

# УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

## УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

### CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

УДК 681.5.01

Кадырова Д. Р.<sup>1</sup>, Кадырова А. А.<sup>2</sup><sup>1</sup>Канд. техн. наук, доцент кафедры «Теоретическая электротехника и электронные технологии» Ташкентского государственного технического университета, Ташкент, Узбекистан<sup>2</sup>Канд. техн. наук, зам. директора Межотраслевого центра стратегических инноваций и информатизации, Ташкент, Узбекистан

### СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРОВ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

В статье рассматривается методика расчета цифровых регуляторов дискретных систем управления с помощью динамических графовых моделей процессов. Предлагаемый метод моделирования позволяет найти пути для решения задач синтеза дискретных систем различной сложности: одномерных и многомерных, стационарных и нестационарных, с нестандартным режимом работы импульсных элементов и др. Решение задач анализа и синтеза сложных систем управления классическими методами оказывается часто несостоятельным из-за вычислительных трудностей. Применение графовых моделей позволяет выполнить четкую и строгую формализацию и автоматизацию вычислительных процедур. Используется фундаментальное свойство дискретных систем, а именно, способность к естественной декомпозиции и структуризации. Любые дискретные элементы в составе систем управления рассматриваются не только как источники дискретизации сигналов, но и как источники дискретизации структуры системы. Предложенный метод позволяет синтезировать законы управления по выбранным критериям оптимальности и максимально близко учитывать характеристики и свойства реальных объектов управления.

**Ключевые слова:** дискретная система управления, структурный синтез, цифровой регулятор, запаздывание, динамическая графовая модель.

#### НОМЕНКЛАТУРА

ГПС – граф переменных состояния;

ДГМ – динамическая графовая модель;

ИЭ – импульсный элемент;

САР – система автоматического регулирования;

 $A_0(p)$  – передаточная функция объекта управления; $a_{ij}$  – коэффициент веса дуги  $(u(jT^+), y(iT))$ ; $B$  – оператор обратной связи по состоянию; $D(z)$  – передаточная функция цифрового регулятора; $e(jT^+)$  – сигнал ошибки; $f(t)$  – входное воздействие; $f^1, f^2$  – входные воздействия; $G(u, r)$  – существенный граф системы; $G_{l-1}(u_{l-1}, r_{l-1})$  –  $(l-1)$ -ый подграф системы; $H_0$  – выходная функция системы; $k_j$  – переменный коэффициент усиления; $l$  – порядок дифференциального уравнения объекта управления; $r_{ij}$  – коэффициенты функции веса приведенной непрерывной части; $t$  – время; $t_{\min}$  – минимальное время переходного процесса; $T$  – период прерывания импульсного элемента; $u$  – управляющее воздействие; $u^1, u^2$  – управляющие воздействия, пропорциональные перемещениям затворов; $\bar{x}(0)$  – начальное состояние объекта; $\bar{x}(mT)$  – переменные состояния объекта; $y$  – выходная функция системы; $y^{(i)}$  –  $(i)$ -ая производная выходной функции системы; $y^1, y^2, H^0$  – выходные функции, соответствующие уровню воды в отдельных каналах; $\beta_{jk}$  – коэффициент обратной связи;

$\Phi$  – отображение;  
 $\tau$  – запаздывание;  
 $\bar{\tau}$  – относительное время запаздывания.

## ВВЕДЕНИЕ

Объекты регулирования ирригационных и водно-энергетических систем описываются, как правило, дифференциальными уравнениями в частных производных, учитывающими такие основные особенности распределенных процессов, как волновая передача расхода воды, изменение инерционности, чистого запаздывания вдоль каналов, влияние отраженных волн на динамику процессов и т.д. Точные решения уравнений имеют обычно сложный громоздкий вид, и их использование для анализа и синтеза систем управления встречает значительные трудности. Поэтому на практике применяют аппроксимацию передаточных функций сложных систем с распределенными параметрами при помощи передаточных функций систем с сосредоточенными параметрами и эквивалентных постоянных времени чистого запаздывания. Наличие запаздывания, как известно, ухудшает устойчивость и динамические свойства процесса [1–4, 6–8]. Вследствие этого одной из первоочередных задач, возникающих при проектировании систем регулирования водными объектами, должна быть задача компенсации вредного влияния запаздывания. Другим важным требованием является уменьшение времени переходных процессов в системе или задача максимального быстрогодействия системы. Увеличение быстрогодействия, в свою очередь, приводит к уменьшению числа необходимых управляющих воздействий и, соответственно, к уменьшению количества срабатываний исполнительных механизмов. Большое значение при проектировании систем регулирования водными объектами имеет подбор параметров системы и управляющих воздействий таким образом, чтобы переходные процессы в системе имели аperiodический характер, так как перерегулирование может привести к холостым сбросам или недобору воды [3].

Таким образом, при проектировании систем автоматического регулирования гидротехническими сооружениями необходимо исходить из следующих требований: обеспечение минимального времени переходного процесса; компенсация влияния запаздывания на характер и устойчивость переходных процессов; аperiodический закон изменения выходной функции системы. Важным фактором является также выбор закона функционирования регуляторов.

Цель данной работы заключается в разработке методики расчета цифровых регуляторов дискретных систем с запаздыванием на основе применения динамических графовых моделей процессов [5].

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе рассматривается дискретная система управления, непрерывная часть которой содержит запаздывание (рис. 1а).

Ставится задача получения в заданной системе с запаздыванием  $\tau$  такого оптимального по быстроддействию процесса на выходе, который отличался бы от процесса в соответствующей системе без запаздывания лишь сдвигом (отставанием) на время  $\tau$ .

## 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Возрастающая сложность систем управления ставит новые задачи, связанные с изучением их структурных свойств; необходимостью систематизации математического описания элементов различной физической природы; унификацией методов расчета, анализа и синтеза; необходимостью преодоления вычислительных трудностей; стремлением к предельной наглядности и простоте.

Особую значимость эти вопросы имеют для дискретных автоматических систем управления. Здесь наличие множества импульсных элементов, которые работают по различным линейным и нелинейным законам; многосвязность; запаздывание вносят разнообразие и сложность в структуру процессов [1–4, 6–11]. В основе математического аппарата дискретных систем положены решетчатые функции, конечные разности и суммы, линейные и нелинейные разностные уравнения. Вместе с тем, в классических работах существенное внимание уделено проблемам «сближения» отдельных аспектов теории непрерывных и дискретных систем. В частности, это касается множества работ, охватывающих частотные методы анализа и синтеза дискретных систем, связи преобразования Лапласа и дискретного преобразования Лапласа и других аспектов [1, 2, 9, 10, 12–14]. Решение задач расчета и проектирования дискретных систем управления на основе применения данных методов требует весьма громоздких и сложных выкладок и преобразований, например, уже при переходе от одномерных к многомерным линейным системам, от синхронно-синфазных к асинхронным системам и т.д. Объясняется это тем, что дискретные системы рассматриваются с позиций «единого целого». При этом каждый новый режим работы импульсных элементов (с циклической частотой квантования информации, многократный, с конечным временем съема данных и др.) требует своей методики с целью преодоления возникающих трудностей.

Главным же ограничением отмеченных выше методов является отсутствие возможности учета фундаментального свойства дискретных систем – способности к естественной декомпозиции и структуризации. Это обстоятельство является прямым следствием того факта, что импульсные элементы, вычислительные устройства с дискретным принципом действия в известных работах других авторов рассматриваются только как источники дискретизации сигналов.

Иной взгляд на физику работы дискретных систем управления говорит о том, что любые дискретные элементы в их составе следует рассматривать не только как источники дискретизации сигналов, но и как источники дискретизации структуры системы. Изображая систему более детально, чем структурная схема, динамические графовые модели сохраняют наглядное представление о прохождении сигнала через систему. Это упрощает определение не только передаточной функции, но и показывает влияние какого-либо параметра на нее, дает возможность получения множества возможных структур и практических рекомендаций по выбору конкретных структур для реализации необходимых связей в системе [5, 15].

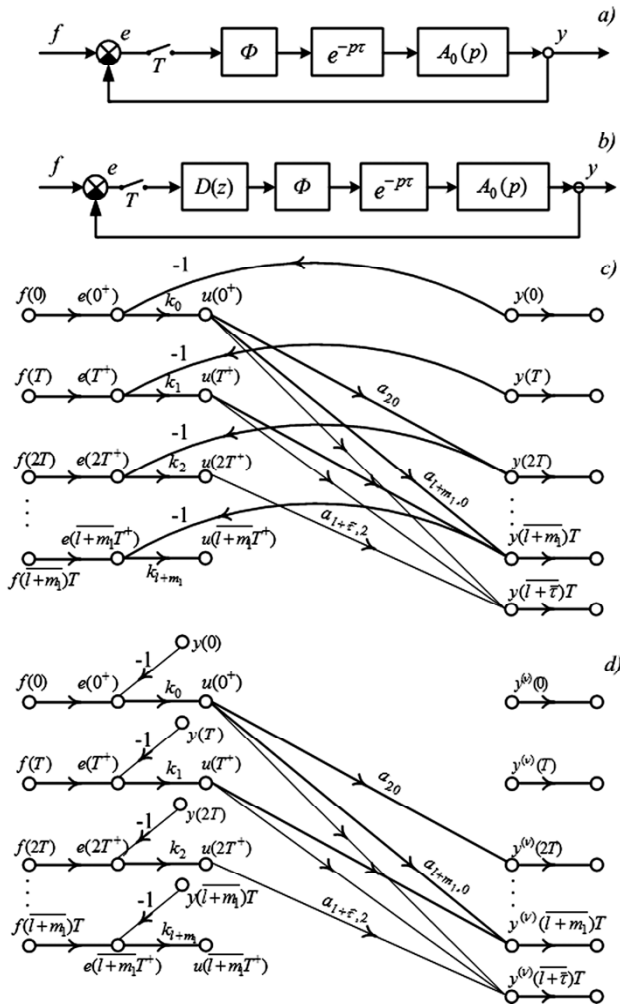


Рисунок 1 – Дискретная система управления а – с запаздыванием, б – схема с последовательной коррекцией, в, д – динамические графовые модели процессов

**2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

Структурная схема компенсированной системы может быть реализована с помощью последовательной коррекции (рис. 1б). Передаточную функцию цифрового регулятора  $D(z)$  будем выбирать, исходя из условия бесконечной степени устойчивости, то есть конечной и минимальной длительности процесса. Последний, кроме этого, должен иметь монотонный (апериодический) характер. Цифровой регулятор представим в виде усилительного элемента с переменным коэффициентом усиления  $k_j$ . Минимальное время переходного процесса в компенсированной системе с запаздыванием равно

$$t_{\min} = (l + \bar{\tau})T. \tag{1}$$

Для получения системы с максимальным быстродействием при входных воздействиях вида ступенчатой функции и нулевых начальных условиях необходимо, чтобы при  $t < (l + \bar{\tau})T$  выход оставался меньше входа и ошибка системы при  $t \geq (l + \bar{\tau})T$  равнялась нулю. Эти условия удовлетворяются, если

$$y(l + \bar{\tau} T) = f(l + \bar{\tau} T), \tag{2}$$

$$\dot{y}(l + \bar{\tau} T) = \dot{y}(l + \bar{\tau} T) = \dots = y^{(l-1)}(l + \bar{\tau} T) = 0. \tag{3}$$

Для определения значений  $k_j$  и  $D(z)$  строим динамические графовые модели выходного процесса и его производных [5]. На рис. 1с,д последние построены для системы  $l$ -го порядка с  $\tau = 2T$ . Объединение подграфа  $G_1(u_1, \varphi_1)$  с вершинами

$$u_1 = \{u(0^+), u(T^+), \dots, u(l - 1T^+), y(l + \bar{\tau} T)\} \tag{4}$$

и отображениями

$$\begin{aligned} \varphi_1 u(0^+) &= \{y(l + \bar{\tau} T)\}, \\ \varphi_1 u(T^+) &= \{y(l + \bar{\tau} T)\}, \\ &\dots \\ \varphi_1 u(l - 1T^+) &= \{y(l + \bar{\tau} T)\}, \end{aligned} \tag{5}$$

подграфа  $G_2(u_2, \varphi_2)$  с вершинами

$$u_2 = \{u(0^+), u(T^+), \dots, u(l - 1T^+), \dot{y}(l + \bar{\tau} T)\} \tag{6}$$

и отображениями

$$\begin{aligned} \varphi_2 u(0^+) &= \{\dot{y}(l + \bar{\tau} T)\}, \\ \varphi_2 u(T^+) &= \{\dot{y}(l + \bar{\tau} T)\}, \\ &\dots \\ \varphi_2 u(l - 1T^+) &= \{\dot{y}(l + \bar{\tau} T)\} \end{aligned} \tag{7}$$

и подграфа  $G_{l-1}(u_{l-1}, \varphi_{l-1})$  с вершинами

$$u_{l-1} = \{u(0^+), u(T^+), \dots, u(l - 1T^+), y^{(l-1)}(l + \bar{\tau} T)\} \tag{8}$$

и отображениями

$$\begin{aligned} \varphi_{l-1} u(0^+) &= \{y^{(l-1)}(l + \bar{\tau} T)\}, \\ \varphi_{l-1} u(T^+) &= \{y^{(l-1)}(l + \bar{\tau} T)\}, \\ &\dots \\ \varphi_{l-1} u(l - 1T^+) &= \{y^{(l-1)}(l + \bar{\tau} T)\} \end{aligned} \tag{9}$$

позволяет получить существенный граф системы

$$G(u, \varphi) = G_1(u_1, \varphi_1) \cup G_2(u_2, \varphi_2) \cup \dots \cup G_{l-1}(u_{l-1}, \varphi_{l-1}) \tag{10}$$

с вершинами

$$u = \{u(0^+), u(T^+), \dots, u(l - 1T^+), y(l + \bar{\tau} T), \dot{y}(l + \bar{\tau} T), \dots, y^{(l-1)}(l + \bar{\tau} T)\} \tag{11}$$

и отображениями

$$\begin{aligned} \varphi u(0^+) &= \{y(l + \bar{\tau} T), \dot{y}(l + \bar{\tau} T), \dots, y^{(l-1)}(l + \bar{\tau} T)\}, \\ \varphi u(T^+) &= \{y(l + \bar{\tau} T), \dot{y}(l + \bar{\tau} T), \dots, y^{(l-1)}(l + \bar{\tau} T)\}, \\ &\dots \\ \varphi u(l - 1T^+) &= \{y(l + \bar{\tau} T), \dot{y}(l + \bar{\tau} T), \dots, y^{(l-1)}(l + \bar{\tau} T)\}. \end{aligned} \tag{12}$$

Полученный граф для случая  $l=3, \tau = 2T$  изображен на рис. 2а. Используя соответствующие преобразования существенного графа (исключение узлов, инвертирование, суммирование и т. д.), получим граф управляющих воздействий (рис. 2б), по виду которого сразу находим значения искомым управляющих воздействий. Далее по виду ДГМ (рис. 1с) находим значения  $y(0), y(T), y(2T), \dots, y(l+m_1T)$  в моменты квантования ИЭ,  $m_1$  – целое число.

Кусочно-постоянные коэффициенты усиления определяются непосредственно по графу, либо по формуле:

$$k_j = \frac{u(jT^+)}{f(jT) - y(jT)}, \quad (j \in J = \{0, 1, 2, \dots, l+m\}). \quad (13)$$

Передаточная функция искомого цифрового регулятора находится как отношение  $z$ -преобразований последовательности управлений и ошибок рассогласования:

$$D(z) = \frac{\sum_{j=0}^{l+m} k_j e^{(jT^+)} z^{-j}}{\sum_{j=0}^{l+m} e^{(jT^+)} z^{-j}}, \quad \text{где } e^{(jT^+)} = f(jT) - y(jT). \quad (14)$$

Полученная передаточная функция цифрового регулятора (14) обеспечивает на выходе системы апериодический процесс конечной и минимальной длительности, отличающийся от процесса в такой же системе без запаздывания лишь сдвигом на время запаздывания  $\tau$ .

В том случае, если за выходную координату системы принято отклонение уровня воды в канале от заданного, можно использовать модификацию ДГМ – граф переменных состояния (ГПС).

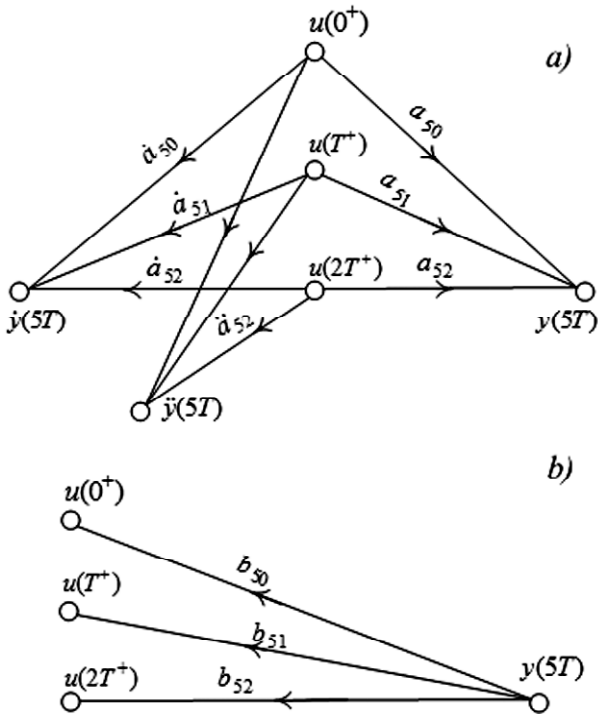


Рисунок 2 – Существенный граф системы (а), граф управляющих воздействий (б)

Пусть начальное состояние процесса характеризуется вектором  $\bar{x}(0) \neq 0$ , то есть отклонением уровня воды от заданного. За положение равновесия системы (рис. 3а) примем начало координат пространства состояний процесса. Требуется перевести объект из начального состояния  $\bar{x}(0)$  в нулевое состояние за минимальное число шагов дискретности при соблюдении условия компенсации влияния запаздывания.

Для нахождения закона управления используем свойство линейного объекта, заключающееся в том, что линейный объект  $l$ -го порядка с запаздыванием  $e^{-p\tau}$  может быть переведен из любого начального состояния  $\bar{x}(0)$  в состояние равновесия за время, равное  $t_{\min} = (l + \bar{\tau})T$ , откуда

$$\bar{x}(l + \bar{\tau}T) = \bar{0}. \quad (15)$$

Для упрощения изложения будем считать, что относительное время запаздывания равно целому числу  $\bar{\tau} = m_1$ , тогда (15) преобразуется к виду:

$$\bar{x}(l + m_1T) = \bar{0}. \quad (16)$$

Построив исходный ГПС рассматриваемого процесса и определив передачи между переменными состояния, развернем граф на интервале времени  $(m_1T; l + m_1T)$  (рис. 3б).

Исключим все промежуточные узлы, соответствующие переменным  $\bar{x}(l+1T), \bar{x}(l+2T), \dots, \bar{x}(l+m_1-1T)$ . Учитывая, что состояние системы до момента  $t = m_1T$  не изменяется, то есть  $\bar{x}(m_1T) = \bar{x}(m_1-1T) = \dots = \bar{x}(0)$ , по-

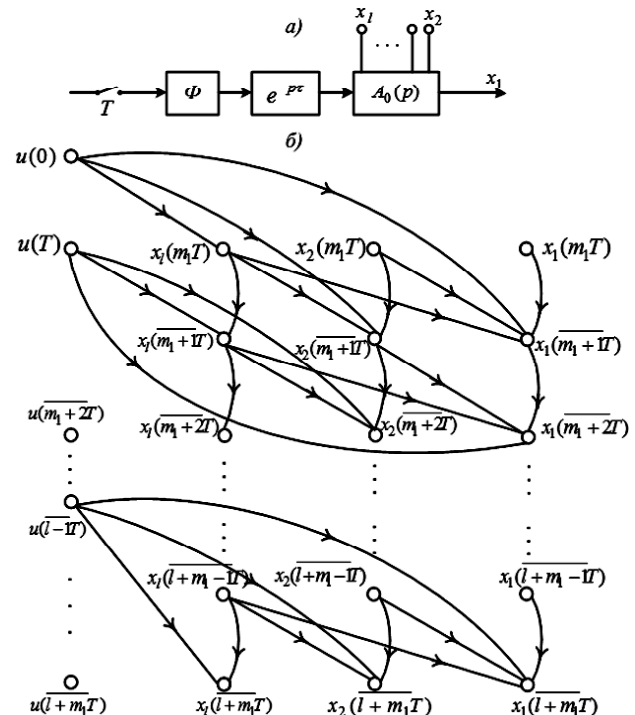


Рисунок 3 – Система управления с запаздыванием (а), граф системы, развернутый на интервале времени  $(m_1T; l + m_1T)$  (б)

лучим существенный граф переменных состояния, представленный на рис. 4а, непосредственно откуда, учитывая (16), можно записать:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_1[\bar{x}(0), u(0), u(T), \dots, u(\overline{l-1T})] &= 0 \\ \varphi_2[\bar{x}(0), u(0), u(T), \dots, u(\overline{l-1T})] &= 0 \\ \dots \dots \dots \\ \varphi_l[\bar{x}(0), u(0), u(T), \dots, u(\overline{l-1T})] &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Преобразуя граф (рис. 4а) таким образом, чтобы получить передачи от переменных начального состояния объекта  $x_1(0), x_2(0), \dots, x_l(0)$  к узлам  $u(0), u(T), u(2T), \dots, u(\overline{l-1T})$ , получим граф управлений (рис. 4б).

По виду последнего находим закон оптимального управления:

$$\left. \begin{aligned} u(0) &= \beta_{11}x_1(0) + \beta_{12}x_2(0) + \dots + \beta_{1l}x_l(0) \\ u(T) &= \beta_{21}x_1(0) + \beta_{22}x_2(0) + \dots + \beta_{2l}x_l(0) \\ \dots \dots \dots \\ u(\overline{l-1T}) &= \beta_{l1}x_1(0) + \beta_{l2}x_2(0) + \dots + \beta_{ll}x_l(0) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Полученная последовательность управляющих воздействий зависит от начального состояния системы  $\bar{x}(0)$ . Коэффициенты  $\beta_{lk}$  ( $l \in L = \{1, 2, \dots, l\}, k \in K = \{1, 2, \dots, l\}$ ) определяются в ходе преобразования существенного графа в граф управлений. Коэффициенты  $\beta_{lk}$  могут быть также найдены из системы алгебраических уравнений

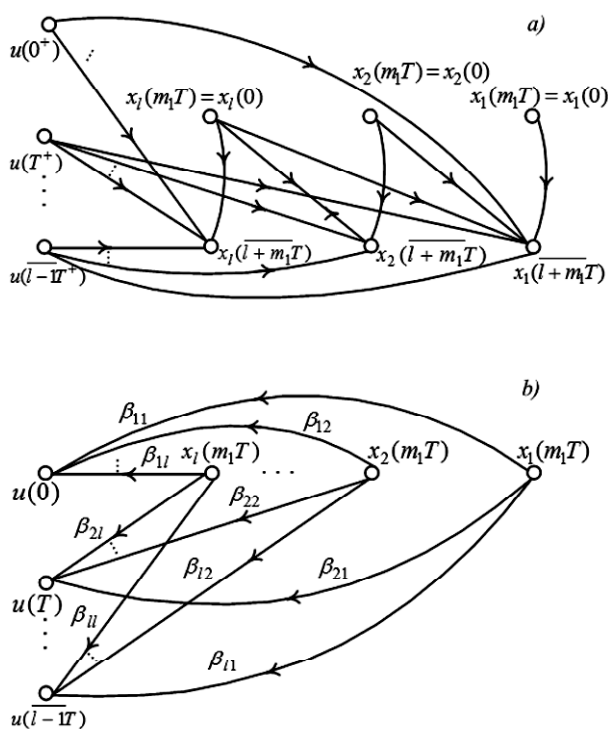


Рисунок 4 – Существенный граф переменных состояния (а), граф управлений (б)

(17). Закон управления в функции текущих состояний объекта можно получить следующим образом. Инвертируем передачи  $x_i(m_1T)/x_j(\overline{l+m_1T})$  и проведем соответствующие преобразования существенного графа, в результате получим граф начального состояния (рис. 5а), откуда можно записать:

$$\left. \begin{aligned} r_{11}u(0) + r_{12}u(T) + \dots + r_{1l}u(\overline{l-1T}) &= x_1(0) \\ r_{21}u(0) + r_{22}u(T) + \dots + r_{2l}u(\overline{l-1T}) &= x_2(0) \\ \dots \dots \dots \\ r_{l1}u(0) + r_{l2}u(T) + \dots + r_{ll}u(\overline{l-1T}) &= x_l(0) \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Решим эту систему линейных алгебраических уравнений или, что то же самое, преобразуем граф (рис. 5а) таким образом, чтобы выразить первое управляющее воздействие  $u(0)$  через  $\bar{x}(0)$ . Знания значения  $u(0)$  достаточно, чтобы перевести объект из начального состояния  $\bar{x}(m_1T) = \bar{x}(0)$  в следующее состояние  $\bar{x}(\overline{m_1+1T})$ . Приняв полученное состояние  $\bar{x}(\overline{m_1+1T})$  за новое начальное состояние системы, повторим решение задачи, т.е. по виду существенного графа для интервала  $(\overline{m_1+1T}; \overline{l+m_1T})$  определим значения второго управляющего воздействия и т.д.

Закон управления при таком подходе представляет собой первое соотношение из системы (18), т.е.

$$u(0) = \beta_{11}x_1(0) + \beta_{12}x_2(0) + \dots + \beta_{1l}x_l(0) \quad (20)$$

Закон управления (20) может быть практически реализован в виде оператора обратной связи (рис. 5б):

$$B = \beta_{11} + \beta_{12}p + \dots + \beta_{1l}p^l \quad (21)$$

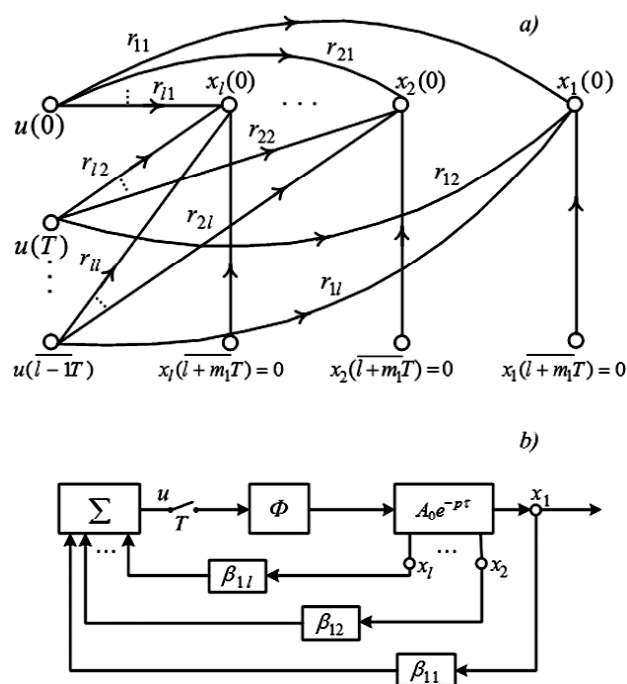


Рисунок 5 – ГПС (а), схема синтезированной системы (б)

### 3 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В качестве примера был произведен расчет оптимальных регуляторов для САР Наиманского узла гидротехнических сооружений (рис. 6а), блок-схема которой представлена в виде трехмерной дискретной системы (рис. 6б). ИЭ<sub>1</sub>, ИЭ<sub>2</sub> работают в синхронно-синфазном режиме с периодом  $T=900$  сек. Передаточная функция многомерного объекта задана в виде:

$$\bar{A}_0(p) = \begin{bmatrix} \frac{0,0484e^{-1,5pT}}{p(858,6p+1)} & \frac{0,872e^{-1,5pT}}{p(1554,6p+1)} \\ \frac{0,0856e^{-1,5pT}}{p(121,3p+1)^2} & \frac{0,0305e^{-1,5pT}}{p(616,5p+1)} \\ \frac{0,0912e^{-1,5pT}}{p(768,8p+1)} & \frac{0,664e^{-1,5pT}}{p(831,5p+1)} \end{bmatrix}$$

Одинаковые запаздывания в отдельных каналах передач обусловлены соответствующим расположением измерительных колодцев в каждом из каналов.

Требовалось найти передаточные функции цифровых регуляторов  $D^1(z), D^2(z)$ , обеспечивающие на выходах системы  $y^1, y^2$  апериодический характер переходных процессов, конечную и минимальную их длительность при условии компенсации вредного влияния запаздывания.

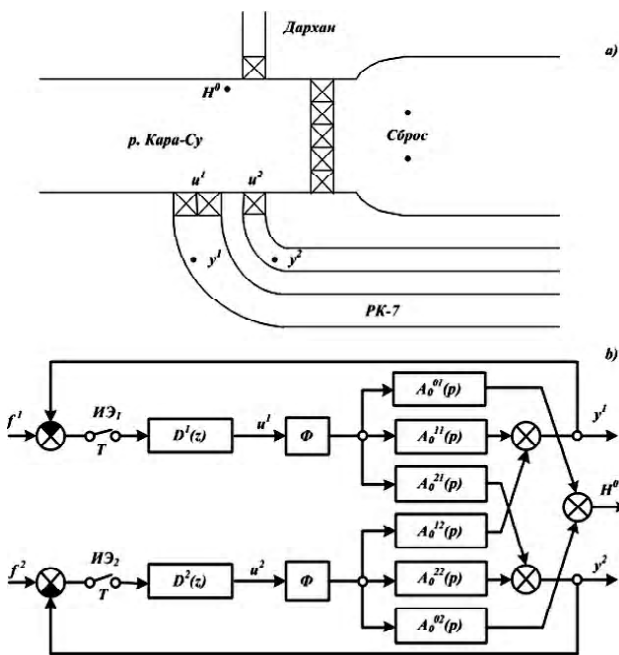


Рисунок 6 – Наиманский узел гидротехнических сооружений (а), блок-схема системы (б)

### 4 РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате решения поставленной задачи методом динамических графовых моделей были найдены коэффициенты усиления и импульсные передаточные функции цифровых регуляторов  $D^1(z), D^2(z)$ :

$$k_0^1 = \frac{u^1(0^+)}{f^1(0) - y^1(0)} = 0,0348; k_0^2 = -0,0246;$$

$$k_1^1 = -0,0254; k_1^2 = 0,0288.$$

$$D^1(z) = \frac{0,0348 - 0,0254z^{-1}}{1 + z^{-1} + 0,965z^{-2} + 0,511z^{-3}};$$

$$D^2(z) = \frac{-0,0246 + 0,0288z^{-1}}{1 + z^{-1} + 0,817z^{-2} + 0,0684z^{-3}}.$$

Полученные передаточные функции позволили получить на выходах  $y^1, y^2$  процессы, заканчивающиеся за два периода прерывания, но сдвинутые относительно оси абсцисс на время запаздывания, равное  $1,5T$  (табл. 1, рис. 7).

### 5 ОБСУЖДЕНИЕ

Построение динамических графовых моделей основывается на разделении длительности основного периода прерывания на ряд интервалов в соответствии с частотами и фазами работы отдельных прерывателей. Это определяет количество, структуру и связи между подграфами, соответствующими отдельным интервалам работы системы. Динамическая графовая модель системы, представляющая собой объединение подграфов, позволяет полностью описать поведение системы на любом промежутке времени.

Задача синтеза в дискретной системе сводится к определению последовательности управляющих воздействий или матрицы обратной связи, исходя из критерия минимума числа шагов, необходимых для перевода

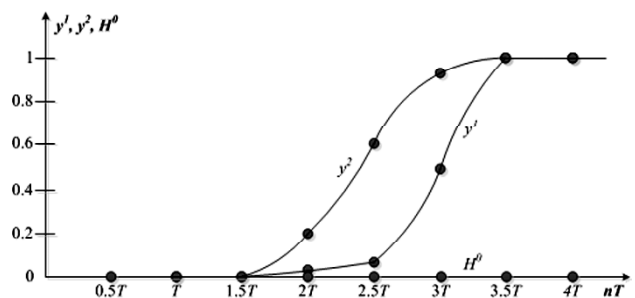


Рисунок 7 – Графики процессов на выходе системы

Таблица 1 – Численные значения выходных функций

$nT$	$0,5T$	$T$	$1,5T$	$2T$	$2,5T$	$3T$	$3,5T$	$4T$
$y^1$	0	0	0	0,0348	0,0615	0,489	1	1
$y^2$	0	0	0	0,182	0,612	0,932	1	1
$H^0$	0	0	0	-0,00038	-0,00051	0,0004	0,00087	0,00046

объекта из заданной начальной точки ограниченного пространства состояния в заданную требуемую область того же пространства. Минимальное необходимое число шагов управления определяет временной интервал, на котором должен быть «развернут» граф. Исключение промежуточных узлов графа позволяет получить рекуррентное матричное уравнение, из которого могут быть получены значения управляющих сигналов или элементов матрицы обратной связи. Этот же граф позволяет исследовать свойства управляемости и наблюдаемости при синтезированном дискретном управлении, мультиустойчивости объекта на временном интервале, возможные пределы быстродействия системы и точности в установившемся режиме.

### ВЫВОДЫ

В работе на базе динамических графов решена задача структурного синтеза регуляторов дискретных систем управления с запаздыванием. Показано, что применение метода динамических графов позволяет легко справиться с таким фактором сложности моделирования систем управления как запаздывание. Наличие инерционности и запаздывания лишь упрощает структуру графа, так как оборачивается исключением соответствующих ветвей.

Научная новизна результатов заключается в дальнейшем развитии метода динамических графов, в разработке алгоритмов синтеза цифровых регуляторов на основе динамических графовых моделей и их модификации – графов переменных состояния. Графовые модели дают возможность рассчитать динамику системы по всем интересующим координатам, синтезировать законы управления по выбранным критериям оптимальности (быстродействия, минимизации ошибки рассогласования, экономичности и др.), так как максимально близко могут учитывать характеристики и свойства реальных объектов управления.

Практическая значимость заключается в решении конкретной задачи расчета оптимальных регуляторов для системы автоматического регулирования Наиманского узла гидротехнических сооружений.

Предлагаемый в работе подход может быть применен и для решения задачи синтеза дискретных систем с переменной частотой прерывания, с кратными синхронизированными и несинхронизированными частотами прерывания, систем с модуляцией импульсов по длительности, частоте, систем с конечной длительностью импульсов и др.

Кадилова Д. Р.<sup>1</sup>, Кадилова А. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, доцент кафедры «Теоретична електротехніка й електронні технології» Ташкентського державного технічного університету, Ташкент, Узбекистан

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, зам. директора Міжгалузевого центру стратегічних інновацій і інформатизації, Ташкент, Узбекистан

### СТРУКТУРНИЙ СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРІВ ДИСКРЕТНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ

У статті розглядається методика розрахунку цифрових регуляторів дискретних систем керування за допомогою динамічних графових моделей процесів. Пропонований метод моделювання дозволяє знайти шляхи для вирішення задач синтезу дискретних систем різної складності: одномірних і багатомірних, стаціонарних і нестаціонарних, з нестандартним режимом роботи імпульсних елементів та ін. Вирішення задач аналізу і синтезу складних систем керування класичними методами виявляється часто неможливим через обчислювальні труднощі. Застосування графових моделей дозволяє виконати чітку і строго формалізовану й автоматизовану обчислювальних процедур. Використовується фундаментальна властивість дискретних систем, а саме, здатність до природної декомпозиції і структуризації. Будь-які дискретні елементи у складі систем керування розглядаються не тільки як джерела дискретизації сигналів, але і як джерела

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках госбюджетной научно-исследовательской темы Ташкентского государственного технического университета «Развитие общей теории дискретных динамических и логико-динамических систем с ЭВМ в контуре управления» (номер государственной регистрации Ф-4-47).

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ту Ю. Современная теория управления / Ю. Ту ; пер. с англ. под ред. В. В. Солодовникова. – М. : Машиностроение, 1971. – 472 с.
2. Кузин Л. Т. Расчет и проектирование дискретных систем управления / Л. Т. Кузин. – М. : Машгиз, 1962. – 684 с.
3. Маковский Э. Э. Автоматизация гидротехнических сооружений в системах каскадного регулирования расходов воды / Э. Э. Маковский. – Фрунзе : Илим, 1972. – 302 с.
4. Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием / Х. Гурецкий. – М. : Машиностроение, 1974. – 328 с.
5. Кадыров А. А. Динамические графовые модели в системах автоматического и автоматизированного управления / А. А. Кадыров. – Ташкент : Фан, 1984. – 238 с.
6. Мирошник И. В. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими объектами / И. В. Мирошник, В. О. Никифоров, А. Л. Фрадков. – СПб. : Наука, 2000. – 549 с.
7. Пыркин А. А. Адаптивный алгоритм компенсации параметрически неопределенного смещенного гармонического возмущения для линейного объекта с запаздыванием в канале управления / А. А. Пыркин // Автоматика и телемеханика. – 2010. – № 8. – С. 62–78.
8. Лапето А. В. Анализ методов синтеза систем автоматического управления с запаздыванием / А. В. Лапето // Труды БГТУ. – 2011. – № 6. – С. 78–80. – (Серия «Физ.-мат. науки и информатика»).
9. Фомин В. Н. Методы управления линейными дискретными объектами / В. Н. Фомин. – Л. : ЛГУ, 1985. – 336 с.
10. Волгин Л. Н. Оптимальное дискретное управление динамическими системами / Л. Н. Волгин. – М. : Наука, 1986. – 239 с.
11. Матросов В. М. Нелинейная теория управления: динамика, управление, оптимизация / Под ред. В. М. Матросова, С. Н. Васильева, А. И. Москаленко. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 352 с.
12. Hou L. Unifying theory for stability of continuous, discontinuous, and discrete-time dynamical systems / L. Hou, A. N. Michel // Nonlinear Analysis : Hybrid Systems. – 2007. – Vol. 1, № 2. – P. 154–172.
13. Goebel R. Hybrid Dynamical Systems / R. Goebel, R. G. Sanfelice, A. R. Teel. – Princeton University Press, 2012. – 227 p.
14. Control and Estimation of Hybrid Systems with Mathematical Optimization : thesis ... doctor sc. techn. / D. Mignone. – Zurich : the Swiss Federal Institute of Technology (ETH), 2002. – 320 p.
15. Кадырова А. А. Методы моделирования и исследования нелинейных и логико-динамических систем управления / А. А. Кадырова. – Ташкент : Янги аср авлоди, 2010. – 186 с.

Статья поступила в редакцию 16.06.2016.

После доработки 03.07.2016.

дискретизації структури системи. Запропонований метод дозволяє синтезувати закони керування за обраними критеріями оптимальності і максимально близько враховувати характеристики і властивості реальних об'єктів керування.

**Ключові слова:** дискретна система керування, структурний синтез, цифровий регулятор, запізнювання, динамічна графова модель.

Kadirova D. R.<sup>1</sup>, Kadirova A. A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>PhD, Associate Professor of Theoretical Electrical Engineering and Electronic Technologies Department, Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan

<sup>2</sup>PhD, Deputy Director of Center for Strategic Innovations and Informatization, Tashkent, Uzbekistan

### STRUCTURAL SYNTHESIS OF DISCRETE CONTROL SYSTEMS CONTROLLERS

The discrete digital controllers reckoning technique is the subject of this article with the aid of processes dynamic graph models. The proposed modeling technique allows to determine the ways for tasks solutions in terms of discrete systems analysis and synthesis of various complication: one-dimensional and multidimensional, steady and unstable, with the pulse elements abnormal operating mode and others. An often complex control systems analysis and synthesis task solution, via classical approach comes out to be insolvent, because of the computational problems. The application of graph models allows to perform clear and strict characterization and computer procedures automation. Here is useful the discrete systems fundamental property, and in particular, the ability for intrinsic decomposition and structurization. Any discrete elements of control system we consider not only as sources of the signal discretization, but also as discretization sources of the system structure. Suggested technique allows to synthesize control laws to be constructed with the respect to the criteria of optimality drawn as well as at the most close to be based on characteristic properties and real-world control objects features.

**Keywords:** discrete system, structure synthesis, digital controller, delay, dynamical graph model.

### REFERENCES

1. Tu Ju.; per. s angl. pod red. V. V. Solodovnikova. *Sovremennaja teorija upravlenija*. Moscow, Mashinostroenie, 1971, 472 p.
2. Kuzin L. T. *Raschet i proektirovanie diskretnyh sistem upravlenija*. Moscow, Mashgiz, 1962, 684 p.
3. Makovskij Je. Je. *Avtomatizacija gidrotehnicheskikh sooruzhenij v sistemah kaskadnogo regulirovanija rashodov vody*. Frunze, Ilim, 1972, 302 p.
4. Gureckij H. *Analiz i sintez sistem upravlenija s zapazdyvaniem*. Moscow, Mashinostroenie, 1974, 328 p.
5. Kadirov A. A. *Dinamicheskie grafovyje modeli v sistemah avtomaticheskogo i avtomatizirovannogo upravlenija*. Tashkent, Fan, 1984, 238 p.
6. Miroshnik I. V., Nikiforov V. O., Fradkov A. L. *Nelinejnoe i adaptivnoe upravlenie slozhnymi dinamicheskimi ob'ektami*. Sankt-Peterburg, Nauka, 2000, 549 p.
7. Pyrkin A. A. *Adaptivnyj algoritm kompensacii parametricheski neopredeljonogo smeshhennogo garmonicheskogo vozmushhenija dlja linejnogo ob'ekta s zapazdyvaniem v kanale upravlenija*, *Avtomatika i telemekhanika*, 2010, No. 8, pp. 62–78.
8. Lapeto A. V. *Analiz metodov sinteza sistem avtomaticheskogo upravlenija s zapazdyvaniem*, *Trudy BGTU*, 2011, No. 6, pp. 78–80. – (Serija «Fiz.-mat. nauki i informatika»).
9. Fomin V. N. *Metody upravlenija linejnymi diskretnymi ob'ektami*. Leningrad, LGU, 1985, 336 p.
10. Volgin L. N. *Optimal'noe diskretnoe upravlenie dinamicheskimi sistemami*. Moscow, Nauka, 1986, 239 p.
11. Matrosov V. M., Vasil'ev S. N., Moskalenko A. I. *Nelinejnaja teorija upravlenija: dinamika, upravlenie, optimizacija*. Moscow, FIZMATLIT, 2003, 352 p.
12. Hou L., Michel A. N. *Unifying theory for stability of continuous, discontinuous, and discrete-time dynamical systems*, *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, 2007, Vol. 1, No. 2, pp. 154–172.
13. Goebel R., Sanfelice R. G., Teel A. R. *Hybrid Dynamical Systems*. Princeton University Press, 2012, 227 p.
14. Mignone D. *Control and Estimation of Hybrid Systems with Mathematical Optimization*: thesis ... doctor sc. techn. Zurich: the Swiss Federal Institute of Technology (ETH), 2002, 320 p.
15. Kadirova A. A. *Metody modelirovanija i issledovanija nelinejnyh i logiko-dinamicheskikh sistem upravlenija*. Tashkent, Jangi asr avlodi, 2010, 186 p.