

УДК 518.6 + 621.398.4

САМОНАСТРАИВАЮЩАЯСЯ СЛЕДЯЩАЯ СИСТЕМА С ЦИФРОВЫМ УПРАВЛЯЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ

В.А. Алексеев

Задача создания микроминиатюрных элементов для вычислительных систем [1] требует исследования и детальной отработки различных технологических процессов.

Большинство современных технологических циклов изготовления тонкопленочных и твердых схем предусматривает одновременное точное отслеживание нескольких параметров, зависящих от времени и друг от друга. Ввиду сложности и недостаточной изученности характеристик управляемых объектов, применение серийных аналоговых регуляторов оказывается затруднительным и малоэффективным. В этих условиях значительно более удобными и перспективными являются самонастраивающиеся регуляторы, использующие вычислительные и логические возможности цифровой вычислительной техники.

Технически цифровой регулятор может быть реализован в виде программы, хранящейся в памяти универсальной цифровой управляющей вычислительной машины (УВМ).

Работа цифрового регулятора состоит из замкнутого цикла дискретных операций, включающего в себя определение текущих динамических характеристик объекта, вычисление управляющих воздействий по заданному алгоритму и коррекцию алгоритма.

В связи со значительными вычислительными трудностями, возникающими при создании точной модели [2,3], целесообразно применение методов прямой оптимизации системы [4], позволяющих на основании приближенной модели объекта непосредственно формировать последовательность управляющих воздействий.

Критерием качества служит функция рассогласования между за-

даваемым и действительным значениями управляемой величины. Известны несколько методов прямой оптимизации - с использованием принципов динамического программирования [4,5,6], дифференциального исчисления [7] и их комбинации [8], а также линейной теории статистических решений [9].

Однако методы динамического программирования оказываются здесь малоэффективными вследствие значительного объема вычислений в каждом цикле; другие же методы пока применимы лишь для управления линейными объектами с медленно меняющимися динамическими характеристиками.

Целью настоящей работы является создание алгоритма следящей системы, объект регулирования которой подвержен значительным возмущениям по неконтролируемым входам (что приводит к нестационарности динамических характеристик объекта).

1. Постановка задачи

Объектом регулирования является устройство, осуществляющее дискретный во времени процесс (для цифрового регулятора любой внешний процесс дискретен). Статическая характеристика и динамические свойства объекта перед включением системы в работу неизвестны и могут изменяться во время работы. Задача следящей системы заключается в быстрой минимизации рассогласования между заданным и действительным значениями управляемой величины.

Специальные пробные сигналы для изучения объекта не допускаются; для этой цели используются рабочие сигналы x , выдаваемые регулятором. Возмущения z , действующие на объект с неконтролируемых входов (см. рис. 1), учитываются косвенно через изменение динамической характеристики объекта "управляемый вход - выход". При этом каждое неконтролируемое возмущение должно вос-

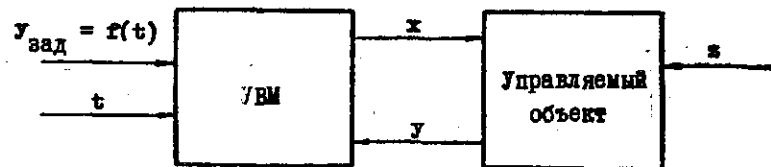


Рис. 1. Блок-схема следящей системы.

приниматься как сигнал о необходимости коррекции модели. Таким образом, в каждом цикле строится приближенная модель детерминированного объекта.

Дальнейшее рассмотрение работы системы основано на следующих допущениях:

1. Статическая характеристика объекта $y = f(x)$ в области $\pm \varepsilon$ в первом приближении линейна для любого значения x . Здесь и далее x — управляющее воздействие, подаваемое на вход объекта в данный момент; y — установившееся значение управляемой величины на выходе объекта, соответствующее данному значению x ; ε — диапазон изменения x , достаточный для определения модели.

2. Структура объекта, определяющая характер его реакции на скачкообразные изменения управляющего воздействия (апериодическая, колебательная), изменяется достаточно медленно. Однако масштабные коэффициенты элементов динамической характеристики объекта (например, амплитуда и период колебания импульсной переходной функции) могут изменяться со скоростью, сравнимой со скоростью протекания переходных процессов в системе.

2. Математическая модель объекта

Из всех известных способов описания объекта наиболее удобным для расчетов на УВМ является уравнение в конечных разностях, связывающее в виде рекуррентной зависимости приращения входного и выходного воздействия через импульсную переходную функцию (ИПФ) либо ее интеграл — переходную функцию (ПФ) [4].

Применение каждого варианта этого метода в отдельности приводит к определенным трудностям, указанным в [7]. Поэтому для моделирования объекта воспользуемся ИПФ, позволяющей построить модель более просто; при составлении же алгоритма управления ПФ оказывается более удобной для экстраполяции процесса во времени.

Пусть известна таблица дискретных значений ИПФ объекта для моментов времени $\frac{t-t_0}{\Delta t} = 1, 2, 3, \dots, i, i+1$.

Здесь и далее Δt — интервал времени, равный длительности одного цикла работы дискретного регулятора, i — порядковый номер цикла.

Управляемая величина y линейного объекта связана при этом с входным воздействием следующим соотношением [3]:

$$y_m = y_0 + \sum_{i=1}^{\infty} a_i (x_{m-1} - x_0). \quad (1)$$

Эффективную длительность ИПФ полагаем конечной и равной $n+1$ циклов: $a_{n+1} = a_{n+2} = \dots = a_{\infty} = 0$.

Для этого случая (1) переписывается так:

$$y_m = y_{m-n} + \sum_{i=1}^{n+1} a_i (x_{m-1} - x_{m-n}). \quad (2)$$

С целью упрощения дальнейших выкладок введем более удобную систему счета времени, полагая текущее время в системе всегда равным нулю:

$$\frac{t_{\text{тек}} - t_0}{\Delta t} = m_{\text{тек}} = 0.$$

Тогда все прошедшие моменты времени будут иметь отрицательный знак, а будущие — положительный.

Уравнение (2) будет иметь при этом следующую запись:

$$y_0 = y_n + \sum_{i=1}^{n+1} a_i (x_{-i} - x_{-n}). \quad (3)$$

Для получения уравнения в конечных разностях выразим в форме (3) значение управляемой величины в предыдущем такте:

$$y_{-1} = y_n + \sum_{i=1}^n a_{i-1} (x_{-i} - x_{-n}). \quad (3')$$

Вычитая (3') из (3), получим после приведения подобных членов:

$$y_0 = y_{-1} + \sum_{i=1}^n a_i (x_{-i} - x_{-i-1}) \quad (4)$$

$$\text{или} \quad \Delta y_0 = \sum_{i=1}^n a_i \cdot \Delta x_{-i}, \quad (4')$$

где $\Delta y_0 = y_0 - y_{-1}$, а $\Delta x_{-i} = x_{-i} - x_{-i-1}$.

Уравнение (4) либо (4') является искомым разностным уравнением и принимается в качестве математической модели объекта (с учетом допущения I, принятого в разделе I статьи).

3. Идентификация ИПФ объекта

Модель (4') позволяет по известной величине Δy_0 и последовательностям Δx_{-i} вычислять таблицу коэффициентов a_i ИПФ объекта. Непосредственно из (4') следует:

$$a_k = \frac{1}{\Delta x_{-k}} \left(\Delta y_0 - \sum_{i=1}^{k-1} a_i \cdot \Delta x_{-i} - \sum_{i=k+1}^n a_i \cdot \Delta x_{-i} \right). \quad (5)$$

Из рассмотрения (5) видно, что на вычисление α_k накладываются два ограничения:

а) Величина скачка входного воздействия Δx_k должна быть достаточной для обеспечения требуемой точности расчетов.

б) Перед началом вычислений, когда еще неизвестен ни один коэффициент α_i и неизвестно n , необходимо, чтобы все члены второй суммы в (5) были равны нулю, что соответствует требованию установившегося процесса перед включением системы в работу.

Определение времени n эффективной длительности ИПФ объекта производится по выполнению условия:

$$|\alpha_{k-1} - \alpha_k| \leq \delta; \quad |\alpha_k| \leq \delta, \quad (6)$$

где δ определяется точностью измерения управляемой величины y_0 и длительностью цикла Δt .

Поскольку условие (6) представляет собой контроль первой и второй производных ИПФ, то перед проверкой по (6) вычисленную ИПФ при необходимости следует сгладить одним из известных способов [10].

При выполнении (6) эффективная длительность ИПФ фиксируется:

$$n = k, \quad \alpha_k = \alpha_n, \quad (7)$$

и ограничение б) на вычисление по (5) снимается.

В связи с тем, что достоверность членов второй суммы в (5) уменьшается с ростом i (параметры объекта успевают измениться), вводится контрольный прогноз процесса на один шаг вперед для коррекции всей таблицы сразу [2]. Такая проверка позволяет также быстро выявить и учесть в дальнейших расчетах скачкообразные возмущения, действующие на объект с неконтролируемых входов. Для этого в каждом цикле перед измерением текущего значения y_0 последнее вычисляется по (4). Ошибку $y_0 - y_{0расч}$ относим к изменению статической характеристики объекта на ее рабочем участке (имея в виду допущение 2, принятое в разделе I статьи):

$$A_n = A_{nрасч} + (y_0 - y_{0расч}). \quad (8)$$

Здесь и далее A — дискретное значение переходной функции объекта, связанное с таблицей дискретных значений ИПФ соотношением

$$A_k = \sum_{i=1}^k \alpha_i, \quad (9)$$

а $A_{nрасч}$ для (8) вычислено в предыдущих тактах по (5) и (9). Затем соответственно пересчитывается вся таблица α_i ($1 \leq i \leq n$):

$$\alpha_i = \alpha_{iрасч} \cdot \frac{A_n}{A_{nрасч}}. \quad (10)$$

Коррекция по (10) увеличивает достоверность дальнейших расчетов по (5) и устойчивость процесса построения модели.

4. Формирование управляющих воздействий

Алгоритм вычисления управляющих воздействий строится исходя из основного требования к следящей системе — отработки заданной величины $y_{зад}$ с максимально возможными точностью и быстродействием. Диапазон допустимых значений управляющих воздействий, ограниченный техническими требованиями, известен:

$$x_{inf} \leq x \leq x_{sup}.$$

Рассмотрим процесс регулирования для случая $y_{зад} = const$, начиная с момента, когда имеется значительное рассогласование между предписанным и действительным текущим значениями управляемой величины. Очевидно, оптимальным управляющим воздействием в этот момент будет одно из граничных значений x (в зависимости от знака рассогласования). Положим, для определенности, что в начальный момент $y_0 - y_{зад} < 0$. Выдав на вход объекта воздействие $x_0 = x_{sup}$ будем, пользуясь моделью (4), просматривать процесс на τ шагов вперед в предположении, что

$$x_1 = x_2 = x_3 = \dots = x_\tau = x_{inf},$$

$$\text{т.е.} \quad \Delta x_1 = x_{inf} - x_{sup}; \quad \Delta x_2 = \Delta x_3 = \dots = \Delta x_\tau = 0. \quad (11)$$

Используя модель (4), вычислим ожидаемые приращения Δy_i для τ последующих тактов (очевидно, такой прогноз имеет смысл при $\tau \leq n$, так как все последующие Δy_i в силу (11) равны нулю):

$$\begin{aligned} \Delta y_1 &= \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \Delta x_{-i+1}; \\ \Delta y_2 &= \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \Delta x_{-i+2}; \\ &\dots \\ \Delta y_\tau &= \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \Delta x_{-i+\tau}. \end{aligned} \quad (12)$$

Сложив почленно все τ уравнения (12), получим после подстановки в них (11) и приведения подобных членов:

$$\begin{aligned} y_\tau - y_0 &= A_{\tau-1} \cdot \Delta x_1 + \sum_{i=1}^{\tau-2} (A_{\tau-i-1} - A_{i-1}) \cdot \Delta x_{-i+1} + \\ &+ \sum_{i=1}^{\tau-1} (A_n - A_{n-i-1}) \cdot \Delta x_{-n+i+1}. \end{aligned} \quad (13)$$

Так как для $x_0 = x_{sup}$ установившееся значение y_n равно y_{sup} , а для $x_1 = x_{inf}$ соответственно y_{inf} , то выдача на вход

объекта x_{inf} всегда за x_{sup} должна привести к появлению максимума y_{zmax} (см. рис. 2), характеризующегося условием

$$y_{z+1} - y_z \leq 0. \quad (I4)$$

Поэтому после выдачи $x = x_{sup}$ производим в текущем и каждом последующем тактах прогнозирование процесса по (I3) до момента $i = z+1$, где z ограничивается по выполнению условия (I4).

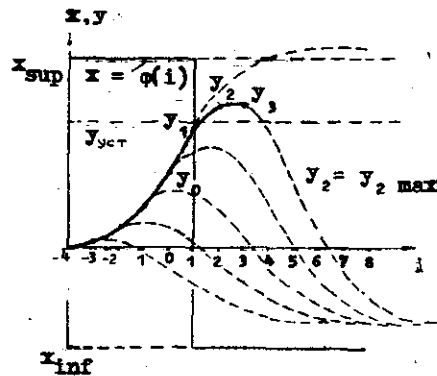


Рис.2. Прогнозирование максимума.

Δx в (I2) меняется на обратный.

В результате через z тактов после выдачи планируемого граничного воздействия x_{inf} окажутся выполненными 2 важных для процесса регулирования условия (I4) и (I5), т.е. рассогласование и его первая производная будут близки к нулю. Если теперь выдавать в каждый следующий момент такое воздействие x_i , чтобы прогнозируемое значение y_z всегда удовлетворяло условиям (I4) и (I5), то задача следящей системы была бы выполнена. Однако решение системы уравнений (I2) относительно всей последовательности x_i ($1 \leq i \leq z$) затруднительно [4]. К тому же в [7] показано, что в каждом шаге достаточно вычислять лишь первый член этой последовательности. Поэтому за исходное уравнение принимаем (I3), являющееся частным случаем (I2) для фиксированного воздействия. Подстановка в (I3) обоих условий (I4 и I5) приводит к системе из 2 уравнений, совместное решение которых требует значительного объема вычислений. С целью упрощения расчетов в дальнейшем (после определения z) условие (I4) не ис-

Планируемое воздействие

$x_i = x_{inf}$ реализуется в том такте, в котором для прогнозируемого y_{zmax} выполняется условие

$$y_{zag} - y_{zmax} \leq 0, \quad (I5)$$

т.е. с упреждением на z тактов; z фиксируется для использования в последующих тактах. Если начальное рассогласование перед пуском системы имело обратный знак, то в (I4) и (I5) знаки $\leq$ соответственно меняются на $\geq$; в качестве начального воздействия выбирается x_{inf} и прогноз ведется для $x_i = x_{sup}$, т.е. знак при

пользуется. Помагное рассмотрение процесса показывает, что ухудшение качества регулирования при этом незначительно.

Итак, подставляем в (I3) условие (I5) в виде точного равенства и решаем (I3) относительно x_i :

$$x_i = x_0 - \frac{1}{A_{z-1}} \left[y_0 - y_{zag} + \sum_{j=1}^{z-1} (A_{z-i-1} - A_{i-1}) \cdot \Delta x_{-i+1} + \sum_{j=1}^z (A_n - A_{n-z-i-1}) \cdot \Delta x_{-n-z-i+1} \right]. \quad (I6)$$

Вывод (I6) был проведен в предположении, что допущения I и 2 п. I статьи действительны на интервале времени $[(-n) + z]$, т.е. в предположении неизменности ПФ объекта. При существенном изменении ПФ на рабочем интервале времени $[(-n) + z]$ управление по (I6), естественно, не является оптимальным, а иногда даже не отвечает требованиям устойчивости. Поэтому необходимо заново определить z при наличии значительного рассогласования $y - y_{zag}$, т.е. переходить к расчетам по (I3) + (I5) каждый раз, когда вычисленные по (I6) величины x_0 и x_i удовлетворяют условию (II).

Алгоритм (I6) справедлив и для случаев, когда предписанное значение y_{zag} изменяется в каждом такте случайно либо по заданной программе. В последнем случае условия (I4) и (I5) для определения z с целью уточнения управления могут быть заменены более общими:

$$y_{z+1} - y_z \leq y_{z+1,zag} - y_{z,zag}, \quad (I4')$$

$$y_{z,zag} - y_z \leq 0. \quad (I5')$$

5. Рабочий алгоритм следящей системы

В каждом цикле работы системы выполняются расчеты по формулам, приведенным в разделах 3 и 4 статьи. Объем и порядок вычислений регулируются введенными в этих разделах ограничениями, а также условиями (6), (I4) и (I5) (см. рис. 3).

В соответствии с ограничениями на вычисления по (5) система включается в работу при установившихся значениях x и y перед сменой предписанного значения y_{zag} .

После выдачи системой в первом такте управляющего воздействия (x_{sup} либо x_{inf}) в каждом следующем такте производятся:

- определение коэффициентов ΔA_i модели по (5);
- контроль выполнения условия (6), характеризующего окончание реакции объекта на первую смену воздействия Δx_{-n} ;
- прогнозирование величины y_{zmax} по (I3) и (I4) и срав-

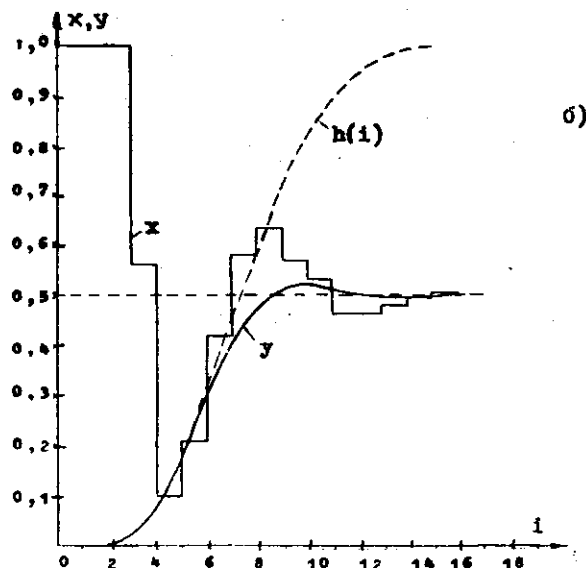
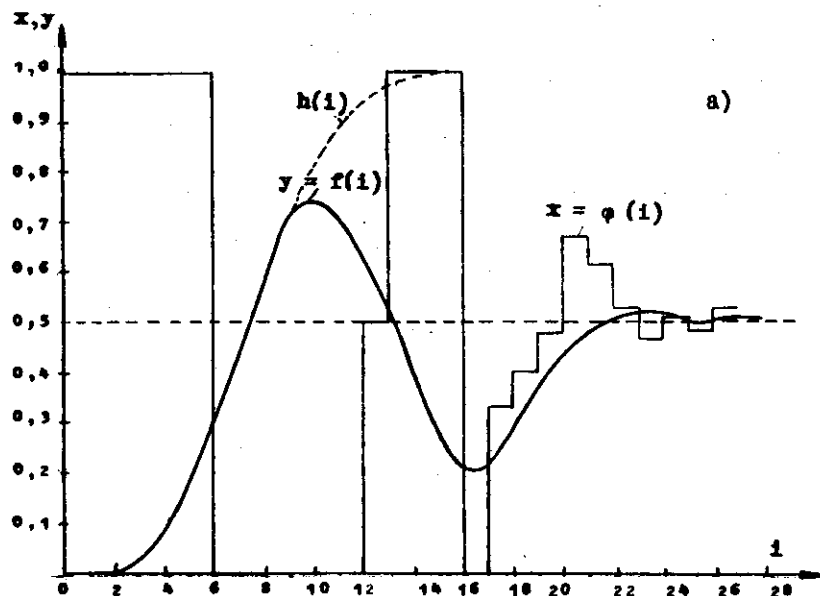


Рис. 4. Переходный процесс в системе: а) при отсутствии перед пуском начальной информации об объекте; б) с полной информацией об объекте; $h(i)$ - переходная функция объекта.

К недостаткам системы следует отнести разрывность ПФ модели в точках k , для которых в текущий момент рассчитываются Δa_k по (5), а также отсутствие в алгоритме управления требования (14) о непосредственном контроле первой производной рассогласования.

В связи с этим управление по (16) не является оптимальным по быстродействию, а лишь приближается к таковому. Тем не менее во многих практических случаях применение подобной следящей системы может быть оправданным и эффективным.

Л и т е р а т у р а

1. Э.В. ЕВРЕЙНОВ, Ю.Г. КОСАРЕВ. О системах автоматизации научных экспериментов для разработки вычислительных систем. - Вычислительные системы, Новосибирск, изд-во "Наука" Сиб.отд. 1963, вып. 8.
2. М.Р. ЕЛИСТРАТОВ. Определение динамических характеристик нестационарных систем в процессе нормальной работы. - Автоматика и телемеханика, т. XXIV, № 7, 1963.
3. Л. БРАУН. Приспосабливающиеся системы автоматического управления с вычислительными устройствами. - "Приспосабливающиеся автоматические системы" под ред. Э.Мишкина и Л.Брауна, М., ИЛ, 1963.
4. А. НОМОТО. Применение динамического программирования для прямой оптимизации системы. - Труды Международного симпозиума ИФАК "Самонастраивающиеся автоматические системы". М., Изд. "Наука", 1963.
5. А.А. ФЕЛЬДБАУМ. О проблемах теории дуального управления. - "Дискретные и самонастраивающиеся системы". Труды II Международного конгресса ИФАК, изд. АН СССР, т.3, 1965.
6. А.А. ФЕЛЬДБАУМ. Теория дуального управления. - Автоматика и телемеханика, т. XXI, № 9, II, 1960; т. XXII № 1,2, 1961.
7. Б. ФРИДЛАНД. Оптимальное управление дискретными динамическими процессами. - "Дискретные и самонастраивающиеся системы". Труды II Международного конгресса ИФАК, изд-во АН СССР, т. 3, 1965.
8. В. ПЕТЕРКА. Комбинация конечного времени регулирования и минимума интеграла квадрата ошибки в цифровых системах управления. - "Дискретные и самонастраивающиеся системы". Труды II Международного конгресса ИФАК, изд. АН СССР, т.3, 1965.
9. Ш. ГОРИНГ. Синтез оптимальной системы автоматического управления с прогнозированием. "Оптимальные системы, Статистические методы". Труды II Международного конгресса ИФАК, изд-во АН СССР, т. 2, 1965.
10. В.С. ПУГАЧЕВ. Теория случайных функций. М., Физматгиз, 1962.

Поступила в редакцию
18 августа 1963 г.