

С. В. Шидловский

(Томск)

**ЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМА  
С ПЕРЕСТРАИВАЕМОЙ СТРУКТУРОЙ  
В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ**

Обсуждается применение многофункциональных логических модулей для построения систем с перестраиваемой структурой. Показана квазиизотропная среда, основанная на логических модулях, способная выбирать наилучший закон управления из заданного класса как для объектов, обладающих транспортным запаздыванием, так и для объектов без запаздывания.

**Введение.** Одними из эффективных систем для управления технологическими процессами в условиях неполной информации о параметрах объекта могут оказаться системы с перестраиваемой структурой (СПС) [1]. Основная идея построения СПС состоит в использовании переключающихся законов управления, соответствующих различным структурам замкнутой системы. Переключение происходит на основе текущей информации о состоянии объекта управления в соответствии с выбранной функцией переключения.

Использование перестраиваемого закона управления позволяет снизить чувствительность системы к параметрическим и координатным возмущениям, а также добиться инвариантности по отношению к заданному воздействию. Это связано с тем, что «разрывной» характер управления сближает СПС с системами, имеющими бесконечный коэффициент усиления (в то же время само управление в СПС остается ограниченным).

В данной работе впервые обсуждается реализация регулятора с использованием квазиизотропной среды [2, 3] для выбора наилучшего закона управления из заданного класса и оптимального использования логических структур в задачах регулирования, что позволяет наделять всю систему новыми динамическими свойствами.

**Постановка задачи.** Рассматривается класс объектов, описываемый передаточной функцией вида

$$W_{об}(p) = \frac{k \exp(-\tau p)}{Tp + 1},$$

где  $k$  – коэффициент передачи объекта;  $T$  – постоянная времени;  $\tau$  – величина запаздывания.

Считается, что на объект управления действуют координатное  $f$  и параметрическое  $a$  возмущения. Координатное возмущение есть неизвестная величина со стороны нагрузки на объект управления, которая проявляется в виде неконтролируемых произвольных изменений технологических параметров и по характеру изменения во времени может быть импульсной и медленно меняющейся. Параметрическое возмущение есть неизвестная величина из некоторого ограниченного множества, в результате действия которой происходит медленное изменение параметров объекта управления.

Ставится задача выбора такого управления  $u$ , при котором выходное значение  $y$  объекта управления совпадало бы с задающим значением или их разница была в допустимых пределах при изменении внешних возмущающих воздействий  $f$  и  $a$ . Под влиянием внешних возмущений, информации о которых часто недостаточно, взаимосвязь между входом и выходом объекта становится неоднозначной и неопределенной, что сильно затрудняет решение задачи.

Для подобного класса объектов с неточно известной моделью в условиях действия неконтролируемых возмущений типовые регуляторы (П, И, ПИ, ПИД) оказываются неэффективными. Поэтому решение подобных задач предлагается искать в классе систем с переменной структурой [1]. В этих системах может использоваться логический закон управления, заданный с помощью разрывных функций координат системы. В ряде случаев необходимо изменение самого логического закона регулирования, что требует перестройки структуры системы, т. е. изменения не только комбинационных связей, но и функциональных.

Таким образом, постановка рассматриваемой задачи управления заключается в стабилизации регулируемой величины при неполной информации об объекте управления и обеспечении свойства инвариантности к внешним возмущающим воздействиям путем перестройки внутренней структуры регулятора.

**Формирование логического закона управления.** В общем случае закон управления для систем с перестраиваемой структурой выглядит следующим образом:

$$u = \Psi \varepsilon, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  – сигнал ошибки регулирования;  $\Psi$  – логический закон, принимающий определенное значение в зависимости от типа объекта управления и его текущего состояния.

Устройство управления (УУ), реализующее (1), можно представить в виде заданного класса динамических корректирующих звеньев  $A_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ), логического устройства  $M$  и вспомогательных блоков формирования входных аргументов  $X$  и настройки структуры  $Z$ . Последние блоки служат для выработки логических переменных, зависящих от состояния системы в фазовом пространстве и настройки логического устройства  $M$  на требуемый логический закон управления (рис. 1).

В системах с переменной структурой требуемые динамические свойства замкнутой системы обеспечиваются надлежащим выбором поверхности переключения, вид которой задается при синтезе [4]. В нашем случае поверхность переключения реализуется квазиизотропной средой, построенной на основе многофункциональных логических модулей (МЛМ) двух типов [5]. Структура первого МЛМ реализует системы булевых формул из классов бес-

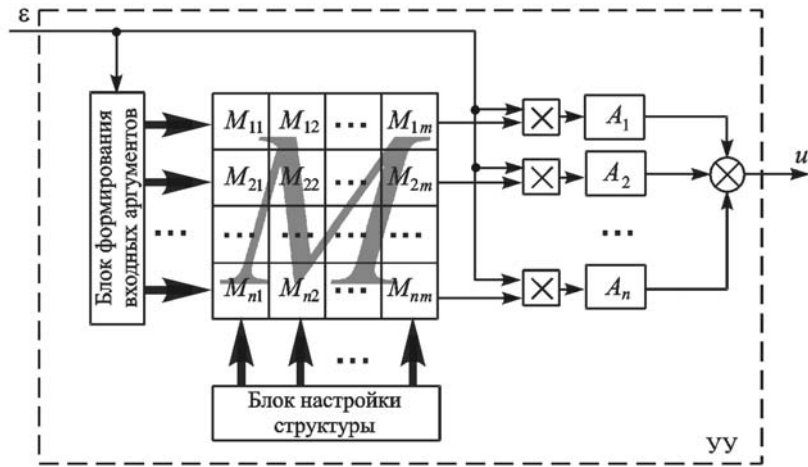


Рис. 1. Структурная схема устройства управления

повторных упорядоченных и неупорядоченных формул ( $L$ -структура) и описывается следующей системой булевых формул [2]:

$$\begin{cases} f_1 = y_1 (\bar{Z}_1 Z_2 \vee Z_3) \vee (y_1 \vee Z_1 \vee Z_2) x \bar{Z}_3; \\ f_2 = y_1 Z_1 Z_2 \bar{Z}_3 \vee y_2 Z_1 \bar{Z}_2 Z_3 \vee (y_1 \vee \bar{Z}_1 \vee Z_2) y_2 \bar{Z}_3 \vee (y_2 \vee Z_1 \vee Z_2) x Z_3; \\ f_3 = y_3 \bar{Z}_3 \vee (y_2 \vee \bar{Z}_1 \vee \bar{Z}_2) y_3 Z_3 \vee y_2 \bar{Z}_1 Z_2 Z_3, \end{cases}$$

где  $x, y_1, y_2, y_3$  – информационные входы;  $Z_1, Z_2, Z_3$  – настроечные входы;  $f_1, f_2, f_3$  – выходы ячейки.

Структура второго модуля реализует класс повторных упорядоченных произвольных нормальных булевых формул из  $h$  букв, а также системы булевых формул как с пропусками аргументов, так и без них ( $V$ -структура) и описывается системой булевых формул [3]:

$$\begin{cases} f_1 = \bar{Z}_3 \bar{Z}_4 [x (Z_2 \vee y_1 \vee Z_1) \vee \bar{Z}_1 Z_2 y_1] \vee Z_3 \bar{Z}_4 y_1 \vee \bar{Z}_3 Z_4 x \vee \\ \vee Z_3 Z_4 [x (Z_1 \vee \bar{Z}_2 \vee y_1)] \vee \bar{Z}_1 Z_2 y_1; \\ f_2 = \bar{Z}_3 \bar{Z}_4 [y_2 (Z_2 \vee \bar{Z}_1 \vee y_1) \vee Z_1 Z_2 y_1] \vee Z_3 \bar{Z}_4 y_2 (x \vee Z_2) \vee \\ \vee \bar{Z}_3 Z_4 [y_2 (Z_1 \vee \bar{Z}_2 y_1 \vee y_1 x) \vee Z_1 (y_1 \vee Z_2 x)] \vee Z_3 Z_4 [\bar{Z}_1 Z_2 (y_2 \vee x) \vee y_1 (\bar{Z}_2 \vee x)]; \\ f_3 = \bar{Z}_3 \bar{Z}_4 [y_3 (Z_1 \vee \bar{Z}_2 \vee x) \vee \bar{Z}_1 \bar{Z}_2 x] \vee Z_3 \bar{Z}_4 [y_3 (Z_2 \vee \bar{Z}_1 \vee x) \vee \\ \vee Z_1 Z_2 x] \vee \bar{Z}_3 Z_4 [y_3 (\bar{Z}_1 \vee Z_2 \vee x) \vee \bar{Z}_1 \bar{Z}_2 x] \vee Z_3 Z_4 [y_3 (Z_1 \vee Z_2 \vee y_2) \vee Z_1 y_2]. \end{cases}$$

Здесь  $x, y_1, y_2, y_3$  – информационные входы;  $Z_1, Z_2, Z_3, Z_4$  – настроечные входы;  $f_1, f_2, f_3$  – выходы ячейки.

Построенная на их основе квазиизотропная среда представляет собой три грани пространственной шестинаправленной структуры (рис. 2) [6]. Центральная (первая) грань является линейной структурой из  $L$ - и  $V$ -ячеек с режимными боковыми входами  $y_i$  ( $i=1,2,3$ ) и поданными аргументами  $X_j$  ( $j=1,2,\dots,n$ ,  $n=6$  – число аргументов) системы, описывающими логический закон управления, на функциональные входы  $x$  ячеек. Вторая и третья грани представляют собой также линейные структуры из  $V$ -ячеек с режим-

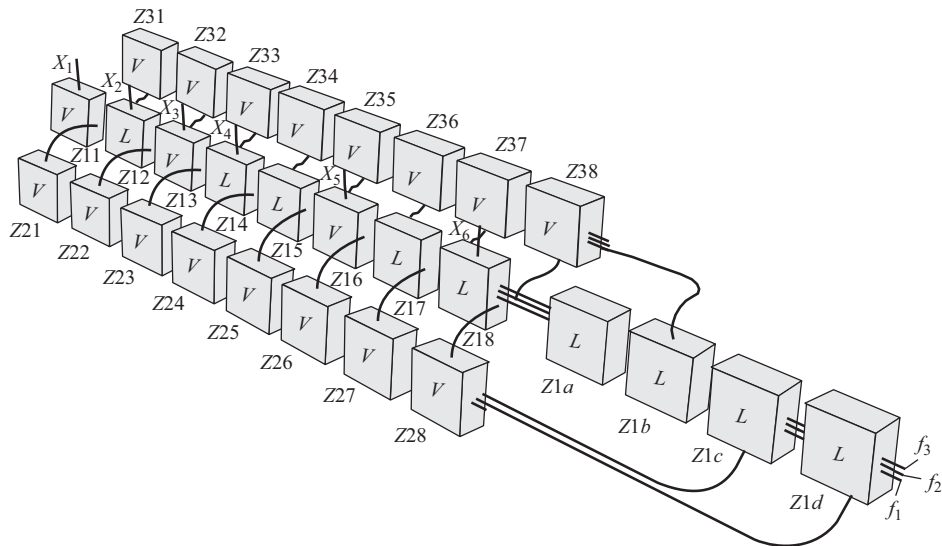


Рис. 2. Квазиизотропная среда

ными входами. На функциональные входы  $x$  поданы промежуточные значения после соседних ячеек центральной грани первого и второго каналов для второй и третьей граней соответственно.

Для различных типов технологических объектов необходимо использовать разные законы управления. Так, например, для объектов с постоянными параметрами в случае использования системы с переменной структурой закон управления описывается выражением

$$\Psi = \begin{cases} \alpha & \text{при } \varepsilon s_1 > 0; \\ \beta & \text{при } \varepsilon s_1 < 0, \end{cases} \quad (2)$$

а для объекта с постоянными параметрами и обладающим транспортным запаздыванием имеет вид [1]

$$\Psi = \begin{cases} \alpha & \text{при } \varepsilon s_1 > 0; \\ \beta & \text{при } s_2 s_1 < 0; \\ 0 & \text{при } \varepsilon s_2 < 0. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь  $\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты передачи первой и второй линейных структур соответственно ( $A_1 = \alpha$ ,  $A_2 = \beta$ ) (см. рис. 1);  $s_i = \text{sgn}(\varepsilon' + c_i \varepsilon)$  ( $i=1,2$ ) – информация о знаке линейной комбинации ошибки и ее производной, характеризующая положение системы в фазовом пространстве относительно прямых переключений;  $c_i$  – коэффициент наклона прямых. Как видно, для функционирования системы не требуется точного значения производной от сигнала ошибки, а достаточно лишь информации о знаке ее линейной комбинации с величиной ошибки, которую можно получить сравнительно простыми техническими средствами, описанными, например, в [1, 7].

В булевой форме стратегию выбора динамического закона управления для объектов без транспортного запаздывания можно представить следующим образом:

$$\begin{cases} f_1 = X_1; \\ f_2 = X_2; \\ f_3 = 0, \end{cases} \quad (4)$$

а для объектов с запаздыванием в виде

$$\begin{cases} f_1 = (X_1 \vee X_4)X_2X_3; \\ f_2 = X_1X_3X_5; \\ f_3 = X_1X_6(X_2 \vee X_5), \end{cases} \quad (5)$$

где  $X_j$  ( $j=1,2,\dots,6$ ) – логические аргументы, отражающие поведение рассматриваемой системы в фазовом пространстве, вырабатываемые блоком формирования входных аргументов (см. рис. 1).

Система булевых формул (4) или (5) формируется логическим устройством  $M$  (см. рис. 1), для этого каждый вход  $Z$   $ij$ -й ячейки квазиизотропной среды (см. рис. 2) необходимо настроить согласно табл. 1 или табл. 2. Следовательно, два закона управления можно реализовать на одной вычислительной среде, используя в качестве ее элементарных узловых элементов МЛМ. Причем количество реализуемых алгоритмов представленной квазиизотроп-

Т а б л и ц а 1

**Настроечные коды квазиизотропной среды  
для реализации алгоритма управления объектом без транспортного запаздывания**

$i$	$j$											
	1	2	3	4	5	6	7	8	$a$	$b$	$c$	$d$
1	0011	001	0110	010	010	0110	010	010	010	010	010	010
2	0101	1111	0110	0110	0110	0110	0110	0110	–	–	–	–
3	0101	1111	0110	0110	0110	0110	0110	0110	–	–	–	–

Т а б л и ц а 2

**Настроечные коды квазиизотропной среды  
для реализации алгоритма управления объектом с транспортным запаздыванием**

$i$	$j$											
	1	2	3	4	5	6	7	8	$a$	$b$	$c$	$d$
1	1001	111	0101	010	100	1001	000	110	000	010	000	010
2	0101	0110	0110	0110	0110	0100	0110	0101	–	–	–	–
3	0110	1001	0110	0110	0110	0110	0110	0110	–	–	–	–

ной среды не ограничивается только двумя, которые мы используем. Оно зависит от числа фиксированных структур, реализуемых логическим устройством  $M$ , которое, в свою очередь, зависит от обобщенного настроечного кода логического устройства и составляет  $2^r$  структур, где  $r$  – разрядность этого кода. В нашем случае нетрудно подсчитать (по табл. 1 или табл. 2), что  $r = 103$ . Кроме того, следует отметить, что при различных фиксированных структурах, а тем самым и различных настроечных кодах, устройства  $M$  последнее может реализовывать одни и те же алгоритмы, поэтому их число  $m \leq 2^r$ .

Приведем методику синтеза логического устройства  $M$  на уже разработанных или вновь разрабатываемых МЛМ.

1. Записываются алгоритмы управления, удовлетворяющие требованиям, предъявляемым к системе.

2. Выбранные алгоритмы представляются в булевой форме.

3. Выбирается один алгоритм, полученный в п. 2, покрывающий больший класс булевых формул.

4. Выбирается множество МЛМ, на которых будет реализовываться алгоритм (это множество может быть и единичным – случай изотропной среды), и вид комбинационных связей между соседними МЛМ.

5. Из набора фиксированных структур, реализуемых выбранными МЛМ, выделяются те, которые обеспечивают реализацию соответствующей булевой операции в логическом законе управления из п. 3.

6. На основе выделенного подмножества автоматных отображений выбранных МЛМ синтезируется изотропная или квазиизотропная среда, обеспечивающая реализацию логического закона управления (т. е. выполняется процесс последовательного вложения каждого аргумента логического закона в квазиизотропную среду). Результатом являются синтезированная квазиизотропная среда и коды настройки каждого МЛМ среды на реализацию логического закона из п. 3 (см. рис. 2 и табл. 2 соответственно).

7. Настраиваем квазиизотропную среду на реализацию следующего алгоритма из п. 2, используя ее в качестве «каркаса» и изменяя автоматные отображения каждой МЛМ, путем подачи на него определенного настроечного кода таким образом, что аргументы реализуемого алгоритма последовательно вкладываются в квазиизотропную среду. Результатом является код настройки квазиизотропной среды на соответствующий алгоритм (см. табл. 1).

8. Повторяется п. 7  $k - 2$  раза, где  $k$  – число алгоритмов из п. 2.

Исходя из методики следует, что количество входов  $X$  логического устройства  $M$  зависит только от сложности реализуемого алгоритма, удовлетворяющего требованиям системы, т. е. от количества аргументов, использующихся при его описании в булевой форме. Количество же настроечных входов  $Z$  зависит от выбранного варианта комбинационных связей между МЛМ, а тем самым от формы квазиизотропной среды, количества МЛМ в среде и количества настроечных входов каждого МЛМ.

**Пример синтеза системы без запаздывания в контуре управления.** В качестве иллюстрации описанного подхода рассмотрим объект с передаточной функцией

$$W_{об}(p) = \frac{k}{Tp + 1} = \frac{6}{97,7p + 1}.$$

Обеспечим в системе переходный процесс с заданным качеством (время регулирования  $t_p \leq 15$  с, перерегулирование  $\sigma \leq 20\%$ ). Поскольку объект регулирования и линейные структуры регулятора являются статическими звеньями, то при конечных коэффициентах последнего в замкнутой системе будет возникать статическая ошибка. Для сведения ее к нулю придадим системе свойство астатизма, введя в контур управления интегрирующее звено с передаточной функцией вида

$$W_{\text{и}}(p) = \frac{1}{T_{\text{и}} p}.$$

Передаточная функция приведенного объекта в таком случае принимает вид

$$W_{\text{об}}^*(p) = \frac{k}{T_{\text{и}} T p^2 + T_{\text{и}} p}.$$

Из работы [1] известно, что для организации скользящего режима в системе второго порядка с регулятором, имеющим две линейные структуры, достаточно выбрать коэффициенты передачи  $\alpha$  и  $\beta$  выражения (2), пользуясь соотношением вида

$$\begin{cases} \alpha > \frac{-c_1^2 + c_1 a_2 - a_1}{a_1}; \\ \beta < \frac{-c_1^2 + c_1 a_2 - a_1}{a_1}, \end{cases}$$

где  $a_1 = k/(T_{\text{и}} T)$ ;  $a_2 = 1/T$ .

Из вышеизложенного находим, что  $\beta < -1,62 < \alpha$  (при  $T_{\text{и}} = 1$  и  $c_1 = 0,2$ ). Фазовые портреты линейных структур при  $\alpha$  и  $\beta$  представлены на рис. 3, а для начальных условий  $x_1^0 \in [-1; 0,5; \dots; 1]$ ,  $x_2^0 \in [-1; 0,5; \dots; 1]$ . Как

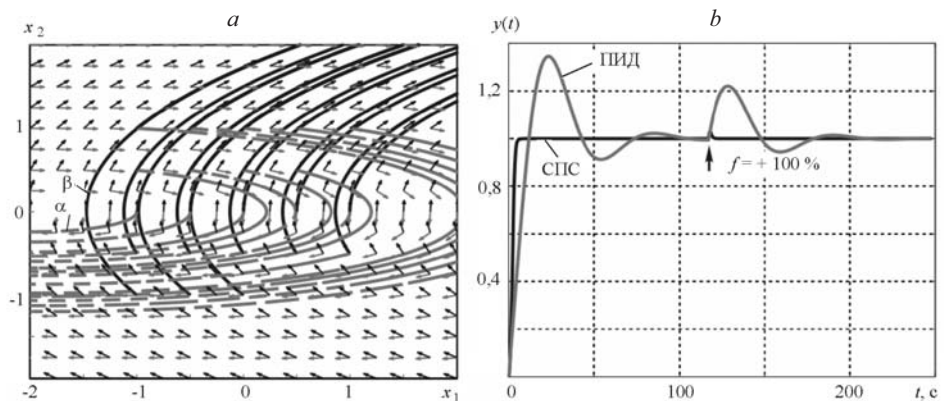


Рис. 3. Результаты моделирования: фазовые портреты и поля направлений для линейных структур (а); динамические характеристики рассматриваемой автоматической системы регулирования с разными типами регуляторов (б)



видно, фазовые траектории в области прямой переключения (IV четверть) направлены в разные стороны, что позволяет организовать скользящий режим.

На рис. 3, *b* приведены сравнительные переходные характеристики для системы с ПИД- и СПС-регуляторами, из которых видно, что последний значительно лучше справляется с двумя основными задачами системы автоматического регулирования – программным управлением и стабилизацией технологического параметра (в данном случае при координатном возмущении  $f$ ) – по сравнению с традиционными системами. При действии параметрических возмущений на объект регулирования, в результате которых происходит изменение постоянной времени объекта, СПС-регулятор позволяет существенно расширить улучшенные показатели качества переходного процесса (рис. 4, *a*).

**Пример синтеза системы с запаздыванием в контуре управления.**

При построении систем автоматического регулирования технологическими процессами весьма часто оказывается, что контур управления обладает чистым запаздыванием. Также следует отметить, что во многих случаях динамические системы высоких порядков с достаточной степенью точности аппроксимируются системой первого или второго порядка с запаздыванием [7]. В качестве примера рассмотрим объект регулирования с передаточной функцией

$$W_{об}(p) = \frac{k \exp(-\tau p)}{Tp + 1} = \frac{6 \exp(-23,4 p)}{97,7p + 1}.$$

Обеспечим переходный процесс в системе с продолжительностью, близкой к величине  $t_p = 150$  с и  $\sigma \leq 15\%$ , за счет сочетания конечного числа структур, отличных друг от друга лишь уровнем воздействия по координате ошибки. Как и в предыдущем примере, придадим всей системе свойство астатизма, тогда для приведенного объекта управляющее воздействие  $u$  теперь необходимо вырабатывать с учетом системы (3). Найдем параметр  $\alpha = 0,0074$  из уравнения гармонического баланса, тогда величину  $\beta = -0,0006$  выберем из условия, что система в момент переключения на вторую линейную структу-

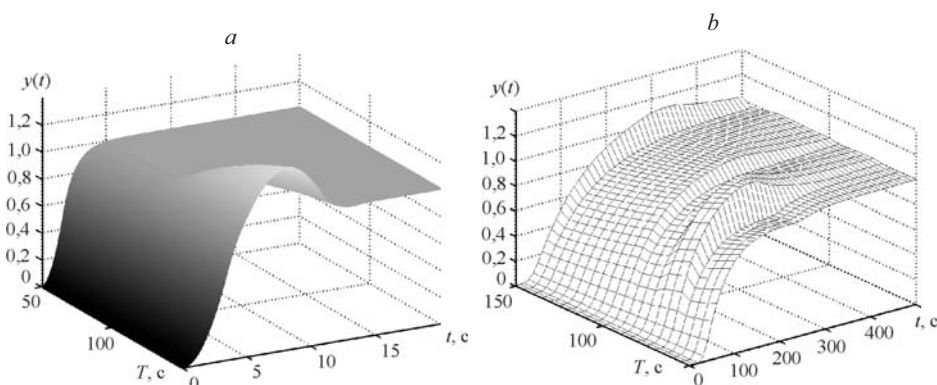


Рис. 4. Динамика изменения переходного процесса в системе при действии параметрического возмущения: для объекта без запаздывания (*a*); для объекта, обладающего транспортным запаздыванием (*b*)



ру должна быть охвачена положительной обратной связью и ее фазовая траектория направлена противоположно движению траектории первой линейной структуры (при коэффициенте  $\alpha$ ).

Система автоматического регулирования за время протекания переходного процесса должна трижды сменить структуру: сначала объект должен быть охвачен отрицательной обратной связью, затем на интервале продолжительностью  $(t_p - \tau) - t_1$ , причем  $t_1 < (t_p - \tau)$ , – положительной обратной связью и, наконец, с момента  $t_p - \tau$  система становится разомкнутой. Чем величина  $t_1$  ближе к  $t_p - \tau$ , тем меньше переходный процесс будет отличаться от первой полуволны переходного процесса системы с линейной структурой при коэффициенте  $\alpha$  [1].

Для построения системы с перестраиваемой структурой, в которой реализуется описанный переходный процесс, необходимо найти закон изменения структуры в функции координат системы. При произвольном постоянном воздействии строим переходный процесс, выбрав моменты переключения  $t_1$  и  $t_p - \tau$ . В силу того что каждая из рассматриваемых структур является линейной, при любом постоянном воздействии отношение  $(d\varepsilon/dt)/\varepsilon$  для различных процессов в моменты переключения будет неизменным. Следовательно, коэффициенты наклона прямых переключений (при  $t_1 = 120$  с) найдутся из графиков ошибки регулирования и ее производной по формулам:

$$c_1 = - \frac{d\varepsilon(t_1)/dt}{\varepsilon(t_1)} = 0,0028,$$

$$c_2 = - \frac{d\varepsilon(t_p - \tau)/dt}{\varepsilon(t_p - \tau)} = 0,017.$$

При этом квазиизотропную среду настроим в соответствии с табл. 2.

В результате СПС-регулятор, функционируя совместно с объектами, обладающими транспортным запаздыванием, позволяет добиться переходных процессов (рис. 4, *b*) практически без перерегулирования с быстроедействием, близким к системам, которые функционируют совместно с ПИД-регулятором.

**Заключение.** Описаны разработанные МЛМ с перестраиваемой структурой, на основе которых осуществляется построение квазиизотропной среды для реализации требуемого закона управления и приводится методика синтеза таких сред. Полученная в работе среда с перестраиваемой структурой обеспечивает реализацию заданного ограниченного множества законов управления, представленных в виде систем булевых формул из классов бесповторных упорядоченных и неупорядоченных булевых функций, а также из класса повторных упорядоченных произвольных нормальных булевых формул из  $h$  букв и систем булевых формул как с пропусками аргументов, так и без них.

Таким образом, регуляторы с перестраиваемой структурой, построенные на основе МЛМ, получают временной выигрыш в процессе перестройки своей внутренней структуры. Используя одну и ту же квазиизотропную среду регулятора, можно добиться повышения качества управления для объектов как с транспортным запаздыванием, так и без него путем подачи определенного настроечного кода на каждую ячейку среды, изменяя тем самым внутреннюю структуру и закон функционирования регулятора.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Емельянов С. В.** Системы автоматического управления с переменной структурой. М.: Наука, 1967.
2. **Пат. № 2251140 РФ.** Ячейка однородной среды /С. В. Шидловский. Оpubл. 2005, Бюл. изобр. № 12. 9 с.
3. **Пат. № 2251141 РФ.** Ячейка однородной среды /С. В. Шидловский. Оpubл. 2005, Бюл. изобр. № 12. 13 с.
4. **Уткин В. И.** Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления. М.: Наука, 1981.
5. **Shidlovskiy S. V.** The hyper model which can be re-formed // X Intern. Sci. and Pract. Conf. of Students, Post-graduates and Young Scientists “Modern Techniques and Technology (MTT’2004)”. Tomsk: Polytechnic University, 2004. P. 104.
6. **Прангишвили И. В., Абрамова Н. А., Бабичева Е. В., Игнатущенко В. В.** Микроэлектроника и однородные структуры для построения логических и вычислительных устройств. М.: Наука, 1967.
7. **Емельянов С. В., Коровин С. К.** Новые типы обратной связи. М.: Наука, 1997.

*Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники,  
E-mail: stas@iit.tusur.ru*

*Поступила в редакцию  
4 апреля 2005 г.*