



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР  
ПО ДЕЛАМ ИЗОБРЕТЕНИЙ И ОТКРЫТИЙ

## ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ

(21) 3836846/24-24

(22) 07.01.85

(46) 15.09.86. Бюл. № 34

(71) Белорусский ордена Трудового  
Красного Знамени политехнический  
институт

(72) А.А.Москаленко, А.Т.Кулаков,  
А.Н.Вексин, Е.А.Воблов и Ю.Г.Марков

(53) 62-50(088.8)

(56) Авторское свидетельство СССР  
№ 1015336, кл. G 05 B 13/02, 1982.

Авторское свидетельство СССР  
№ 1174902, кл. G 05 B 13/02, 1983.

(54) АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

(57) Изобретение относится к само-  
настраивающимся системам управления  
и может быть, в частности, использо-  
вано для управления теплоэнергетичес-  
кими объектами. Цель изобретения -  
расширение области применения и повы-  
шение быстродействия. Система содер-

жит три основных контура управления.  
Первый контур управления (основная  
обратная связь) содержит сравнивающий  
элемент, блок умножения, регулятор,  
опережающее звено объекта и второй  
упредитель. Первый контур является  
контуром упреждения. Второй контур  
управления включает в свой состав,  
кроме основной обратной связи, сле-  
дующую цепь: сравнивающий элемент,  
блок умножения, регулятор, опережаю-  
щее и инерционное звенья объекта.  
Третий контур (контур компенсации  
инерционности) содержит сравнивающий  
элемент, блок умножения, регулятор,  
опережающее и инерционное звенья  
объекта, первый упредитель, аналого-  
цифровой преобразователь и модель за-  
паздывания. Система позволяет осу-  
ществлять управление объектами с пе-  
ременными параметрами, в том числе  
с переменным запаздыванием. 2 ил.

Изобретение относится к самонастраивающимся системам управления и может быть использовано для автоматизации нестационарных технологических процессов, параметры которых изменяются в широком диапазоне при эксплуатации или изменении нагрузки, в частности для управления теплотенергетических процессов котлоагрегатов и энергоблоков.

Цель изобретения - расширение области применения и повышения быстродействия.

На фиг. 1 показана структурная схема адаптивной системы управления для объектов с переменными параметрами; на фиг. 2 - графики, поясняющие принцип работы системы.

Система содержит датчик 1 нагрузки, задатчик 2, сравнивающий элемент 3, регулятор 4, опережающее звено 5 объекта, инерционное звено 6 объекта, аналого-цифровой преобразователь 7, блок 8 определения коэффициентов усиления, первый цифроаналоговый преобразователь 9, первый и второй формирователи 10 и 11 сигнала упреждения (упредители), блок 12 определения запаздывания, блок 13 регулирования, модель 14 запаздывания, задатчик 15 единичного кода, блок 16 деления, регистр 17 коэффициента коррекции, второй цифроаналоговый преобразователь 18, блок 19 умножения, задатчик 20 направления экстремума, блок 21 определения эквивалентной постоянной времени, третий цифроаналоговый преобразователь 22 и блок 23 управления.

На фиг. 1 и 2 обозначены:  $f_1$  и  $f_2$  - внутренние и внешние возмущения; Оп - оператор;  $x_3$  - возмущение заданием;  $\varepsilon$  - ошибка рассогласования;  $\varepsilon_p$  - ошибка управления (регулирования);  $x_i$  и  $x$  - промежуточная и основная регулируемые величины;  $x_{oc1}$ ,  $x_{oc2}$  и  $x_{oc2}$  - соответственно сигналы основной обратной связи, компенсации инерционности и упреждения запаздывания,  $x_M = x_{oc1}$  - сигнал с выхода полной модели объекта.

Блок 8 определения коэффициентов усиления служит для нахождения в каждый момент времени квантования  $T_i$  (где  $i = 1, 2, 3, \dots, m$ ) текущих значений коэффициентов усиления формирователей 10 и 11. Информационный выход блока 8 определения коэффициентов усиления соединен с входом

первого цифроаналогового преобразователя 9 (ЦАП1), а также с четвертым и третьими входами соответственно блока 16 деления и блока 21 определения эквивалентной постоянной времени.

Первый и второй формирователи 10 и 11 сигнала упреждения предназначены для моделирования объекта согласно выбранной аппроксимирующей передаточной функции объекта. В аналоговом исполнении формирователи 10 и 11 реализуются, например, как одно усиленное звено с переменным коэффициентом усиления.

Блок 12 определения запаздывания служит для определения величины времени запаздывания.

Задатчик 15 единичного кода используется для задания и хранения кода, условно принятого в данной системе за единицу. Он может быть выполнен, например, в виде набора тумблеров или кнопок.

Блок 16 деления предназначен для определения коэффициента коррекции по формуле

$$\alpha_k^*(T_i) = \alpha_k^*(T_{i-1}) \frac{x_o(T_i)}{x_M(T_i)}, \quad (1)$$

где  $\alpha_k^*$  - коэффициент коррекции коэффициента усиления регулятора 4 в цифровом виде.

Из формулы (1) видно, что коэффициент коррекции, а значит, и коэффициент усиления регулятора 4 изменяются обратно пропорционально изменению коэффициента усиления упредителей 10 и 11.

Блок 21 определения постоянной времени предназначен для определения кода эквивалентной постоянной времени звена 6 и передачи его в третий цифроаналоговый преобразователь 22.

Блок 21 реализует формулу

$$T_M(t_{i+1}) = N_0(t_{i+1}) = \frac{T_M(t_i)}{\theta}, \quad (2)$$

где  $T_M$  и  $T_0$  - эквивалентные постоянные времени модели и объекта соответственно,  $t_i$  и  $t_{i+1}$  - предыдущий и очередной циклы адаптации, причем

$$\theta = \frac{K_2^0}{[\Delta]} \quad (3)$$

$K_2^0$  - экстремальный динамический коэффициент отношения выходных сигналов объекта и модели объекта;

$$K_{\partial}^{\partial} = \left. \frac{x_o(T_i)}{x_m(T_i)} \right|_{i=k} = \begin{cases} \min \\ \max \end{cases} \quad (4)$$

$i = k$  - порядковый номер цикла измерения, при котором отношение принимает экстремальное значение.

Если вычисляется отношение выходного сигнала объекта к выходному сигналу модели объекта, а не наоборот, и если надо получить переходный процесс в замкнутой системе с постоянной времени, меньшей чем эквивалентная постоянная времени объекта, то в этом случае  $K_{\partial}^{\partial} = \min$ .

В основу построения адаптивной системы управления для объектов с переменными параметрами положен принцип упреждения запаздывания и компенсации инерционности при непрерывной адаптивной подстройке коэффициентов усиления модели объекта и коэффициента коррекции, коэффициента усиления регулятора с периодической адаптивной подстройкой времени запаздывания и эквивалентной постоянной времени модели объекта и времени изодрома регулятора.

Принцип работы системы поясняют графики, показанные на фиг. 2, где  $x(t) = x$  - переходная характеристика замкнутой системы управления при подаче на вход единичного калиброванного сигнала  $h(t) = h$ , а  $x_m(t) = x_m$  - переходная характеристика на выходе модели. Кривая  $x$  обозначена через  $OO_1AB$ , а кривая  $x_m$  через  $OO_2A_1B_1$ ;  $[\delta]$  - некоторое заданное пороговое значение или допустимая зона регулирования, обусловленная чувствительностью реальной регулирующей аппаратуры;  $\delta_1$  - измененное значение заданного порогового значения ( $\delta_1 > [\delta]$ );  $\hat{c}_o$  - запаздывание объекта;  $\hat{c}_m$  - запаздывание модели объекта. На фиг. 2 показан случай, когда  $\hat{c}_m = \hat{c}_o$ .

Теплоэнергетические объекты являются сложными объектами и в общем случае могут быть промоделированы передаточной функцией вида

$$W_o = \frac{K_o e^{-p\hat{c}_o}}{(1+T_p p)^n} = W_o^* e^{-p\hat{c}_o}, \quad (5)$$

где  $W_o$  - передаточная функция объекта, причём  $W_o = W_o(p)$  для упрощения;

$T^*$  - постоянная времени инерционного звена первого порядка;

$n$  - показатель степени;  
 $W_o^*$  - передаточная функция объекта без запаздывания.

5 Моделирование объекта в виде (5) приводит к сложным поисковым алгоритмам, которые обладают потерей времени на поиск и требуют использования мощных средств вычислительной техники.

При использовании адаптивных алгоритмов могут использоваться упрощенные модели, например

$$W_M = \frac{K_M e^{-p\hat{c}_M}}{1+T_M p} = W_M^* e^{-p\hat{c}_M}, \quad (6)$$

15 где  $\hat{c}_M$ ,  $K_M$ ,  $T_M$  - соответственно время запаздывания, коэффициент усиления и эквивалентная постоянная времени модели объекта;

$W_M^*$  - передаточная функция модели без запаздывания.

Для упреждения запаздывания и компенсации инерционности должны выполняться условия:

$$\left. \begin{aligned} W_o^* &= W_M^* \\ \hat{c}_o &= \hat{c}_M \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Применительно к схеме, изображенной на фиг. 1, условие (7) можно записать следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} W_{yn1} &= W_{yn2} = W_o^* \\ \hat{c}_o &= \hat{c}_M \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Из (8) следует:

$$K_{yn1} = K_{yn2} = K_o; \quad (9)$$

$$\hat{c}_M = \hat{c}_o; \quad (10)$$

$$T_M = T_o. \quad (11)$$

Известно, что если условия (9-11) выполняются, то система управления может работать с максимальным быстрым действием, как если бы она не имела запаздывания. В этом случае динамические параметры настройки системы управления могут быть рассчитаны с помощью любого известного метода для систем управления без запаздывания, например с помощью метода компенсированной настройки, при котором, в частности, для ПИ-закона управления время изодрома (постоянная интегрирования ошибки управления)  $T_n$  равна эквивалентной постоянной времени объекта  $T_o$ , а коэффициент усиления регулятора  $K_p$  с точностью до постоянной  $C$  - обратно пропорционален коэффициенту усиления объекта  $K_o$ , т.е.

$$T_n = T_o; \quad (12)$$

$$K_p = \frac{C}{K_o}. \quad (13)$$

Условия (12) и (13) соответствуют минимуму среднеквадратичной ошибки управления.

Потребуем, чтобы передаточная функция замкнутой системы имела вид

$$W_{з.с.} = \frac{W_y W_0}{1 + W_y W_0} = W_{э.т.}, \quad (14)$$

где  $W_{э.т.}$  — передаточная функция эталонного процесса замкнутой системы управления, причем

$$W_{э.т.} = \frac{1}{T_{э.т.} p + 1} \quad (15)$$

Из (14) имеем

$$W_y = \frac{W_{э.т.}}{W_0 (1 - W_{э.т.})}, \quad (16)$$

где  $T_y = T_0;$  (17)

$$K_y = \frac{T_0}{K_0 T_{э.т.}}. \quad (18)$$

Сопоставим (17) и (18) соответственно с (12) и (13),

$$K_f K_0 = C = \frac{T_0}{T_{э.т.}}. \quad (19)$$

Постоянная  $C$  в формуле (19) определяет первоначальное заданное (выбранное) произведение коэффициента усиления объекта и пропорциональной составляющей управляющего воздействия, которые соответствуют определённому критерию качества, в частности минимуму среднеквадратичной ошибки управления при требуемом быстродействии с учетом ограничения управляющего воздействия, например, на перемещение регулирующего клапана.

Уравнения (17), (18) и (19) требуют, чтобы при любом состоянии объекта его точность и быстродействие сохранялись и соответствовали точности и быстродействию при состоянии объекта, выбранном за первоначальное (например, при 100%-ной нагрузке). В отличие от текущих значений введем другие обозначения для параметров, которые имеют место при первоначальном состоянии объекта:

$$\left. \begin{aligned} T_y^* &= T_0^*; \\ K_y^* K_0^* &= C = \frac{T_0}{T_{э.т.}} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Проведенные рассуждения для объектов первого порядка оказываются справедливыми и для объектов более высокого порядка при использовании адаптивного алгоритма управления и выполнении условия упреждения за-

паздывания и компенсации инерционности. В этом случае в выражении (17) должна учитываться эквивалентная постоянная объекта  $T_{э.т.}$ .

Адаптивная система управления работает следующим образом.

В исходном статическом состоянии (первоначальном) системой произведена обработка задания  $x_3$ , поступающего с задатчика 2. Ошибка рассогласования с выхода сравнивающего элемента 3 сведена к нулю:  $\varepsilon \approx 0$ , ошибка регулирования также равна нулю:  $\varepsilon_p \approx 0$ . Коэффициент усиления и время изодрома регулятора 4 установлены согласно формуле (21). В блоке 12 определения запаздывания хранится код времени запаздывания модели 14, равный коду условного запаздывания объекта. В модели 14 скорректировано время запаздывания по коду блока 12 через блок 13 регулирования. Аналого-цифровой преобразователь 7 работает непрерывно с частотой  $f = 1/T$ , где  $T$  — период квантования или цикла измерения и адаптации.

На третьем входе блока 12 определения запаздывания и на втором входе блока 21 определения эквивалентной постоянной времени находятся запрещающие сигналы соответственно на измерение условного времени запаздывания и на занесение кода эквивалентной постоянной времени моделей объекта. На вторых входах первого цифроаналогового преобразователя 9 и блока 16 деления присутствуют разрешающие сигналы, разрешающие соответственно подстройку коэффициентов усиления формирователей сигнала 10 и 11 упреждения и коэффициента коррекции  $\alpha_k$ . Блок 8 определения коэффициентов хранит код формирователей 10 и 11, равный коэффициенту усиления объекта в статике:  $K_{yn}^* = K_0^*$ . Во втором цифроаналоговом преобразователе 18 установлен код коэффициента коррекции  $\alpha_k$ , который в статике при первоначальном состоянии объекта (например, при 100%-ной нагрузке) равен единице. В задатчике 20 направления экстремума установлен код, указывающий направление движения к экстремуму, в частности к минимуму, так как при изменении нагрузки в сторону уменьшения при выравненных коэффициентах усиления объекта и модели кривая переходного процесса

системы будет лежать ниже кривой эталонного переходного процесса (в частности, при 100%-ной нагрузке). В задатчике 20 установлен код  $[\Delta]$  допустимого значения экстремального динамического отношения выходных сигналов объекта и модели.

Рассмотрим работу системы, когда характеристики объекта в какой-то момент времени изменились, что характерно для теплоэнергетических объектов, работающих при переменных нагрузках.

При изменении нагрузки в блок 23 управления поступают сигналы. Сигналы преобразуются в блоке 23, индицируя оператору изменение нагрузки.

В этом случае возможны два режима работы системы, которые могут быть заданы оператором (Op): с адаптивной подстройкой динамических параметров путем грубой коррекции в процессе перехода с нагрузки на нагрузку с последующей точной коррекцией и без подстройки по ходу процесса: т.е. при параметрах настройки, соответствующих предыдущей нагрузке, но с последующей точной коррекцией. В первом случае переход на другую нагрузку ближе к оптимальному является предпочтительным, хотя и имеются небольшие потери качества переходного процесса, он предпочтителен при плавном, например, 10%-ном изменении нагрузки. Так как изменение нагрузки во избежание усталости металла из-за температурных напряжений производится плавно в течение заданного интервала времени, то ограничимся рассмотрением первого режима работы. К тому же второй режим работы - второй этап первого режима.

Таким образом, сигнал изменения нагрузки запрещает все адаптивные подстройки, кроме подстройки времени запаздывания. Поэтому разрешающий сигнал подается только в блок 12 определения времени запаздывания при появлении индикации об изменении нагрузки. Изменение нагрузки является параметрическим возмущением и стремится изменить выходную величину  $x$ , так как оно действует через определенную передаточную функцию (как правило, первого порядка) и прикладывается одновременно как к выходу системы, так и к ее входу через отрицательную обратную связь, т.е. со стороны

выхода действует аналогично изменению задания, но с противоположным знаком. Однако пороговое значение  $[\delta]$ , используемое при работе блока 12 определения запаздывания, выбирается равным зоне нечувствительности регулятора и зависит как от аппаратуры регулирования, так и от величины возмущения. Величина зоны  $[\delta]$  выбирается из условия единичного калиброванного скачка, а не любого произвольного. Поэтому использование зоны  $[\delta]$  при другом скачке будет вносить некоторую погрешность, что приведет к грубой подстройке. При 10%-ном изменении нагрузки для выполнения равенства  $x_{ос} = x_{ос1}$  неточность за счет грубого измерения времени запаздывания будет компенсироваться за счет других коррекций (в частности, адаптивных подстроек коэффициентов усиления упретителей 10 и 11 и коэффициента коррекции  $\alpha_k$ ), но при этом грубая коррекция ведет к некоторой потере качества регулирования. Что касается зависимости  $[\delta]$  от вида регулирующей аппаратуры, то она легко устраняется при реализации блока 12 определения запаздывания. Таким образом, в результате адаптивной подстройки времени запаздывания осуществляется грубая коррекция времени запаздывания в модели 14 через блок 13 регулирования. По окончании подстройки времени запаздывания блок 12 выдает сигнал в блок 23 управления, который формирует разрешающий сигнал в первый цифроаналоговый преобразователь 9, блок 16 деления и регистр 17 коррекции, при этом производится адаптивная подстройка.

Отработка возмущения  $f_2$  осуществляется по трем контурам регулирования: 1) основная обратная связь - сравнивающий элемент 3, блок 19 умножения, регулятор 4, опережающее звено 5, второй формирователь 11, сравнивающий элемент 3 - представляют контур упреждения; 2) основная обратная связь, сравнивающий элемент 3, блок 19 умножения, регулятор 4, звенья 5 и 6 объекта основная обратная связь представляют основной контур регулирования; 3) обратная связь - сравнивающий элемент 3, блок 19 умножения, регулятор 4, звенья 5 и 6 объекта, первый формирователь 10, аналого-цифровой преобразо-

ватель 7, модель 14 запаздывания, сравнивающий элемент 3 представляет контур компенсации инерционности.

По возвращении системы в статическое состояние будет иметь место равенство  $x_m = x_0$ , но в отличие от первоначального состояния статические коэффициенты усиления  $K_m^0 = K_0^0$  будут другими, при этом изменится и коэффициент коррекции  $\alpha_k$  ( $K_m^0 = K_0^0 > K_0^*$ ,  $\alpha_k < 1$ ) при уменьшении нагрузки от первоначальной 100%-ной).

На втором этапе производится точная коррекция путем подачи разрешающего сигнала в блок 12. Далее система работает аналогичным образом. В результате выполнения этого этапа уточняются время запаздывания, коэффициенты усиления и коэффициент коррекции.

По окончании точной подстройки выполняется третий этап - коррекция эквивалентной постоянной времени формирователей 10 и 11 сигнала управления и времени изодрома регулятора 4. Для этого производится исходный сброс, подается разрешающий сигнал только на блок 21 определения эквивалентной постоянной времени. Так как при исходном сбросе все подстройки запрещены, а работа блока 21 разрешена, то блок 21 определяет эквивалентную постоянную времени объекта и через цифроаналоговый преобразователь 22 осуществляет подстройку постоянных времени формирователей 10 и 11 сигнала упреждения и времен изодрома регулятора 4 по трем независимым каналам.

В результате трех этапов адаптации при изменении состояния объекта динамические параметры настройки приводятся в заданное соответствие.

#### Ф о р м у л а и з о б р е т е н и я

Адаптивная система управления, содержащая датчик нагрузки, последовательно соединенные задатчик и сравнивающий элемент, регулятор, подключенный выходом к входу опережающего звена объекта, выход которого соединен с входом инерционного звена объекта, последовательно соединенные аналого-цифровой преобразователь, блок определения коэффициентов усиления и первый цифроаналоговый преобразователь, подключенный выходом к первым входам

первого и второго формирователей сигнала упреждения, подключенных вторыми входами к выходу опережающего звена объекта, третий вход первого формирователя сигнала упреждения соединен с третьим входом второго формирователя сигнала упреждения, соединенного выходом с вторым входом сравнивающего элемента, и последовательно соединенные блок определения запаздывания, блок регулирования и модель запаздывания, соединенную вторым входом с вторым выходом аналого-цифрового преобразователя, первым выходом - с вторым входом блока определения запаздывания и с четвертым входом сравнивающего элемента, а вторым выходом - с вторым входом блока определения коэффициентов усиления, первый вход блока определения запаздывания подключен к выходу инерционного звена объекта, к третьему входу сравнивающего элемента и к входу аналого-цифрового преобразователя, выход опорной частоты блока определения запаздывания подключен к второму входу блока регулирования и третьему входу модели запаздывания, о т л и ч а ю щ а я с я тем, что, с целью расширения области применения и повышения быстродействия, в нее введены последовательно соединенные задатчик единичного кода, блок деления, регистр коэффициента коррекции, второй цифроаналоговый преобразователь и блок умножения, последовательно соединенные задатчик направления экстремума, блок определения эквивалентной постоянной времени и третий цифроаналоговый преобразователь, и блок управления, первый вход которого соединен с выходом датчика нагрузки, первый выход - с пятым входом сравнивающего элемента, второй выход - с третьим входом блока определения запаздывания, третий выход - с вторыми входами первого цифроаналогового преобразователя, блока деления, блока определения эквивалентной постоянной времени и регистра коэффициента коррекции, выход которого подключен к третьему входу блока деления, четвертый вход которого подключен к третьему входу блока определения эквивалентной постоянной времени и к второму выходу блока определения коэффициента усиления, выход третьего цифроаналогового преобразователя

