



DOI: <https://doi.org/10.15688/NBIT.jvolsu.2018.2.2>

УДК 681.5

ББК 32.965

## ГРАФОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИМПУЛЬСНЫХ СИСТЕМ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

**Аманулла Азизович Кадыров**

Доктор технических наук, профессор,  
директор Межотраслевого центра стратегических инноваций и информатизации  
amanulla.kadirov@innovation.uz  
ул. Университетская, 2, офис 214, 100095 г. Ташкент, Узбекистан

**Азиза Амануллаевна Кадырова**

Кандидат технических наук,  
заместитель директора Межотраслевого центра стратегических инноваций и информатизации  
aziza.kaa@innovation.uz, aziza.kaa@mail.ru  
ул. Университетская, 2, офис 214, 100095 г. Ташкент, Узбекистан

**Аннотация.** В металлургии, теплоэнергетике, ирригации, химической, нефтегазовой и других отраслях широко используются импульсные системы. Периодический характер работы дискретных управляющих устройств является причиной возникновения чистого запаздывания в каналах регулирования. Методы исследования линейных импульсных систем с запаздыванием при синхронно-синфазных режимах работы дискретных устройств разработаны с достаточной полнотой. Вместе с тем методы моделирования и исследования разнотемповых, многомерных, нелинейных импульсных систем с запаздыванием требуют своего дальнейшего развития. В статье предлагается метод моделирования импульсных систем с запаздыванием на базе динамических графов.

**Ключевые слова:** импульсная система, запаздывание, дискретность, моделирование процессов, динамический граф.

© Кадыров А.А., Кадырова А.А., 2018

Рассмотрим вначале моделирование процессов на базе динамических графов для одномерных систем [1; 3–10], в которых объект управления представлен в виде динамического звена  $l$ -го порядка с запаздыванием (см. рис. 1, а). В зависимости от величины запаздывания могут представиться следующие случаи:

1)  $\theta = mT + \tau$ , 2)  $\theta = mT$ , 3)  $\theta = \tau$ ,

где  $T$  – период повторения импульсного элемента,  $\tau$  – запаздывание,  $m$  – целое,  $0 < \tau < T$ .

При построении графовой модели будем исходить из общего случая, когда запаздывание равно  $\theta = mT + \tau$ . С учетом величины запаздывания выделим подграфы обратной связи  $G_{loc} = (X', X'', V)$ ,

где

$$\begin{aligned} X' &= \{x_1(\overline{m+1T})\}, \\ X'' &= \{x_1[2(\overline{m+1T})], \dots, x_l[2(\overline{m+1T})]\} \vee \\ &\vee \{x_1[2(\overline{m+1T}) + \tau], \dots, x_l[2(\overline{m+1T}) + \tau]\}, \\ \forall v \in V[\underline{\diamond} = c_{ij}(T) \vee c_{ij}(T - \tau)], \end{aligned}$$

подграфы процесса  $G_{t_{np}} = (X', X'', V)$ ,

где

$$X' = \{x_1(\overline{m+1T}), \dots, x_l(\overline{m+1T})\},$$

$$X'' = \{x_1(\overline{m+1T} + \tau), \dots, x_l(\overline{m+1T} + \tau)\} \vee$$

$$\vee \{x_1(\overline{m+2T}), \dots, x_l(\overline{m+2T})\},$$

$$\forall v \in V[\underline{\diamond} = a_{ij}(T) \vee a_{ij}(T - \tau)],$$

$$X' = \{f(0)\},$$

$$X'' = \{x_1(\overline{m+1T}), \dots, x_l(\overline{m+1T})\} \vee$$

$$\vee \{x_1(\overline{m+1T} + \tau), \dots, x_l(\overline{m+1T} + \tau)\},$$

$$\forall v \in V[\underline{\diamond} = b_{ij}(T - \tau) \vee b_{ij}(T)].$$

подграфы входного воздействия  $G_{t_{ex}} = (X', X'', V)$ ,

В выделенных подграфах (рис. 1, б-г) можно увидеть особенности формирования их структуры и передач. Для получения графа

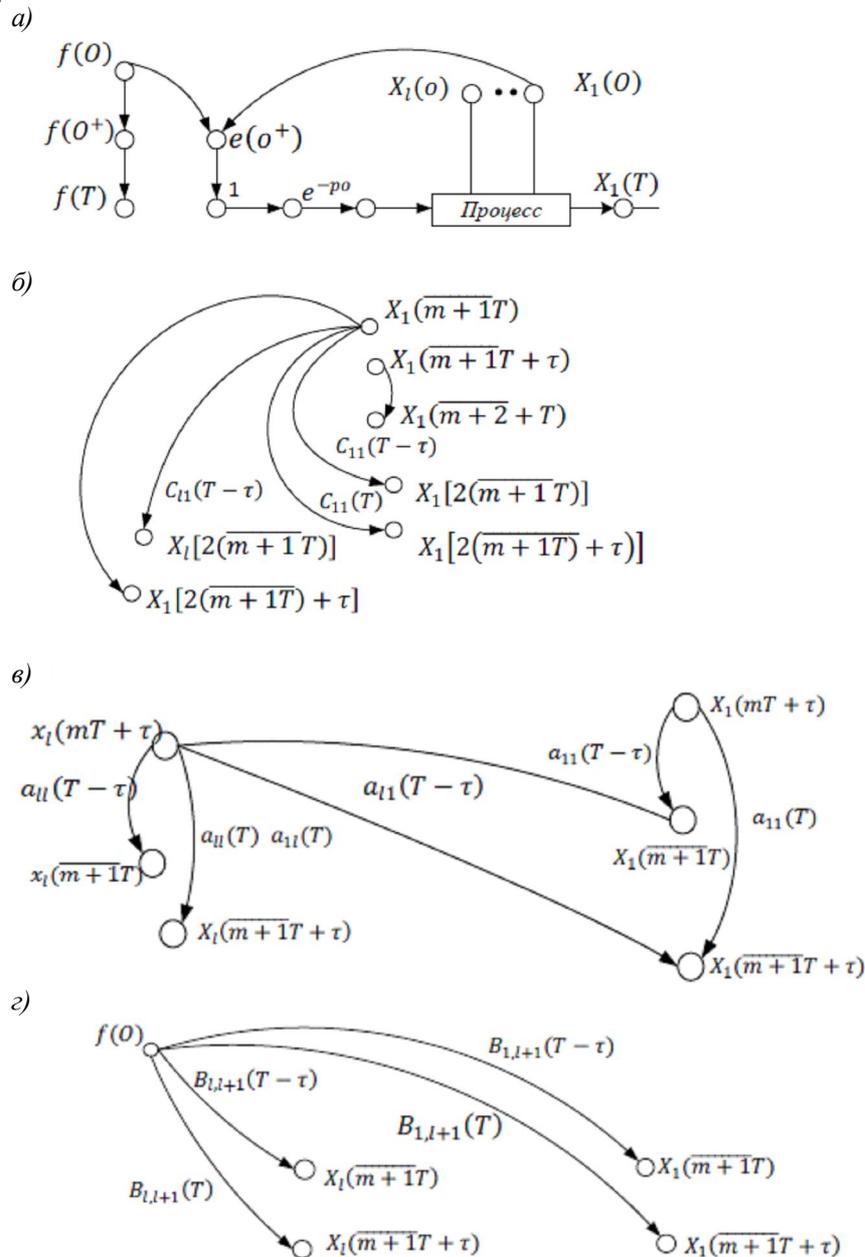


Рис. 1. Макроструктура импульсной системы с запаздыванием (а), подграфы динамических графов импульсной системы с запаздыванием (б, в, г)

системы (рис. 1, а) достаточно взять объединение подграфов, то есть

$$G_t = G_{t_{\text{ex}}} \cup G_{t_{\text{np}}} \cup G_{t_{\text{oc}}} \quad (1)$$

Так, на рисунке 2 показаны графовые модели для систем с различными значениями запаздываний при  $l=2$ .

Из анализа структуры графовых моделей выводятся эффективные в вычислительном отношении уравнения динамических процессов импульсных систем с запаздыванием.

Например, для системы с запаздыванием  $\theta = \tau$  (рис. 2, а) уравнения процессов имеют вид

$$\begin{aligned} \dot{x}(nT) = & \dot{A}(T-\tau)x(\overline{n-1T}+\tau) + \\ & + \dot{B}(T-\tau)f(\overline{n-1T}) + \dot{C}(T-\tau)x_1(\overline{n-1T}), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}(nT+\tau) = & \dot{A}(T)x(\overline{n-1T}+\tau) + \\ & + \dot{B}(T)f(\overline{n-1T}) + \dot{C}(T)x_1(\overline{n-1T}). \end{aligned} \quad (3)$$

Аналогично для системы с запаздыванием (см. рис. 3) уравнения динамических

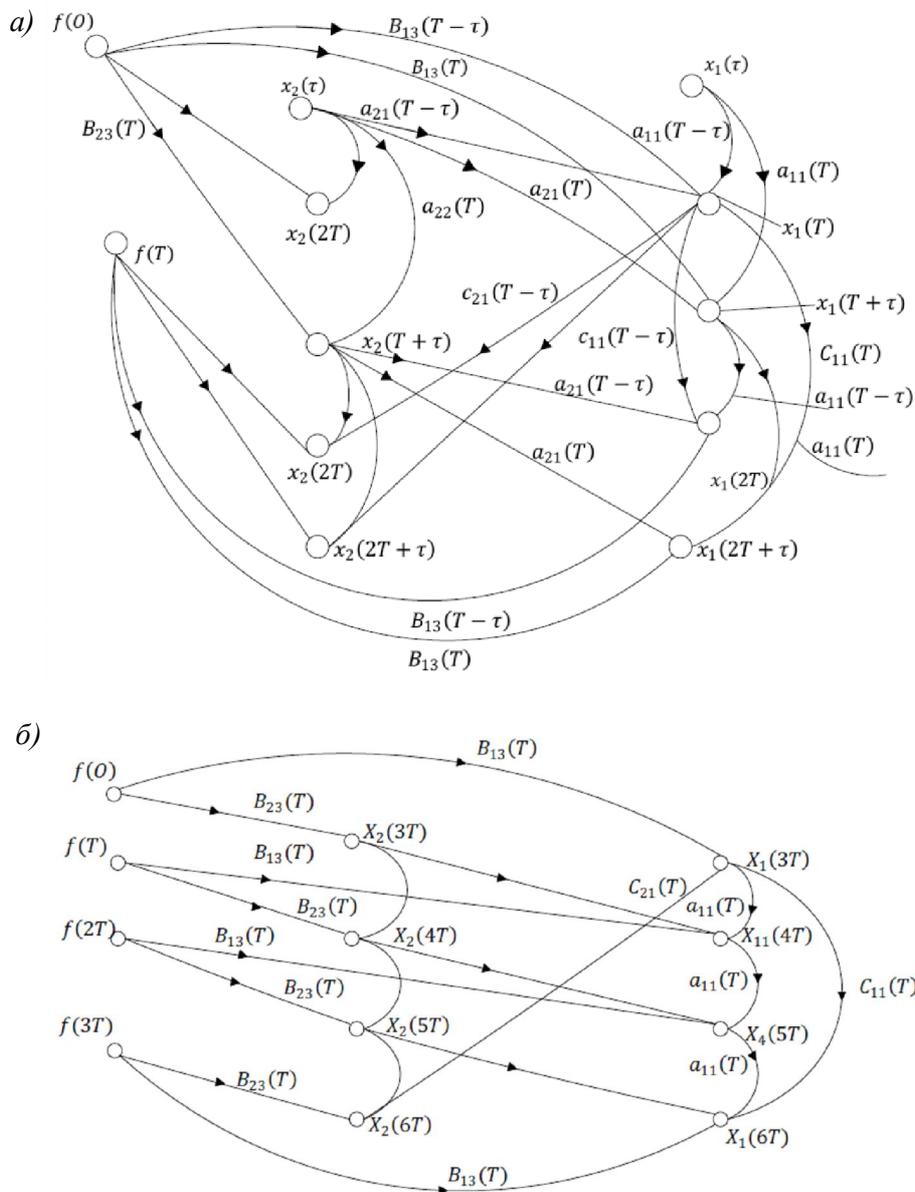


Рис. 2. Граф импульсной системы с запаздыванием  $\theta = \tau, l = 2$  (а), граф импульсной системы с запаздыванием  $\theta = mT, l = 2, m = 2$  (б)

процессов получены непосредственно из графовой модели и имеют вид

$$\begin{aligned} \overset{P}{x}(nT) = & \overset{P}{A}(T-\tau)\overset{P}{x}(\overline{n-1T+\tau}) + \\ & + \overset{P}{B}(T-\tau)f(\overline{n-\theta^*T}) + \overset{P}{C}(T-\tau)x_1(\overline{n-\theta^*T}), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \overset{P}{x}(nT+\tau) = & \overset{P}{A}(T)\overset{P}{x}(\overline{n-1T+\tau}) + \\ & + \overset{P}{B}(T)f(\overline{n-\theta^*T}) + \overset{P}{C}(T)x_1(\overline{n-\theta^*T}), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\theta^*(m+1)T = \overline{m+1}$ , (6)

$$\overset{P}{x}(0) = \overset{P}{x}(T) = \dots = \overset{P}{x}(\theta) = \overset{P}{b}. \quad (7)$$

Для последнего случая равнение процессов принимает вид

$$\begin{aligned} \overset{P}{x}(nT) = & \overset{P}{A}(T)\overset{P}{x}(\overline{n-1T}) + \\ & + \overset{P}{B}(T)f(\overline{n-\theta^*T}) + \overset{P}{C}(T)x_1(\overline{n-\theta^*T}) \end{aligned} \quad (8)$$

Матрицы  $\overset{P}{A}$ ,  $\overset{P}{B}$ ,  $\overset{P}{C}$  в уравнениях (2–8) имеют размерности  $l \times l, l \times 1, l \times 1$ , где  $l$  – порядок дифференциального уравнения непрерыв-

ной части системы. Смысл элементов этих матриц ясен из рисунка 1, б–г.

### Моделирование многомерных импульсных систем с запаздыванием

В многомерной системе модель каждого сепаратного или перекрестного канала представляет собой граф одномерной импульсной системы наподобие графов, изображенных, например, на рисунке 2. Для определенности порядка моделирования поясним на примере двумерной дискретной системы с запаздыванием (см. рис. 4, а).

Для компактности изображения в многомерных системах целесообразно использовать граф-векторы каналов передач с учетом их взаимных связей, определяемых через сигналы ошибок. Дуги графа-вектора в отличие от развернутых графов взвешены матрицами, а к каждой вершине (за исключением вершин, соответствующих ошибкам) ставится в соответствии вектор-столбец переменных состо-

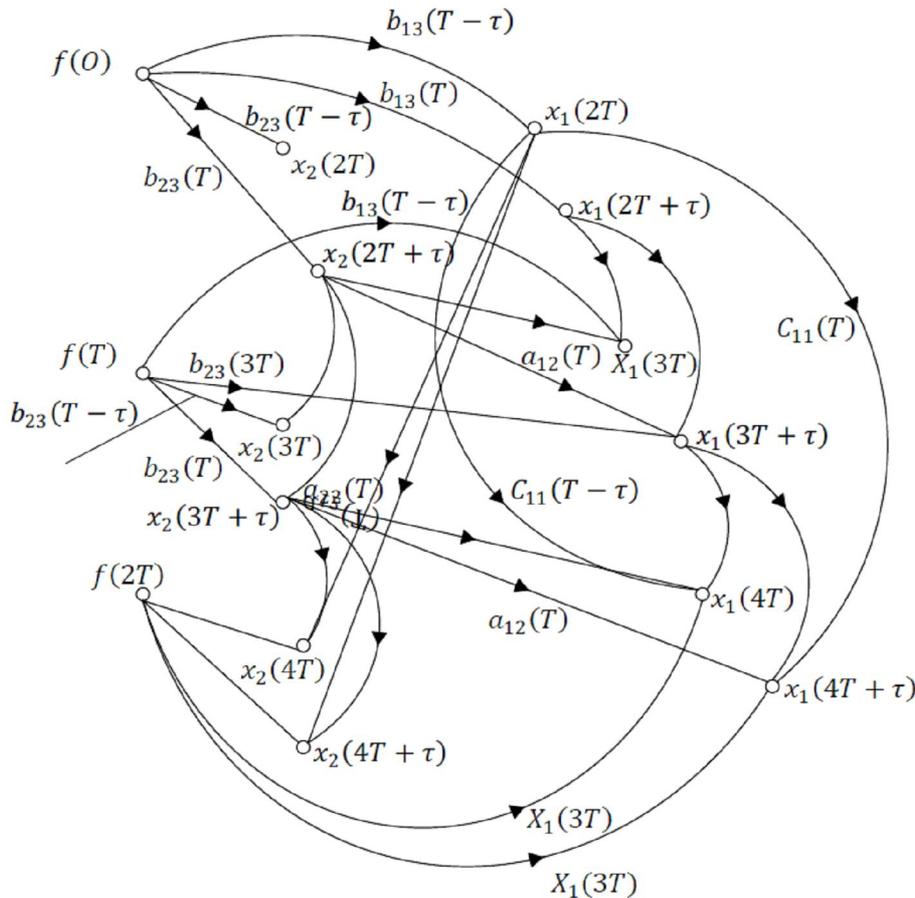


Рис. 3. Граф импульсной системы с запаздыванием  $\theta = mT + \tau, m = 1, l = 2$

яний. С учетом этих замечаний графовая модель рассматриваемой двумерной системы будет состоять из двух векторных компонентов связности, представленных на рисунке 2, б. Для случая  $\theta = T + \tau$ ,  $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ , режим работы импульсных элементов – синхронно-синфазный.

Из рисунка 4, б можно получить выражения для расчета процессов

$$\bar{x}^1(nT) = \bar{A}^1(T - \tau) \bar{x}^1(\overline{n-1}T + \tau) + \bar{B}^1(T - \tau) e^1(\overline{n-\theta^*}T) \quad , \quad (9)$$

$$\bar{x}^1(nT + \tau) = \bar{A}^1(T) \bar{x}^1(\overline{n-1}T + \tau) + \bar{B}^1(T) e^1(\overline{n-\theta^*}T) \quad , \quad (10)$$

$$\bar{x}^{12}(nT) = \bar{A}^{12}(T - \tau) \bar{x}^{12}(\overline{n-1}T + \tau) + \bar{B}^{12}(T - \tau) e^2(\overline{n-\theta^*}T) \quad , \quad (11)$$

$$\bar{x}^{12}(nT + \tau) = \bar{A}^{12}(T) \bar{x}^{12}(\overline{n-1}T + \tau) + \bar{B}^{12}(T) e^2(\overline{n-\theta^*}T) \quad , \quad (12)$$

$$\bar{x}^2(nT) = \bar{A}^2(T - \tau) \bar{x}^2(\overline{n-1}T + \tau) + \bar{B}^2(T - \tau) e^2(\overline{n-\theta^*}T) \quad , \quad (13)$$

$$\bar{x}^2(nT + \tau) = \bar{A}^2(T) \bar{x}^2(\overline{n-1}T + \tau) + \bar{B}^2(T) e^2(\overline{n-\theta^*}T) \quad , \quad (14)$$

$$\bar{x}^{21}(nT) = \bar{A}^{21}(T - \tau) \bar{x}^{21}(\overline{n-1}T + \tau) + \bar{B}^{21}(T - \tau) e^1(\overline{n-\theta^*}T) \quad , \quad (15)$$

$$\bar{x}^{21}(nT + \tau) = \bar{A}^{21}(T) \bar{x}^{21}(\overline{n-1}T + \tau) + \bar{B}^{21}(T) e^1(\overline{n-\theta^*}T) \quad . \quad (16)$$

Выходные координаты системы  $x_1^{r(rk)}, x_2^{r(rk)}$  ( $r, k = 1, 2$ ) определяются на основе (9–16) следующим образом:

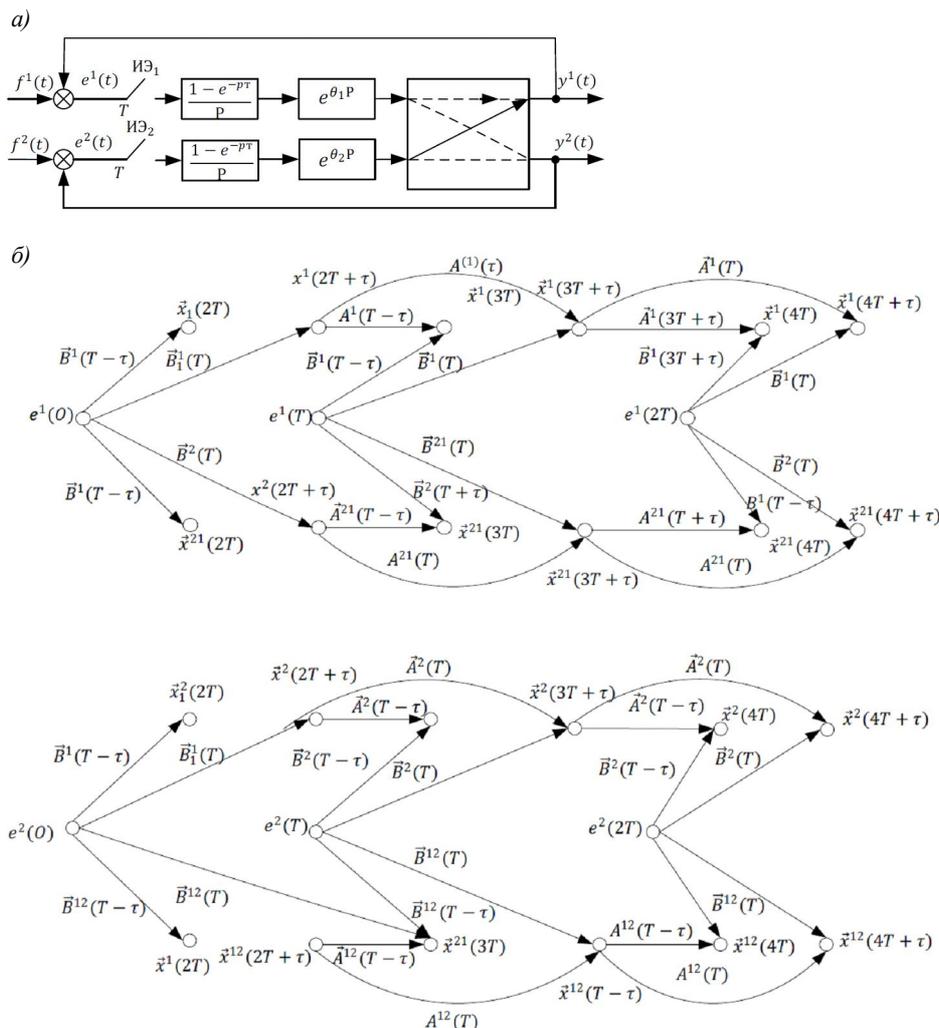


Рис. 4. Двумерная дискретная система с запаздыванием (а), графовая модель процессов (б)

$$y^1(nT) = x_1^1(nT) + x_1^{12}(nT), \quad (17)$$

$$y^1(nT + \tau) = x_1^1(nT + \tau) + x_1^{12}(nT + \tau), \quad (18)$$

$$y^2(nT) = x_1^{12}(nT) + x_1^{21}(nT), \quad (19)$$

$$y^2(nT + \tau) = x_1^2(nT + \tau) + x_1^{21}(nT + \tau),$$

$$x_1^1(nT) \in \overline{x^1}(nT), x_1^{12}(nT) \in \overline{x^{12}}(nT), \quad (20)$$

$$x_1^2(nT) \in \overline{x^2}(nT), x_1^{21}(nT) \in \overline{x^{21}}(nT).$$

Для общего случая  $N$ -мерной системы применим переменную состояния  $x_1^{r(k)}$  ( $r, k = 1, 2, \dots, N$ ) за выходную величину соответствующего сепаратного ( $r$ ) или перекрестного ( $rk$ ) канала. Рекуррентные соотношения для расчета процессов  $N$ -мерной синхронно-синфазной системы с ненулевыми начальными условиями получены в следующем виде:

**Первый случай:**

$$\theta = mT + \tau, \quad m = 1, 2, \dots; \quad 0 < \tau < T.$$

Для моментов  $iT, iT + \tau, i = 0, 1, \dots$

$$\mathcal{X}^r(iT) = \check{A}^r(T) \mathcal{X}^r(i - 1T), \quad (21)$$

$$\mathcal{X}^r(iT + \tau) = \check{A}^r(\tau) \mathcal{X}^r(iT), \quad (22)$$

$$\mathcal{X}^{rk}(iT) = \check{A}^{rk}(T) \mathcal{X}^{rk}(i - 1T), \quad (23)$$

$$\mathcal{X}^{rk}(iT + \tau) = \check{A}^{rk}(\tau) \mathcal{X}^{rk}(iT). \quad (24)$$

Для моментов  $n = i > m$

$$\mathcal{X}^r(nT) = \check{A}^r(T - \tau) \mathcal{X}^r(\overline{n - 1T} + \tau) + \mathcal{B}^r(T - \tau) e^r(\overline{n - \theta^*T}), \quad (25)$$

$$\mathcal{X}^r(nT + \tau) = \check{A}^r(T) \mathcal{X}^r(\overline{n - 1T} + \tau) + \mathcal{B}^r(T) e^r(\overline{n - \theta^*T}), \quad (26)$$

$$\mathcal{X}^{rk}(nT) = \check{A}^{rk}(T - \tau) \mathcal{X}^{rk}(\overline{n - 1T} + \tau) + \mathcal{B}^{rk}(T - \tau) e^r(\overline{n - \theta^*T}), \quad (27)$$

$$\mathcal{X}^{rk}(nT + \tau) = \check{A}^{rk}(T) \mathcal{X}^{rk}(\overline{n - 1T} + \tau) + \mathcal{B}^{rk}(T) e^r(\overline{n - \theta^*T}), \quad (28)$$

$$y^r(nT) = x_1^r(nT) + \sum_{k=1(k \neq r)}^N x_1^{rk}(nT), \quad (29)$$

$$y^r(nT + \tau) = x_1^r(nT + \tau) + \sum_{k=1(k \neq r)}^N x_1^{rk}(nT + \tau),$$

$$x_1^r(nT) \in \mathcal{X}^r(nT), x_1^{rk}(nT) \in \mathcal{X}^{rk}(nT). \quad (30)$$

**Второй случай:**  $\theta = mT, m = 1, 2, \dots$

Для моментов  $i = 1, 2, \dots, m$

$$\mathcal{X}^r(iT) = \check{A}^r(T) \mathcal{X}^r(i - 1T), \quad (31)$$

$$\mathcal{X}^{rk}(iT) = \check{A}^{rk}(T) \mathcal{X}^{rk}(i - 1T), \quad (32)$$

для моментов  $n = i > m$

$$\mathcal{X}^r(nT) = \check{A}^r(T) \mathcal{X}^r(\overline{n - 1T}) + \mathcal{B}^r(T) e^r(\overline{n - \theta^*T}), \quad (33)$$

$$\mathcal{X}^{rk}(nT) = \check{A}^{rk}(T) \mathcal{X}^{rk}(\overline{n - 1T}) + \mathcal{B}^{rk}(T) e^r(\overline{n - \theta^*T}). \quad (34)$$

Выходные переменные  $y^r(nT), y^r(nT + \tau)$  определяются согласно (29), (30).

**Третий случай:**  $\theta = \tau, 0 < \tau < T.$

Для момента  $\tau$

$$\mathcal{X}^r(\tau) = \check{A}^r(\tau) \mathcal{X}^r(0), \quad (35)$$

$$\mathcal{X}^{rk}(\tau) = \check{A}^{rk}(\tau) \mathcal{X}^{rk}(0), \quad (36)$$

для моментов  $n = 1, 2, \dots$

$$\mathcal{X}^r(nT) = \check{A}^r(T - \tau) \mathcal{X}^r(\overline{n - 1T} + \tau) + \mathcal{B}^r(T - \tau) e^r(\overline{n - 1T}), \quad (37)$$

$$\mathcal{X}^r(nT + \tau) = \check{A}^r(T) \mathcal{X}^r(\overline{n - 1T} + \tau) + \mathcal{B}^r(T) e^r(\overline{n - 1T}), \quad (38)$$

$$\mathcal{X}^{rk}(nT) = \check{A}^{rk}(T - \tau) \mathcal{X}^{rk}(\overline{n - 1T} + \tau) + \mathcal{B}^{rk}(T - \tau) e^r(\overline{n - 1T}), \quad (39)$$

$$\mathcal{X}^{rk}(nT + \tau) = \check{A}^{rk}(T) \mathcal{X}^{rk}(\overline{n - 1T} + \tau) + \mathcal{B}^{rk}(T) e^r(\overline{n - 1T}). \quad (40)$$

На иллюстративном примере одномерной системы дадим сравнительный анализ использования для расчета динамических процессов предложенного метода и традиционного метода, основанного на использовании модифицированного  $z$ -преобразования [2].

**Пример**

Рассмотрим одномерную систему с чистым запаздыванием, изображенную на рисунке 5. Входное воздействие  $f(t) = 1(t)$ , период повторения импульсного элемента  $T = 1$  сек, запазды-

вание  $\theta = T + \tau = 1 + 0,25$ . Объект описывается передаточной функцией  $W(p) = 1/(p + 1)$ ,  $T = 1$ . Требуется рассчитать выходной процесс  $x(t)$ .

**Расчет переходного процесса методом модифицированного z-преобразования**

$$W_1^*(z, m) = z^{-1}W^*(z, m) = z^{-1}Z_m \left[ \frac{1 - e^{-Tp}}{p(p + 1)} \right] \quad (41)$$

Из таблиц определяем  $W_1^*(z, m)$ :

$$W_1^*(z, m) = \frac{z - 1}{z^2} \left( \frac{1}{z - 1} - \frac{e^{-m}}{z - 0,368} \right) \quad (42)$$

Соответствующее z-преобразование записывается следующим образом:

$$W_1^*(z) = W_1^*(z, m) \Big|_{m=1-\delta} = W_1^*(z, m) \Big|_{m=0,75} = \frac{z - 1}{z^2} \left( \frac{1}{z - 1} - \frac{0,473}{z - 0,368} \right) \quad (43)$$

Модифицированное z-преобразование выходной величины при ступенчатом входном сигнале дается выражением

$$X^*(z, m) = R^*(z) \frac{W_1^*(z, m)}{1 + W_1^*(z)} = \frac{z}{z - 1} \left( \frac{z - 0,368 - e^{-m} + e^{-m}}{z^3 - 0,368z^2 + 0,527z + 0,105} \right) \quad (44)$$

Сама выходная величина равна

$$x(n, m)T = \frac{1}{2\pi j} \int_{\gamma} \frac{z(1 - e^{-m}) + e^{-m} - 0,368}{(z - 1)(z + 0,17)(z - 0,269 + j0,74)(z - 0,269 - j0,74)} z^n dz \quad (45)$$

Вычисление этого интеграла с помощью метода вычетов приводит к следующему результату:

$$x(n, m)T = 0,5 + (0,63 - 1,37e^{-m})(-0,17)^n + 1,35(-0,787)^{n+1}(1 - e^{-m}) \cos[(n + 1)70^\circ + 76^\circ] + 1,52(0,787)^n(e^{-m} - 0,368) \cos(n \cdot 70^\circ + 76^\circ), \quad (46)$$

$t = (n - m_\delta + m)$ ,  $0 \leq m \leq 1$ ,  $m_\delta = 1 - \delta = 0,75$ .

График этой функции приведен на рисунке 6.

**Расчет переходного процесса графо-динамическим методом**

Учитывая величину запаздывания, воспользуемся соотношениями (4), (5). В итоге получим следующие значения:

$$\begin{aligned} x(T) &= 0; \quad x(1,25T) = 0; \\ x(2T) &= (1 - e^{-0,75T})f(0) + e^{-0,75T}x(1,25T) = 0,53; \\ x(2,25T) &= (1 - e^{-T})f(0) + e^{-T}x(1,25T) = 0,632; \\ x(3T) &= (1 - e^{-0,75T})f(T) + e^{-0,75T}x(2,25T) = 0,829; \\ x(3,25T) &= (1 - e^{-T})f(T) + e^{-T}x(2,25T) = 0,864; \\ x(4T) &= (1 - e^{-0,75T})f(2T) + e^{-0,75T}x(3,25T) = 0,657; \end{aligned}$$

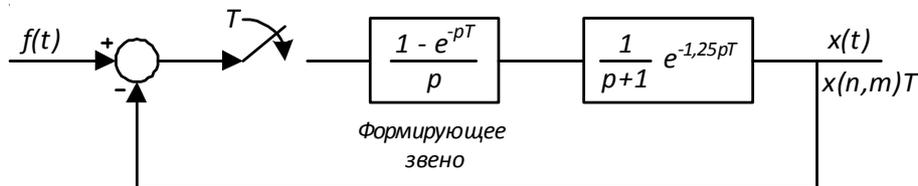


Рис. 5. Замкнутая импульсная система для иллюстрирующего примера

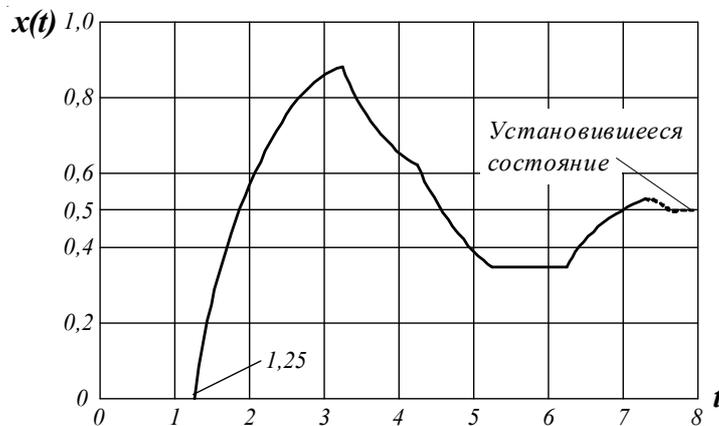


Рис. 6. Процесс на выходе системы, изображенной на рисунке 5

Значения процесса полностью совпадают с результатами, полученными методом модифицированного  $z$ -преобразования. Сравнение двух методов показывает, что даже в случае одномерных систем расчеты значительно проще выполняются на базе предложенного метода динамических графов. Применение модифицированного  $z$ -преобразования для аналитических исследований особенно проблематично в случае многомерных импульсных систем с запаздыванием, так как сопровождается трудностями принципиального характера, обусловленными структурной сложностью и проблемой формализованного математического описания процессов при использовании традиционного подхода.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гудвин, Г. К. Проектирование систем управления / Г. К. Гудвин, С. Ф. Гребе, М. Ю. Сальгадо. – М. : Бинوم. Лаборатория знаний, 2004. – 911 с.
2. Джури, Э. Импульсные системы автоматического регулирования / Э. Джури ; пер. с англ. М. А. Бергмана, Ж. Л. Грина ; под ред. Я. З. Цыпкина. – М. : Физматгиз, 1963. – 455 с.
3. Кадырова, А. А. Методы моделирования и исследования нелинейных и логико-динамических систем управления / А. А. Кадырова. – Ташкент : Янги аср авлоди, 2010. – 186 с.
4. Кадыров, А. А. Анализ методов математического моделирования дискретных динамических систем управления / А. А. Кадыров, А. А. Кадыров, А. А. Кадырова // Международная научно-практическая конференция «Иновация-2012» : сб. науч. ст. – Ташкент, 2012. – С. 223–226.
5. Кадыров, А. А. Декомпозиционные основы моделирования и исследования систем управления на базе динамических графов / А. А. Кадыров. – Ташкент : Иктисод-молия, 2015. – 226 с.
6. Кадыров, А. А. Динамические множества, графы и гиперграфы / А. А. Кадыров // Автоматическое управление. – Ташкент : ТашПИ, 1979. – Вып. 273.
7. Кадыров, А. А. Теория разнотемповых дискретных систем управления / А. А. Кадыров. – Ташкент : ТашГТУ, 2013. – 168 с.
8. Муромцев, Д. Ю. Анализ и синтез дискретных систем / Д. Ю. Муромцев, Е. Н. Яшин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 120 с.
9. Kadirov, A. A. Imitative Simulation of Structurally Complex System Based on Dynamic Graphs / A. A. Kadirov // System Analysis. – 1990. – № 5. – P. 35–43.
10. Kadirova, D. R. Complex Discrete Systems Graph Simulation / D. R. Kadirova, A. A. Kadirova // Journal of Multimedia and Information System. – 2015, Sep. – Vol. 2, № 3. – P. 263–274. – DOI: <http://dx.doi.org/10.9717/JMIS.2015.2.3.263>.

## REFERENCES

1. Gudvin G.K., Grebe S.F., Salgado M.Yu. *Proektirovanie sistem upravleniya* [Design of Control Systems]. Moscow, Binom; Laboratoriya znaniy Publ., 2004. 911 p.
2. Juri E. *Impulsnye sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya* [Impulsive Systems of Automatic Control]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1963. 455 p.
3. Kadyrova A.A. *Metody modelirovaniya i issledovaniya nelineynykh i logiko-dinamicheskikh sistem upravleniya* [Methods of Modeling and Research of Non-linear and Logical-Dynamic Control Systems]. Tashkent, Yangi asr avloidi Publ., 2010. 186 p.
4. Kadyrov A.A., Kadyrov A.A., Kadyrova A.A. *Analiz metodov matematicheskogo modelirovaniya diskretnykh dinamicheskikh sistem upravleniya* [Analysis of Methods of Mathematical Modeling of Discrete Dynamic Control Systems]. *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Innovatsiya-2012»: sb. nauch. statey* [Proceedings of International Scientific and Practical Conference Innovation-2012]. Tashkent, 2012, pp. 223-226
5. Kadyrov A.A. *Dekompozitsionnye osnovy modelirovaniya i issledovaniya sistem upravleniya na baze dinamicheskikh grafov* [Decomposition Bases for Modeling and Research of Control Systems Based on Dynamic Graphs]. Tashkent, Iktisod-moliya Publ., 2015. 226 p.
6. Kadyrov A.A. *Dinamicheskie mnozhestva, grafy i gipergrafy* [Dynamic Sets, Graphs, and Hypergraphs]. *Avtomaticheskoe upravlenie* [Automatic Control]. Tashkent, TashPI Publ., 1979, iss. 273.
7. Kadyrov A.A. *Teoriya raznotempovykh diskretnykh sistem upravleniya* [The Theory of Multiple-Time-Scale Discrete Control Systems]. Tashkent, TashGTU Publ., 2013. 168 p.
8. Muromtsev D.Yu., Yashin E.N. *Analiz i sintez diskretnykh sistem* [Analysis and Synthesis of Discrete Systems]. Tambov, TGTU Publ., 2012. 120 p.
9. Kadirov A.A. *Imitative Simulation of Structurally Complex System Based on Dynamic Graphs*. *System Analysis*, 1990, no. 5, pp. 35-43.
10. Kadirova D.R., Kadirova A.A. *Complex Discrete Systems Graph Simulation*. *Journal of Multimedia and Information System*, 2015, vol. 2, no. 3, pp. 263-274. DOI: <http://dx.doi.org/10.9717/JMIS.2015.2.3.263>.

## **GRAPH MODELING OF THE PROCESSES OF IMPULSIVE TIME-DELAY SYSTEMS**

**Amanulla A. Kadyrov**

Doctor of Sciences (Engineering), Professor,  
Director of Center for Strategic Innovations and Informatization  
amanulla.kadirov@innovation.uz  
Universitetskaya St., 2, office 214, 100095 Tashkent, Uzbekistan

**Aziza A. Kadyrova**

Candidate of Sciences (Engineering),  
Deputy Director of Center for Strategic Innovations and Informatization  
aziza.kaa@innovation.uz, aziza.kaa@mail.ru  
Universitetskaya St., 2, office 214, 100095 Tashkent, Uzbekistan

**Abstract.** Impulsive systems are widely used in metallurgy, chemical, and oil and gas industries, heat power engineering, irrigation and other industries. Periodic nature of the discrete control devices operation is the reason for the appearance of pure delay in the control channels. Methods for studying linear impulsive time-delay systems in synchronous-in-phase modes of operation of discrete devices are developed with sufficient completeness. At the same time, the methods of modeling and research of multiple-time-scale, multivariable, nonlinear impulsive time-delay systems require their further development. In this paper we propose a method for modeling impulsive time-delay systems based on dynamic graphs.

The result of simulation of pulse systems with delay based on dynamic graphs is completely the same as the results obtained by the modified Z-transformation. In the case of one-dimensional systems, calculations are much easier to perform on the basis of the proposed method of dynamic graphs. The application of the modified Z-transformation for analytical studies is particularly problematic in the case of multi-dimensional pulse systems with delay, as it is accompanied by difficulties of a fundamental nature due to the structural complexity and the problem of formalized mathematical description of the processes using the traditional approach.

**Key words:** impulsive system, time-delay, discreteness, modeling of processes, dynamic graph.