

# ПОСТРОЕНИЕ АДАПТИВНОГО НЕЧЕТКОГО КОМБИНИРОВАННОГО РЕГУЛЯТОРА В МНОГОСВЯЗНЫХ СИСТЕМАХ<sup>1</sup>

Ю. И. Кудинов, И. Ю. Кудинов

*Липецкий государственный технический университет*

Рассмотрено построение регулятора, состоящего из многопозиционного и широтно-импульсного регуляторов. Показано, что многопозиционный регулятор реализует управление, квазиоптимальное по быстродействию, а широтно-импульсный — импульсное управление, обеспечивающее требуемую точность регулирования. С помощью нечеткого алгоритма параметрической адаптации и предложенного регулятора получено высокое качество регулирования в условиях изменения динамических характеристик объекта и взаимного влияния управляющих воздействий.

## ВВЕДЕНИЕ

Стабилизация нескольких выходных переменных в одном объекте с помощью нескольких взаимосвязанных управляющих переменных относится к числу довольно сложных задач управления. Ее сложность существенно возрастает, если управляющие переменные являются двухпозиционными, а объект — нестационарным, с меняющимися во времени статическими и динамическими характеристиками: коэффициентом передачи, инертностью и временем запаздывания по каналам управления.

В настоящей работе предлагается «физический» подход к построению релейной адаптивной системы управления многосвязными тепловыми объектами, опирающийся на нечеткую логику и учитывающий фундаментальные закономерности теплопередачи.

Рассмотрим схему многосвязного теплового объекта (рис. 1) и дадим ему краткую характеристику. Объект содержит  $m$  взаимосвязанных входов  $u_i$  и  $m$  соответствующих выходов  $y_i$ ,  $i = \overline{1, m}$ . Связь  $u_i - y_i$  будем именовать контуром управления или просто контуром. Начнем с анализа переменных  $u_i$ ,  $y_i$  в  $i$ -м контуре теплового объекта с самовыравниванием. Выходной, регулируемой переменной  $y_i(t)$  является температура, а управляющей  $u_i(t)$  — физическая величина (напряжение электричес-

кого нагревателя, подача пара в теплообменник и т. д.), изменяющаяся поступление тепла от какого-либо источника.

В непрерывных системах управление  $u_i(t)$  принимает значения из интервала  $[u_i^{\min}, u_i^{\max}]$ , а в релейных — из множества  $\{u_i^{\min}, u_i^{\max}\}$ , содержащего два элемента. При  $u_i = u_i^{\min}$  подводится минимальное, а при  $u_i = u_i^{\max}$  — максимальное количество тепла. В целях упрощения изложения перейдем от физических значений  $u_i^{\min}$  и  $u_i^{\max}$  управления  $u_i(t)$  к нормированным значениям 0 и 1, например, по формуле  $(u_i(t) - u_i^{\min}) / (u_i^{\max} - u_i^{\min})$ , и

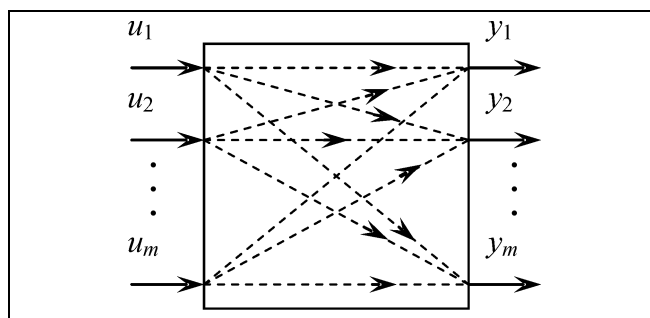


Рис. 1. Схема объекта

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке РФФИ по проекту 06-08-00227-а.



будем считать, что при  $u_i(t) = 1$  нагреватель включен, а при  $u_i(t) = 0$  — выключен. Свойство самовыравнивания теплового объекта с непрерывным управлением  $u_i(t)$  состоит в том, что каждому постоянному значению  $u_i$  соответствует установившееся значение температуры  $y_i$ . Задача стабилизации или автоматического регулирования температуры сводится к определению управления  $u_i$ , при котором полученная установившаяся температура  $y_i$  была бы близка к заданной  $y_i^0$ , т. е. выполнялось условие  $e_i^0 \geq |y_i^0 - y_i|$ , где  $e_i^0$  — допустимое значение ошибки регулирования.

Другими словами, тепловое равновесие в объекте или равенство прихода и расхода тепла достигается при  $y_i = y_i^0, \forall i = \overline{1, m}$ .

### 1. ПОСТРОЕНИЕ НЕЧЕТКОГО КОМБИНИРОВАННОГО РЕГУЛЯТОРА

В традиционной релейной системе, содержащей инерционный объект с запаздыванием и работающей по отклонению, как правило, возникают незатухающие колебания с довольно большой амплитудой. Поэтому достижение близости заданного  $y_i^0$  к текущему значению  $y_i(t)$  выхода возможно лишь для его среднего значения  $\bar{y}_i$ . Амплитуду колебаний можно существенно снизить, если от релейного регулирования перейти к импульсному управлению с принудительным переключением  $u_i(t)$ , показанным на рис. 2.

Полагая, что импульсное управление по аналогии с релейным регулированием является периодическим с периодом  $\tau_i$ , на интервале времени  $t \in [0, \tau_i]$  можно определить такие длительности импульсов  $\tau_{ij}^1$  и пауз  $\tau_{ij}^0$  и, соответственно, такое импульсное управление  $u_i(t) = \{u_i(\tau_{ij}^1, \tau_{ij}^0)\}, j = \overline{1, q_i}$ , при котором ошибка  $e_i(t) = y_i^0(t) - y_i(t)$  будет удовлетворять ограничению

$$-e_i^0 \leq e_i(t) \leq e_i^0 \quad (1)$$

или находиться в области  $D_i = \{e_i(t) | -e_i^0 \leq e_i(t) \leq e_i^0\}$ .

Теперь сформулируем общие принципы управления тепловыми объектами, используя ошибку регулирования  $e_i(t) = y_i^0(t) - y_i(t)$  и ее скорость  $\dot{e}_i(t) = e_i(t) - e_i(t-1)$ .

Если ошибка  $e_i(t)$  положительна, то имеет место переохлаждение, а если отрицательна — перегрев. Положительная скорость ошибки  $\dot{e}_i(t)$  соответствует снижению, а отрицательная — возрастанию температуры. В зависимости от значения ошибки  $e_i(t)$ , ее скорости  $\dot{e}_i(t)$  и положения относительно области  $D_i$  следует использовать два закона управления, осуществляемых, соответственно, двумя регуляторами.

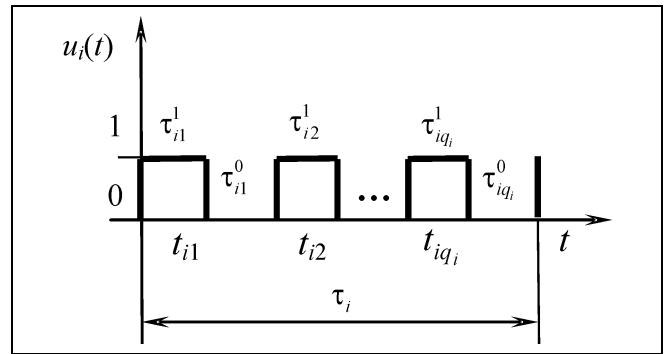


Рис. 2. Импульсное управление

Если ошибка  $e(t)$  находится за пределами области  $D_i$ , то многопозиционным регулятором (МПП) реализуется квазиоптимальный по быстродействию закон управления, при котором скорость ошибки  $\dot{e}_i(t)$  должна быть направлена к области  $D_i$  и снижаться по мере приближения к ней для предотвращения перерегулирования. С этой целью диапазон изменения ошибки  $e_i(t)$  надо разбить на несколько нечетких интервалов, характеризующих ее отклонение относительно области  $D_i$  и имеющих лингвистические значения: *NB* — большое отрицательное, *NM* — среднее отрицательное, *NS* — малое отрицательное, *PS* — малое положительное, *PM* — среднее положительное, *PB* — большое положительное.

Аналогичными лингвистическими значениями можно описать нечеткие интервалы изменения скорости ошибки  $\dot{e}_i(t)$ .

Введем также два интервала *NE* и *PE*, определяющие диапазон импульсного управления, совпадающий вначале с областью  $D_i$ . В результате получим два термножества, характеризующие ошибку  $T_e = \{NB, NM, NS, NE, PE, PS, PM, PB\}$  и ее скорость  $T_{\dot{e}} = \{ANY, NM, NS, PS, PM, PB\}$ , где *ANY* — произвольное значение скорости ошибки. Интервалы *NB* и *PB* задают допустимые пределы отрицательной (перегрева) или положительной (переохлаждения) ошибки, где при любой (*ANY*) скорости  $\dot{e}_i(t)$  должен быть соответственно отключен ( $u_i = 0$ ) или включен ( $u_i = 1$ ) нагреватель.

Согласно квазиоптимальному по быстродействию закону управления на лингвистических интервалах (*NM, NS, PS, PM*) ошибка  $e_i(t)$  ее скорость  $\dot{e}_i(t)$  принимает значения, приведенные в строке «□» табл. 1 в соответствии с рекомендациями работы [1].

Если ошибка  $e_i(t)$  с небольшой скоростью (*NM, NS, PS, PM*) попадает в интервалы *NE, PE* (строка «+» табл. 1), то происходит переход к импульсному управлению, вырабатываемому широтно-импульсным регулятором (ШИР).

И, наконец, при скоростях ошибки, больших (строка «●») или меньших (строка «○»), чем квазиоптимальные (строка «□»), МПП, соответственно, включает ( $u_i = 1$ ) или отключает ( $u_i = 0$ ) нагреватель. Более наглядную графическую трактовку режима работы системы управ-

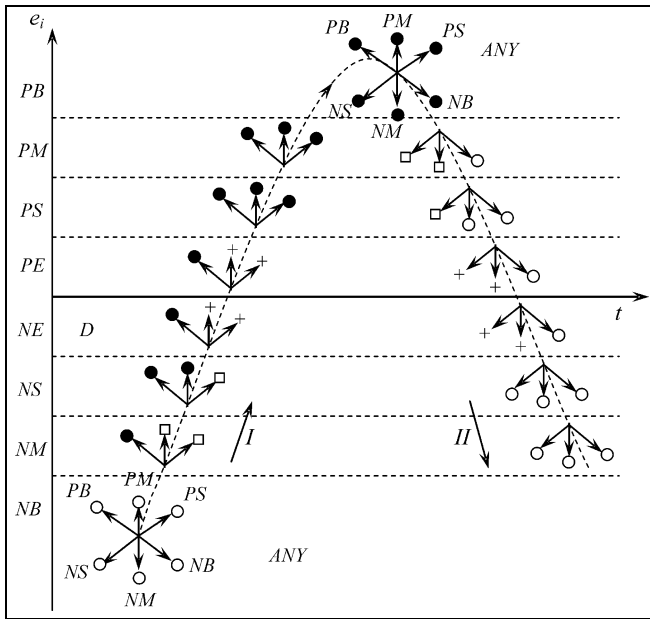
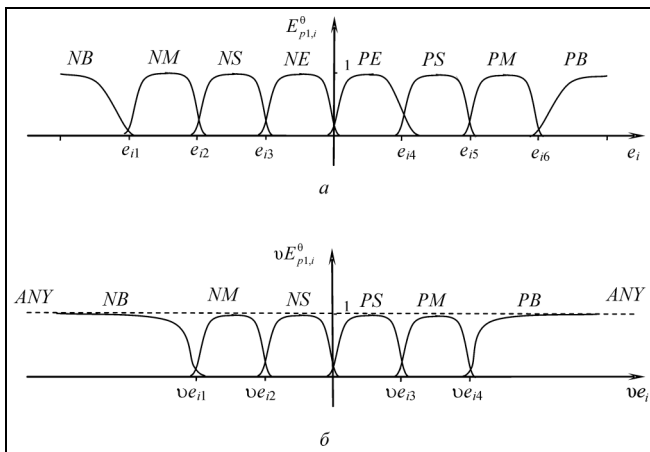


Рис. 3. Управляющие интервалы многопозиционного регулятора


 Рис. 4. Функции принадлежности, характеризующие: а — ошибку  $e_i(t)$ ; б — ее скорость  $v e_i(t)$ 

ления при увеличении (I) и уменьшении (II) ошибки  $e_i(t)$  и ее скорости  $v e_i(t)$  дает рис. 3.

Исходя из табл. 1 и рис. 3, МПР для всех интервалов ошибки  $e_i(t)$  и ее скорости  $v e_i(t)$  может:

- оставить неизменным управление  $u_i(t) = u_i(t - 1)$  (□);

- перейти к импульсному управлению (+);
- включить нагреватель  $u_i(t) = 1$  (●);
- выключить нагреватель  $u_i(t) = 0$  (○).

Эти действия позволяют сконструировать управляющие правила. В качестве примера приведем управляющие правила для ошибки  $e_i(t)$ , находящейся в нечетком интервале NB (I),

$$R_{p1,i}^1: \text{если } e_i(t) \text{ есть NB, } v e_i(t) \text{ есть ANY, то } u_i(t) := 0,$$

и нечетком интервале NM

$$R_{p1,i}^2: \text{если } e_i(t) \text{ есть NM, } v e_i(t) \text{ есть PS, то } u_i(t) := u_i(t - 1),$$

$$R_{p1,i}^3: \text{если } e_i(t) \text{ есть NM, } v e_i(t) \text{ есть PM, то } u_i(t) := u_i(t - 1),$$

$$R_{p1,i}^4: \text{если } e_i(t) \text{ есть NM, } v e_i(t) \text{ есть PB, то } u_i(t) := 1.$$

Аналогичным образом можно записать остальные 26 правил и представить МПР в следующей компактной форме:

$$R_{p1,i}^\theta: \text{если } e_i(t) \text{ есть } E_{p1,i}^\theta, v e_i(t) \text{ есть } v E_{p1,i}^\theta, \text{ то } u_i(t) := U^\theta, \quad (2)$$

где  $E_{p1}^\theta \in T_e^1$ ,  $v E_{p1}^\theta \in T_{ve}^1$ ,  $U^\theta = \{1, 0, u_i(t - 1)\}$ ,  $\theta = \overline{1, 30}$ .

Элементам терм-множеств  $T_e^1$  и  $T_{ve}^1$  соответствуют функции принадлежности, изображенные на рис. 4.

Для обеспечения требуемой точности регулирования предлагается импульсное управление  $u_i(\tau_{ij}^1, \tau_{ij}^0)$ , состоящее из импульсных последовательностей  $u_i^n$ , которые в зависимости от номера  $n$  имеют различные длительности импульсов  $\tau_{ij}^1$  и пауз  $\tau_{ij}^0$ , представленные в табл. 2. Отметим, что по мере увеличения номера  $n$  растет относительное суммарное время нагрева

$$\bar{\tau}_i^1(n) = \frac{1}{\tau_{i,n}(n)} \sum_{j=1}^{q(n)} \tau_{ij}^1(n),$$

где  $\tau_{i,n}(n)$  и  $\tau_{i,j}(n)$  — длительности последовательности и  $j$ -го импульса. Следовательно, чем больше  $n$ , тем больше тепла подводится к объекту и тем выше его средняя температура. Поэтому алгоритм функционирования ШИР заключается в выборе таких импульсных последовательностей  $u(n)$  из табл. 2, при которых выполняется условие (1). Переход от одной импульсной последова-

Таблица 1

Режимы работы многопозиционного регулятора

$e$		NB	NM	NS	NE	PE	PS	PM	PB
□	$v e$	—	PM, PS	PS	—	—	NS	NM, NS	—
+	$v e$	—	—	—	PM, PS, NM, NS	PM, PS, NM, NS	—	—	—
●	$v e$	—	PB	PM, PB	PB	PB	PB, PM, PS	PB, PM, PS	ANY
○	$v e$	ANY	NB, NM, NS	NB, NM, NS	NB	NB	NB, NM	NB	—



Таблица 2

Импульсные последовательности

n	u(n)					τ <sup>1</sup>
	0	1	0	0	—	
1	0	1	0	0	—	0,25
2	0	0	1	—	—	0,33
3	0	0	1	0	1	0,4
4	0	1	0	1	—	0,5
5	1	0	1	0	1	0,6
6	1	1	0	—	—	0,67
7	1	1	1	0	—	0,75

Таблица 3

Переменные ШИР

θ	E <sub>p2</sub>	∪E <sub>p2</sub>	dn <sup>θ</sup>
1	NE	NM	-1
2	NE	NS	-1
3	NE	PS	0
4	NE	PM	1
5	PE	NM	-1
6	PE	NS	0
7	PE	PS	1
8	PE	PM	1

тельности к другой осуществляется в зависимости от ошибки e<sub>i</sub>(t) и ее скорости ∪e<sub>i</sub>(t), принимающих лингвистические значения E<sub>p2, i</sub> и ∪E<sub>p2, i</sub> из соответствующих терм-множеств T<sub>e</sub><sup>2</sup> = {NE, PE} и T<sub>∪e</sub><sup>2</sup> = {NM, NS, PS, PM}.

Широтно-импульсный регулятор представляет собой набор нечетких правил, определяющих номер n последовательности

$$R_{p2, i}^{\theta}: \text{если } e_i(t) \text{ есть } E_{p2, i}^{\theta}, \cup e_i(t) \text{ есть } \cup E_{p2, i}^{\theta}, \text{ то } n_i(t) := n_i(t-1) + dn^{\theta}, \quad (3)$$

где θ = 1, 8, E<sub>p2, i</sub><sup>θ</sup> ∈ T<sub>e</sub><sup>2</sup>, ∪E<sub>p2, i</sub><sup>θ</sup> ∈ T<sub>∪e</sub><sup>2</sup>.

Уровень приращения dn<sup>θ</sup> и соответствующие лингвистические значения E<sub>p2, i</sub><sup>θ</sup>, ∪E<sub>p2, i</sub><sup>θ</sup> переменных e<sub>i</sub>(t) и ∪e<sub>i</sub>(t) из правил (3) приведены в табл. 3. Функции принадлежности элементов терм-множеств T<sub>e</sub><sup>2</sup> и T<sub>∪e</sub><sup>2</sup> определены на рис. 4. В условиях нестационарности и различия динамических характеристик по каналам управления нуждаются в уточнении параметры функции принадлежности e<sub>i</sub> = (e<sub>i, 1</sub>, ..., e<sub>i, 6</sub>, ∪e<sub>i, 1</sub>, ..., ∪e<sub>i, 4</sub>), i = 1, m, входящие в МПР и ШИР и позволяющие повысить качество регулирования. Из состава вектора e<sub>i</sub> можно удалить скорости ошибки ∪e<sub>ij</sub>, j = 1, 4 не оказывающие столь значительного влияния на процесс регулирования, как e<sub>ij</sub>.

2. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АДАПТАЦИИ

Рассмотрим ряд особенностей процесса регулирования, позволяющих правильно сконструировать критерий и эффективный алгоритм параметрической адаптации.

В процессе двухпозиционного регулирования могут установиться несимметричные колебания выходной величины с преобладанием положительной e<sub>i</sub><sup>+</sup>(t) = y<sub>i</sub><sup>0</sup>(t) - y<sub>i</sub>(t) > 0 или отрицательной e<sub>i</sub><sup>-</sup>(t) = y<sub>i</sub><sup>0</sup>(t) - y<sub>i</sub>(t) < 0 ошибок. Тогда произойдет довольно значительное смещение средней температуры  $\bar{y}_i$  относительно заданной y<sub>i</sub><sup>0</sup>, а средней ошибки  $\bar{e}_i(t)$  — относительно области D<sub>i</sub>. Кроме того, при ярко выраженных несимметричных колебаниях (когда практически отсутствует положительная или отрицательная ошибка) крайне сложно удержаться в области D<sub>i</sub>, т. е. реализовать качественное импульсное управление. Поэтому для оценки и последующего устранения несимметричности и снижения амплитуды колебаний следует воспользоваться критериями, полученными усреднением на k-м интервале времени t ∈ [(k-1)τ, kτ] отрицательного Δe<sub>i</sub><sup>-</sup>(t) = e<sub>i</sub><sup>-</sup>(t) + e<sup>0</sup> < 0, Δe<sub>i</sub><sup>-</sup>(t) = y<sub>i</sub><sup>0</sup>(t) - y<sub>i</sub>(t) < 0,

$$I_i^-(k) = \frac{1}{\tau} \sum_{\tau_{k, i} t = (k-1)\tau}^{k\tau} \Delta e_i^-(t), \quad (4)$$

положительного Δe<sub>i</sub><sup>+</sup>(t) = e<sub>i</sub><sup>+</sup>(t) + e<sup>0</sup> > 0, Δe<sub>i</sub><sup>+</sup>(t) = y<sub>i</sub><sup>0</sup>(t) - y<sub>i</sub>(t) > 0,

$$I_i^+(k) = \frac{1}{\tau} \sum_{\tau_{k, i} t = (k-1)\tau}^{k\tau} \Delta e_i^+(t), \quad (5)$$

и абсолютного отклонений относительно области D<sub>i</sub>

$$I^M(k) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \sum_{\tau_{k, i} t = (k-1)\tau}^{k\tau} (\Delta e_i^+(t) - \Delta e_i^-(t)), \quad (6)$$

где τ<sub>k, i</sub><sup>-</sup> и τ<sub>k, i</sub><sup>+</sup> — промежутки времени, на которых выполняются условия Δe<sub>i</sub><sup>-</sup>(t) < 0 и Δe<sub>i</sub><sup>+</sup>(t) > 0, соответственно.

Сформулируем задачу параметрической адаптации МПР и ШИР. Пусть задан или построен некоторый комплексный критерий I, сконструированный на основании критериев I<sub>i</sub><sup>-</sup>(k), I<sub>i</sub><sup>+</sup>(k), I<sup>M</sup>(k) и I<sub>i</sub><sup>-</sup>(k+1), I<sub>i</sub><sup>+</sup>(k+1), I<sup>M</sup>(k+1), рассчитанных на k-м и (k+1)-м интервалах времени, и позволяющий оценить изменение качества регулирования на (k+1)-м интервале. Тогда задача адаптации заключается в определении алгоритмом

$$e(k+1) = \psi(y(t), y^0(t), e(k)) \quad (7)$$

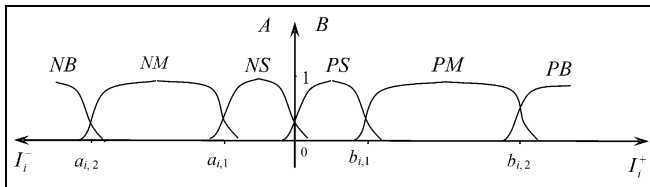


Рис. 5. Функции принадлежности, характеризующие критерии  $I_i^-$  и  $I_i^+$

по данным  $k$ -го интервала времени  $t \in [(k-1)\tau, k\tau]$  такого вектора параметров  $\mathbf{e}(k+1) = (e_{i,j}^\theta)$ ,  $i = \overline{1, m}$ ,  $j = \overline{1, 6}$ ,  $\theta = \overline{1, 9}$ , при котором на  $(k+1)$ -м интервале достигается более высокое качество регулирования.

Теперь перейдем к построению критерия  $I$  и алгоритма адаптации  $\psi$ .

Критерий  $I$  содержит бинарные операции сравнения, связывающие соответствующие критерии  $I_i^-(k)$ ,  $I_i^+(k)$ ,  $I^M(k)$  и  $I_i^-(k+1)$ ,  $I_i^+(k+1)$ ,  $I^M(k+1)$  на  $k$ -м и  $(k+1)$ -м интервалах и выдает значение «истина» (И), если на  $(k+1)$ -м интервале достигается более высокое качество регулирования, чем на  $k$ -м, и значение «ложь» (Л), в противном случае. При этом возможны две неоднозначные ситуации:

желательная

$$P: I_i^-(k) \leq I_i^-(k+1) \text{ и } Q: I_i^+(k) \geq I_i^+(k+1) \quad (8)$$

или нежелательная

$$\bar{P}: I_i^-(k) > I_i^-(k+1) \text{ и } \bar{Q}: I_i^+(k) < I_i^+(k+1) \quad (9)$$

и две противоречивые ситуации:

$$P_i: I_i^-(k) \leq I_i^-(k+1) \text{ и } \bar{Q}_i: I_i^+(k) < I_i^+(k+1) \quad (10)$$

или

$$\bar{P}_i: I_i^-(k) > I_i^-(k+1) \text{ и } Q_i: I_i^+(k) \geq I_i^+(k+1). \quad (11)$$

Противоречивые ситуации можно разрешить, используя условие:

$$R: I^M(k) > I^M(k+1) \quad (12)$$

с модульными критериями (6), определяющими ошибку выхода по всем контурам. Действительно, если имеет место противоречивая ситуация (10) или (11), то выполнение условия (12) подтверждает повышение качества переходного процесса на  $(k+1)$ -м интервале в целом для всех контуров. Объединение условий (8)–(12) дает критерий, реализующий требуемую логическую функцию  $I = [P_i \wedge Q_i] \vee \{[(P_i \wedge \bar{Q}_i) \vee (\bar{P}_i \wedge Q_i)] \wedge R\}$ .

Алгоритм адаптации вектора параметров  $\mathbf{e}$ , задающих границы интервалов  $NM$ ,  $NS$ ,  $NE$ ,  $PE$ ,  $PS$ ,  $PM$ , является также нечетким, реагирующим на значения критериев  $I_i^-$  и  $I_i^+$ , рассчитанных по формулам (4) и (5).

Пределы изменения каждого критерия  $I_i^-$  и  $I_i^+$  можно разбить на три нечетких интервала  $NB$ ,  $NM$ ,  $NS$  и  $PS$ ,  $PM$ ,  $PB$  соответственно (рис. 5).

Границы  $a_{i,1}$ ,  $b_{i,1}$  интервалов  $NS$ ,  $PS$  — это допустимые значения  $I_i^- = a_{i,1}$ ,  $I_i^+ = b_{i,1}$  критериев  $I_i^-(k)$ ,  $I_i^+(k)$ . Обозначим через  $\Delta e_{ij}$  приращение параметра  $e_{ij}(k)$  в моменты времени  $t = k\tau$ ,  $k = 1, 2, \dots$  Введем терм-множества  $T_A = \{NB, NM, NS\}$  и  $T_B = \{PS, PM, PB\}$  с элементами — лингвистическими значениями, характеризующими критерии  $I_i^-$  и  $I_i^+$ , соответственно. Тогда получим нечеткие правила, связывающие лингвистические значения  $A^\theta \in T_A$  и  $B^\theta \in T_B$  критериев с приращениями  $\Delta e_{ij}$  параметров  $e_{ij}(k)$ :

$$R_i^\theta: \text{если } I_i^- \text{ есть } A^\theta, I_i^+ \text{ есть } B^\theta, \text{ то}$$

$$e_{i1}(k+1) = e_{i1}(k) + \Delta e_{i1}^\theta, \dots, e_{i6}(k+1) = e_{i6}(k) + \Delta e_{i6}^\theta, \\ \theta = \overline{1, 9}; i = \overline{1, 3}. \quad (13)$$

Значения приращений  $\Delta e_{ij}$  — положительные числа  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_4$ , приведены в табл. 4. Значение и знак приращения  $\Delta e_{ij}$  в табл. 4 зависит от характерных особенностей технологической установки и процесса регулирования. Ограничивающие допустимые режимы работы установки минимальное  $e_{i1}$  и максимальное  $e_{i6}$  значения ошибки  $e$ , не подлежат изменению, т. е. приращения  $\Delta e_{i1}$  и  $\Delta e_{i6}$  равны нулю. Если преобладающее значение критерия  $I_i^-$  отрицательное  $|I_i^-| > I_i^+$ , то необходимо изменять  $e_{i2}$  и  $e_{i3}$ , т. е.  $\Delta e_{i2}, \Delta e_{i3} \neq 0$ , а если положительное  $I_i^+ > |I_i^-|$ , то необходимо изменять  $e_{i4}$  и  $e_{i5}$ , т. е.  $\Delta e_{i4}, \Delta e_{i5} \neq 0$ . При достаточно больших значениях обоих критериев  $I_i^- \gg I_i^+, I_i^+ \gg I_i^-$  изменяются все параметры  $e_{ij}$ ,  $j = \overline{2, 5}$  из-за приращений  $\Delta e_{i2}, \Delta e_{i3} \neq 0$  и  $\Delta e_{i4}, \Delta e_{i5} \neq 0$ . Таким образом, получим вектор параметров адаптации  $\mathbf{e}_i = (e_{i2}, e_{i3}, e_{i4}, e_{i5})$ .

Рассмотрим работу алгоритма адаптации (7) как нечеткого автомата, воздействующего на многосвязный объект управления. Направленный граф работы такого автомата показан на рис. 6. Алгоритм адаптации параметров в  $\theta$ -м правиле  $i$ -го контура условно разбит на два оператора: изменения параметров отрицательной  $\psi^-$  и

Таблица 4

Приращения параметров

$\theta$	$A^\theta$	$B^\theta$	$\Delta e_1$	$\Delta e_2$	$\Delta e_3$	$\Delta e_4$	$\Delta e_5$	$\Delta e_6$
1	$NS$	$PS$	0	0	0	0	0	0
2	$NM$	$PS$	0	$\alpha_1$	$\alpha_2$	0	0	0
3	$NB$	$PS$	0	$\alpha_3$	$\alpha_4$	0	0	0
4	$NS$	$PM$	0	0	0	$-\alpha_2$	$-\alpha_1$	0
5	$NM$	$PM$	0	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$-\alpha_2$	$-\alpha_1$	0
6	$NB$	$PM$	0	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$-\alpha_2$	$-\alpha_1$	0
7	$NS$	$PB$	0	0	0	$-\alpha_4$	$-\alpha_3$	0
8	$NM$	$PB$	0	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$-\alpha_4$	$-\alpha_3$	0
9	$NB$	$PB$	0	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$-\alpha_4$	$-\alpha_3$	0

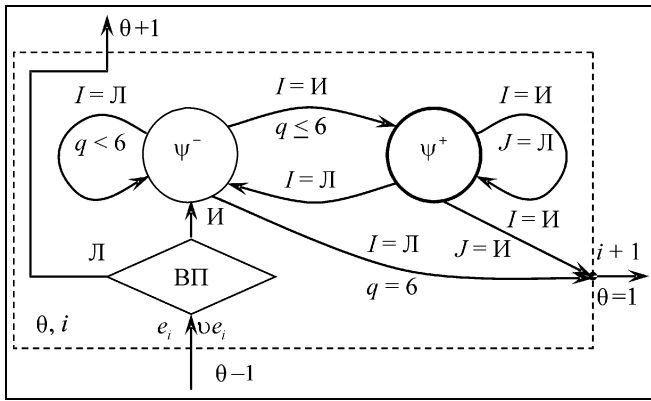


Рис. 6. Граф параметрической адаптации

положительной реакцией  $\psi^+$  [2]. Стрелками отмечены переходы от одного оператора к другому, рядом приведены события, вызывающие эти переходы. Выбор  $\theta$ -го правила из совокупности (13) осуществляется в блоке ВП и заключается в проверке принадлежности текущих значений ошибки  $e_i(t)$  и ее скорости  $\dot{e}_i(t)$  к нечетким множествам  $A^\theta$  и  $B^\theta$ . Например, пусть  $e_i(t)$  есть  $NM$  и  $\dot{e}_i(t)$  есть  $PM$ , тогда согласно табл. 4  $\theta = 5$ . В алгоритме  $\psi^-$  предлагается менять или определять параметры  $e_{ij}(k+1)$  на  $(k+1)$ -м шаге в соответствии с данными табл. 5 по формуле

$$e_{ij}^\theta(k+1) = e_{ij}^\theta(k) + \Delta e_{ij}^\theta(q),$$

$$i = \overline{1, m}, j = \overline{2, 5}, q = \overline{1, 6}, \quad (14)$$

где  $q$  — номер варианта изменения параметра на величину  $\Delta e_{ij}^\theta$  или  $-\Delta e_{ij}^\theta$ .

Число и номера уточняемых параметров, определенных в табл. 5, задаются кодовыми числами  $p = 5, 9, 14$ , найденными из соотношения

$$p = \{ \sum j | \Delta e_{ij}^\theta \neq 0, j \in [2, 5] \}.$$

Предположим, что на  $k$ -м интервале времени для  $\theta$ -го правила с кодовым числом  $5 \leq p \leq 10$  и варианта  $1 \leq q < 6$  не произошло улучшение переходного процесса, т. е.  $I = Л$ .

Тогда на интервалах  $k+1, k+2, \dots$  в соответствии с табл. 5 будут меняться номера вариантов  $q+1, q+2, \dots$  и значения параметров, рассчитанных по формуле (14). Такого рода циклические вычисления будут продолжаться до тех пор, пока на интервале  $k^* > k$  не будет найден вариант  $q^* > q$  и соответственно значение приращения  $\Delta e_{ij}^\theta(q^*)$ , при котором произойдут улучшение качества процесса регулирования ( $I = И$ ) и переход к оператору  $\psi^+$ .

В операторе  $\psi^+$  с найденными приращениями  $\Delta e_{ij}^\theta(q^*)$  циклически вычисляются параметры  $e_{ij}(k^* + l)$ ,  $l = 1, 2, \dots$  по формуле

$$e_{ij}^\theta(k^* + l) = e_{ij}^\theta(k^* + l - 1) + \Delta e_{ij}^\theta(q^*),$$

$$l = 1, 2, \dots$$

на  $(k^* + l)$ -м интервале времени, пока повышается качество процесса регулирования  $I = И$ , и не выполняется условие остановки

$$J = \bigwedge_{i=1}^3 [(I_i^-(k) \geq \dot{I}_i^-(k)) \wedge (I_i^+(k) < \dot{I}_i^+(k))],$$

т. е.  $J = Л$ . Окончание работы операторов  $\psi^-, \psi^+$  и в целом алгоритма адаптации параметров  $i$ -го контура и переход к  $(i+1)$ -му контуру происходят в двух случаях: когда выполнилось условие остановки  $J = И$  или исчерпались все варианты  $q = \overline{1, 6}$  и не произошло улучшения качества процесса регулирования  $I = Л$ .

### 3. ПРИМЕР ПРИМЕНЕНИЯ НЕЧЕТКОГО КОМБИНИРОВАННОГО РЕГУЛЯТОРА

Предлагаемая методика была использована при построении адаптивного нечеткого регулятора (АНР) для программной стабилизации температуры отжига  $y(t)$  трансформаторной стали в колпаковой электрической печи СГВ-16-20 с допустимой ошибкой регулирования

Таблица 5

Варианты изменения управляющих параметров

p	q					
	1	2	3	4	5	6
5	$e_{12}(k) + \Delta e_2$ $e_{13}(k) + \Delta e_3$	$e_{12}(k)$ $e_{13}(k) + \Delta e_3$	$e_{12}(k) + \Delta e_2$ $e_{13}(k)$	$e_{12}(k) - \Delta e_2$ $e_{13}(k) - \Delta e_3$	$e_{12}(k)$ $e_{13}(k) - \Delta e_3$	$e_{12}(k) - \Delta e_2$ $e_{13}(k)$
9	$e_{14}(k) + \Delta e_4$ $e_{15}(k) + \Delta e_5$	$e_{14}(k)$ $e_{15}(k) + \Delta e_5$	$e_{14}(k) + \Delta e_4$ $e_{15}(k)$	$e_{14}(k) - \Delta e_4$ $e_{15}(k) - \Delta e_5$	$e_{14}(k)$ $e_{15}(k) - \Delta e_5$	$e_{14}(k) - \Delta e_4$ $e_{15}(k)$
14	$e_{12}(k) + \Delta e_2$ $e_{13}(k) + \Delta e_3$ $e_{14}(k) + \Delta e_4$ $e_{15}(k) + \Delta e_5$	$e_{12}(k)$ $e_{13}(k)$ $e_{14}(k) + \Delta e_4$ $e_{15}(k) + \Delta e_5$	$e_{12}(k) + \Delta e_2$ $e_{13}(k) + \Delta e_3$ $e_{14}(k)$ $e_{15}(k)$	$e_{12}(k) - \Delta e_2$ $e_{13}(k) - \Delta e_3$ $e_{14}(k) - \Delta e_4$ $e_{15}(k) - \Delta e_5$	$e_{12}(k)$ $e_{13}(k)$ $e_{14}(k) - \Delta e_4$ $e_{15}(k) - \Delta e_5$	$e_{12}(k) - \Delta e_2$ $e_{13}(k) - \Delta e_3$ $e_{14}(k)$ $e_{15}(k)$



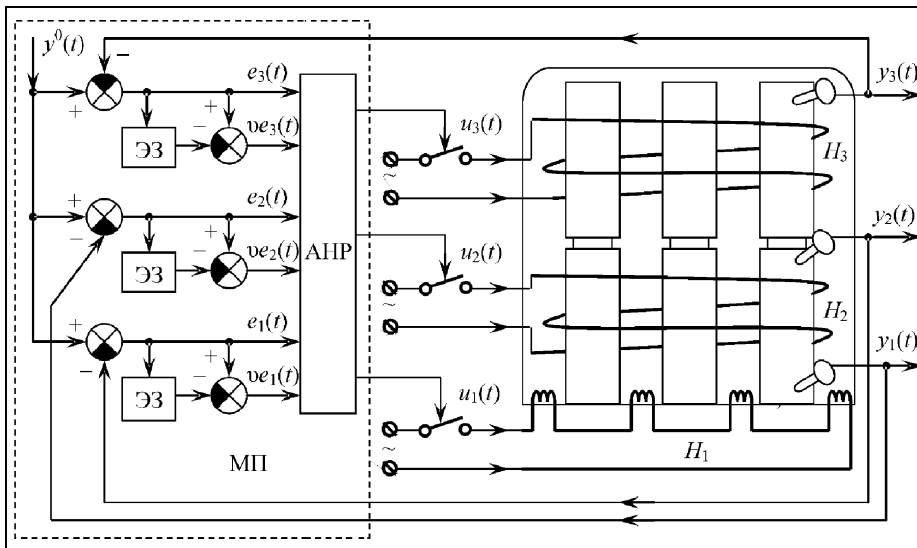


Рис. 7. Схема регулирования температуры отжига

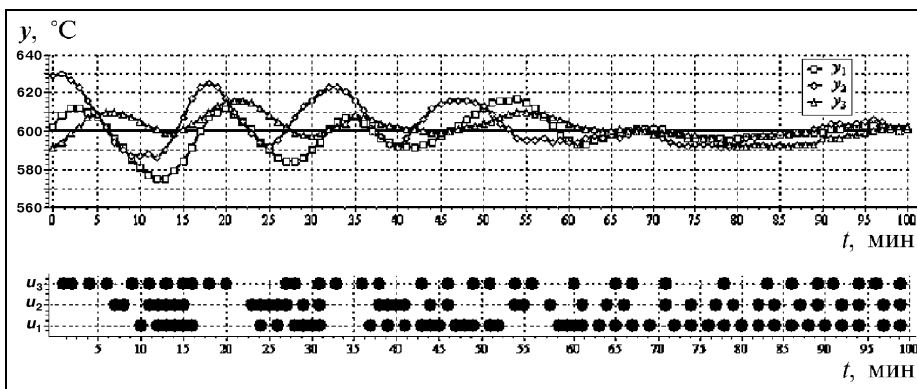


Рис. 8. Графики регулирования температуры отжига

$e_i^0 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 7). На вход микропроцессора МП подаются значения температуры отжига  $y_i(t)$  в зонах. Сумматоры и элементы запаздывания ЭЗ формируют необходимую информацию для АНР: ошибки регулирования  $e_i(t) = y^0(t) - y_i(t)$  и их скорости изменения  $ve_i(t) = e_i(t) - e_i(t-1)$ ,  $i = 1, 2, 3$ ; АНР, содержащий МПР и ШИР, вырабатывает управляющие воздействия  $u_i$ , отключающие ( $u_i = 0$ ) или подключающие ( $u_i = 1$ ) напряжения к нагревателям  $H_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ , в соответствии с нечеткими правилами (2) или (3).

Полученные в процессе работы АНР графики отжига рулонной трансформаторной стали в трех зонах (рис. 8) после 60-ти мин параметрической адаптации практически не выходят за пределы допустимого диапазона температуры  $600 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ .

$$\text{Средние модульные ошибки в зонах } I_i^M = \sum_{t=1}^{60} e_i^M(t)/60,$$

$i = 1, 2, 3$  существующей системы управления  $I_1^M = 13,20$ ,

$I_2^M = 14,73$  и  $I_3^M = 9,52$  более чем в три раза превосходят аналогичные показатели  $I_1^M = 3,03$ ,  $I_2^M = 4,78$  и  $I_3^M = 3,42$  разработанного адаптивного нечеткого регулятора, что подтверждает его высокую эффективность.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье изложена процедура построения релейных систем управления нестационарными многосвязными тепловыми объектами. Предложена комбинация двух нечетких релейных регуляторов: многопозиционного и широтно-импульсного.

Многопозиционный регулятор за минимальное время и с небольшим перерегулированием приводит выходную переменную к заданному значению, а широтно-импульсный удерживает ее в некоторой окрестности задания. Такой комбинированный нечеткий регулятор применялся для программной стабилизации температуры трансформаторной стали в печах отжига и позволил значительно улучшить качество регулирования по сравнению с ранее используемым релейно-импульсным регулятором. Процесс стабилизации температуры сопровождался адаптацией нечеткого регулятора к изменяющимся во времени динамическим характеристикам печи отжига. Однако были задействованы далеко не все возможности адаптации, на-

пример, связанные с уточнением количества правил и параметров, изменяющих форму функций принадлежности. Следует ожидать, что нечеткий комбинированный регулятор, помимо нестационарности, способен эффективно настраиваться на другие возмущающие воздействия и сохранять в этих условиях высокую работоспособность.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Braae M., Rutherford D. A. Theoretical and linguistic aspects of fuzzy controller // Automatica. — 1979. — Vol. 12. — P. 553—577.
2. Расстригин Л. А. Статистические методы поиска. — М.: Наука, 1968. — 376 с.

☎ (4742) 32-80-53

e-mail: kui\_kiu@lipetsk.ru

□