавания являются: устройство формирования коэффициентов системы уравнений, генератор модулирующих функций, вычислительное и командное устройства. Остановимся кратко на задачах каждого из них. Устройство формирования коэффициентов системы алгебраических уравнений формирует коэффициенты на основе обработки контролируемых входных и выходных сигналов объекта модулирующими функциями по заранее заданному алгоритму. В случае реализации последовательного принципа формирования коэффициентов блок формирования включает в себя запоминающее устройство. Основным требованием к блоку формирования является необходимость выполнения операции обработки контролируемых сигналов объекта модулирующими функциями с требуемой точностью.

Генератор модулирующих функций должен одновременно и синхронно выдавать значения нескольких модулирующих функций и производных от них. Как правило, в задачах опознавания динамики объектов регулирования модулирующие функции лежат в области инфранизких частот.

Вычислительное устройство предназначено для решения системы алгебраических уравнений и должно быть достаточно быстродействующим.

Командное устройство управляет работой всей системы опознавания.

Было произведено сравнение различных вариантов выполнения схем опознавания. В качестве цифрового вычислительного устройства для сравнения бралась специализированная ЦВМ, блок-схема которой показана на рис. 4. Сравнение показывает, что вплоть до уравнения третьего порядка имеет смысл строить специализированные цифро-аналоговые вычислительные устройства. Начиная с уравнения третьего порядка, для решения задачи опознавания имеет смысл строить специализированные цифровые вычислительные устройства, тем более на них можно возложить и задачу блока алгоритма самоадаптации.

Для случая, когда объект описывается уравнением второго порядка с двумя изменяющимися параметрами, была предложена и разработана цифро-аналоговая система опознавания, действующая по параллельному принципу (рис. 5, а).

Пусть объект описывается уравнением вида

$$a_1 \frac{d\varphi}{dt} + a_2 \frac{d^2\varphi}{dt^2} = \mu(t) + n(t). \quad (12)$$

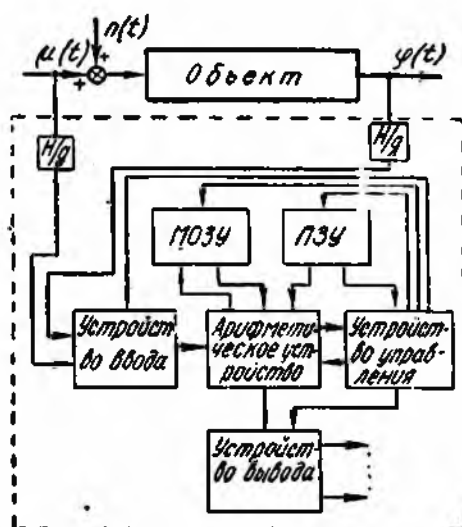


Рис. 4. Общая блок-схема специализированной ЦВМ в качестве аналитической системы опознавания.

Продифференцируем его и получим систему уравнений:

$$\begin{aligned} a_1 \varphi^{(1)} + a_2 \varphi^{(2)} &= \mu + n, \\ a_1 \varphi^{(2)} + a_2 \varphi^{(3)} &= \mu^{(1)} + n^{(1)}. \end{aligned} \quad (13)$$

Произведем обработку уравнения (13) модулирующей функцией $\Phi(t) = \sin^3 \omega t$:

$$\begin{aligned} a_1 \int_0^T \varphi \Phi^{(1)} dt - a_2 \int_0^T \varphi \Phi^{(2)} dt &= - \int_0^T \mu \Phi dt, \\ a_1 \int_0^T \varphi \Phi^{(2)} dt - a_2 \int_0^T \varphi \Phi^{(3)} dt &= - \int_0^T \mu \Phi^{(1)} dt. \end{aligned} \quad (14)$$

Для формирования и решения системы уравнений (14) на рис. 5, а показана блок-схема системы опознавания на цифро-аналоговых элементах. В схеме роль блоков умножения выполняют цифровые управляемые сопротивления (ЦУС), рис. 5, б, а в качестве командного устройства используется кольцевой счетчик с постоянным запоминающим устройством (ПЗУ). Цифровые управляемые сопротивления выполнены на бесконтактных элементах. Схема одного ключа для ЦУС приведена на рис. 5, в.

Вопросы конструктивного построения алгоритмов самонастройки для самонастраивающихся систем стабилизации рассматривались в [9], и здесь не имеет смысла снова на них останавливаться. В случае конструирования самонастраивающихся следящих систем очень эффективные алгоритмы самонастройки могут быть найдены согласно методике, изложенной в [10] и названной методом выбора вспомогательного оператора.

Самостоятельную проблему представляют вопросы изучения динамики детерминированных самонастраивающихся систем. При определенных ограничениях систему опознавания можно аппроксимировать звеном запаздывания, на выходы которого непосредственно поступают значения параметров объекта. Такой подход в некоторых случаях позволяет описать динамику самонастраивающейся системы уравнением с запаздыванием.

В качестве модулирующих функций могут использоваться любые функции, удовлетворяющие условию периодического прохождения через нуль самой функции и ее $(n-1)$ -производных в одних и тех же точках. Однако для практической реализации функции желательно выполнить еще требования ее конструктивной простоты и непрерывности. В качестве такой функции предлагается использовать элементарные, тригонометрические функции, возведенные в степень n (например, функция $\Phi(t) = \sin^n \omega t$, в точках $t = \pi m$ ($m = 0, 1, 2, \dots$) удовлетворяет поставленным требованиям).

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Фельдбаум. О накоплении информации в замкнутых системах автоматического управления. «Изв. АН СССР, ОТН. Энергетика и автоматика», 1961, № 4.
2. Р. С. Рутман. Самонастраивающиеся системы с настройкой по динамическим характеристикам (обзор). «Автоматика и телемеханика», 1962, № 5.
3. А. А. Красовский. Динамика непрерывных самонастраивающихся систем. ФМ, М., 1963.
4. П. И. Чинаев. Самонастраивающиеся системы. Машгиз, М., 1963.
5. Приспосабливающиеся автоматические системы. Под ред. Э. Мишкина и Л. Брауна, ИИЛ, М., 1963.

6. В. П. Теплов, В. Г. Чекалин, П. И. Чинаев. Классификация самонастраивающихся систем. КДНТП, серия самонастраивающиеся системы. Киев, 1963.
 7. А. Г. Ивахненко. Кибернетические системы автоматического управления, способные к обучению. КДНТП, Киев, 1962.
 8. J. Loebl. New method for analysis of process dynamics. Control, April, 1964, p.p. 209—210.
 9. В. П. Теплов, В. Г. Чекалин. Исследование многомерной самонастраивающейся системы с настройкой по одному параметру и коррекцией другого. Журн. «Автоматика», № 5, 1964.
 10. И. Е. Казakov, Л. Г. Евланов. К теории самонастраивающихся систем с поиском градиента методом вспомогательного оператора. Базель, II Конгресс, ИФАК, 1963.
-