DOI: http://dx.doi.org/10.15688/jvolsu10.2015.2.8
УДК 681.5
ББК 32.965

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ДИСКРЕТНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ, РЕЛЕЙНЫХ И ЛОГИКО-ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА БАЗЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ И ГРАФОВЫХ МОДЕЛЕЙ

Кадыров Аманулла Азизович

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

Кадыров Амир Амануллаевич

Кандидат технических наук, заведующий сектором
Межотраслевого центра стратегических инноваций и информатизации, руководитель проектов
amir.kadirov@gmail.com
ул. Университетская, 2, 100095 г. Ташкент, Узбекистан

Аннотация. Из множества различных видов систем автоматического управления наибольший теоретический и прикладной интерес представляют дискретные динамические и логико-динамические системы управления. Объясняется это широкой востребованностью данных систем в промышленности, авиации, космонавтике, радиолокации, оборонном секторе и других сферах. Современная теория автоматического управления имеет достаточное количество эффективных методов расчета и проектирования линейных систем. Результаты, полученные для нелинейных и логико-динамических систем, имеют, как правило, частный характер и относятся к определенному классу нелинейностей или логических устройств. В связи с этим важной проблемой является формирование общей теории дискретных динамических, релейных и логико-динамических систем автоматического управления. В статье излагаются концептуальные основы общей теории дискретных динамических, релейных и логико-динамических систем на основе использования общих фундаментальных свойств рассматриваемых классов – дискретности структур и физической декомпозиции.

Ключевые слова: структурные методы моделирования, дискретная система, релейная система, логико-динамическая система, динамический граф, дискретность, декомпозиция.

Из множества различных видов систем автоматического управления наибольший теоретический и прикладной интерес представляют дискретные динамические, релейные и логико-динамические системы (ЛДС) в силу их востребованности и широкого использования в промышленности, авиации, космонавтике, радиолокации, оборонном секторе, железнодорожном транспорте, нефтегазовой сфере, гидро- и теплоэнергетике и других отраслях. Для моделирования и исследования, анализа и синтеза дискретных динамических, релейных и логико-динамических систем управления создан большой спектр полезных методов. Касательно дискретных систем среди методов, получивших наибольшее распространение, необходимо, например, отметить дискретное преобразования Лапласа, или Z-преобразование; частотные и временные методы (для линейных систем); метод «суммарных» уравнений, метод припасовывания; метод гармонической линеаризации (для нелинейных импульсных систем, релейных систем); метод пространства параметров состояния, который охватывает и дискретные, и непрерывные системы, линейные и нелинейные системы [4–6].

Относительно логико-динамических систем отметим следующее. Гибридный характер математических моделей логико-динамических систем (числовые функции, дифференциальные или разностные уравнения и логические функции) обусловил разработку иных методов формализованного представления, анализа и синтеза ЛДС. В качестве общих моделей ЛДС использовались гибридные графы, объединяющие граф потока сигналов и граф переходов. Были предложены универсальные базовые модели в виде логико-дифференциальных (логико-операторных) уравнений, дающие основу для разработки методов, алгоритмов и программ исследования систем с управляемой структурой. Для широкого класса систем с логическими управляющими устройствами для исследования колебательных режимов предложено применение приближенного метода проектирования нелинейных систем – метода гармонической линеаризации [1; 10; 11].

Вместе с тем, несмотря на давнюю и богатую историю вопроса, традиционные методы в отдельных случаях приводят к громоздким, неудобным для расчетов и проектирования уравнениям даже для определенных видов линейных одномерных систем. Например, это справедливо в отношении разнотемповых асинхронных систем, а также систем с конечной длительностью замыкания импульсных элементов и т. д.

Анализ дискретных динамических, релейных и логико-динамических систем показывает наличие факторов сложности, присущих каждому из подклассов (типов, видов) этих систем. Прежде всего, это структурная сложность управляемых объектов, сочетание логических и динамических переменных и условий, изменяемость структур и параметров, разнотемповые режимы работы импульсных элементов, нелинейные виды модуляций, наличие запаздывания и др. Большие трудности принципиального характера возникают при совокупном проявлении в системах всех или нескольких из этих факторов. Вместе с тем именно это свойственно сложным системам автоматического управления.

Основной причиной возникновения трудностей при решении задач анализа, синтеза рассматриваемых здесь систем управления на базе традиционных методов является то, что независимо от параметрической и структурной сложности по отношению ко всем системам применяется один и тот же подход, а именно **подход с позиций единого (неделимого) целого** как это показано в таблице.

Подходы, применяемые для решения задач анализа, синтеза в зависимости от рассматриваемых систем

Примеры систем управления	Классический подход, реализуемый при описании, анализе и синтезе систем управления
Простейшие одномерные линейные импульсные системы	Подход с позиций единого (неделимого) целого
Многомерные линейные дискретные системы	Подход с позиций единого (неделимого) целого
Нелинейные одномерные и многомерные системы с различными видами импульсной модуляции (АИС, ШИС, ЧИС)	Подход с позиций единого (неделимого) целого
Релейные одномерные и многомерные системы	Подход с позиций единого (неделимого) целого
Цифровые системы	Подход с позиций единого (неделимого) целого
Логико-динамические системы	Подход с позиций единого (неделимого) целого

То есть и простейшие линейные разомкнутые системы, и многомерные системы, и разнотемповые системы, и нелинейные одномерные и многомерные системы при формализованном математическом описании, анализе и синтезе рассматриваются с позиции единого (неделимого) целого. Аналогичная ситуация характерна и для логико-динамических систем управления.

Такой подход был в определенной мере оправдан, пока речь шла о простых одномерных системах управления. Усложнение систем и неизменность подхода привели к необходимости использования искусственных приемов для преодоления соответствующих факторов сложности, что породило множество частных моделей и расчетных схем, ориентированных на охват той или иной категории систем. Это обстоятельство актуализировало проблему разработки универсальных математических моделей, методов исследования, расчета и проектирования, охватывающих на единой концептуальной основе теоретико-множественного подхода и динамических графов дискретные, и логико-динамические системы [2; 3; 9].

Физическая декомпозиция – основа концепции общей теории дискретных динамических, релейных и логико-динамических систем управления

В классических методах описания, анализа и синтеза дискретных динамических, релейных и логико-динамических систем усилия исследователей направлены на учет и преодоление параметрических факторов сложности, то есть фактически на решение соответствующих разностных или гибридных уравнений. При этом системные аспекты и их роль в функционировании систем управления практически не раскрываются, остаются в тени.

В многомерных системах среди факторов сложности доминирующая роль принадлежит фактору сложности, именуемому «структура». Преодоление данного фактора сложности требует решения задач декомпозиции структурно-сложных систем на множество простых подсистем (агентов, частей, структурных состояний) и использования математического аппарата, адекватного понятию «структура».

Однако известные математические методы декомпозиции и агрегирования (задача согласования) имеют ограниченную сферу применения, поскольку не могут учитывать те особенности структурно-сложных дискретных динамических, релейных и логико-динамических систем, которые при определенном взгляде на физику работы являются основой для декомпозиции. Дискретные динамические, релейные и логико-динамические системы являются системами с самодекомпозицией, если рассматривать прерыватели непрерывных сигналов в них в первую очередь как источники дискретизации структур, а не только как источники возникновения дискретных сигналов, что характерно для классических методов. С этой точки зрения дискретные динамические, релейные и логико-динамические системы подпадают под единый класс систем с дискретной динамической структурой, или, более кратко, систем с динамической структурой (СДС). Именно это положение является отправной точкой для формирования концепции общей теории рассматриваемых здесь систем на основе теоретико-множественного подхода и динамических графов.

Остановимся на основных принципах, положенных в основу формирования концептуальных основ общей теории дискретных динамических, релейных и логико-динамических систем управления.

Основные принципы формирования общей теории и моделей дискретных динамических, релейных и логико-динамических систем

1. Принцип физической декомпозиции.

К числу важнейшей, фундаментальной особенности следует отнести тот факт, что в случае дискретных динамических, релейных и логико-динамических систем имеются предпосылки для физической (естественной) декомпозиции систем (процессов) на ряд подсистем. Однако они могут быть реализованы не всегда и зависят от принятой трактовки физических процессов и используемых математических моделей. Поясним «физическую» декомпозицию на примере двумерной несинфазной дискретной системы (рис. 1, *а*) с конеч-

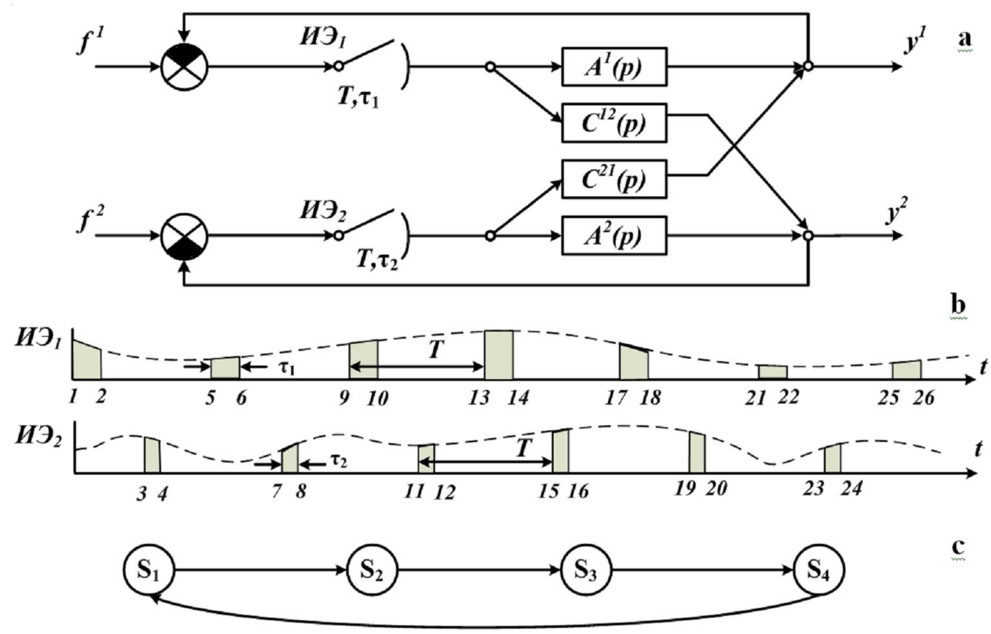

Рис. 1. Двумерная несинфазная дискретная система с конечной длительностью τ_1, τ_2 замыкания $ИЭ_1$, $ИЭ_2$:
a – структурная схема системы; *b* – режим работы $ИЭ_1$, $ИЭ_2$; *c* – граф структурных состояний системы.
Обозначения: f^1, f^2 – входные воздействия; y^1, y^2 – выходные координаты; $ИЭ_1$, $ИЭ_2$ – импульсные элементы;
T – период повторения импульсных элементов; τ_1, τ_2 – длительности замыкания импульсных элементов $ИЭ_1$, $ИЭ_2$;
$A^1(p)$, $A^2(p)$, $C^{12}(p)$, $C^{21}(p)$ – передаточные функции сепаратных и перекрестных каналов объекта управления;
S_1, S_2, S_3, S_4 – структурные состояния

ной длительностью замыкания импульсных элементов (ИЭ). В соответствии с режимом работы импульсных элементов (рис. 1, *b*) система «рассыпается» на простые взаимодействующие друг с другом в пределах периода повторения T непрерывные подсистемы или структурные состояния S_i (рис. 1, *c*).

При этом структурное состояние S_1 соответствует замкнутому состоянию $ИЭ_1$; S_2, S_4 – соответствуют межимпульсному разомкнутому положению $ИЭ_1$, $ИЭ_2$; S_3 – замкнутому состоянию $ИЭ_2$. Взаимодействие между структурными состояниями происходит посредством связи во времени (временной связи) между переменными состояния непрерывной части системы.

Графы типа (рис. 1, *c*) являются математической моделью описания систем на уровне структурных состояний S_i. В зависимости от вида дискретной динамической, релейной или логико-динамической системы будет меняться конечное множество динамических структур

$$S_t = \{S_1, S_2, ..., S_n\}, \tag{1}$$

структурные состояния S_i, время пребывания S_t в этом структурном состоянии и интервалы времени между различными структурными состояниями. Системы с изменяющейся во времени структурой состояний могут быть отнесены к системам с дискретной динамической структурой. В СДС каждое структурное состояние S_i характеризуется совокупностью множества X_i, бинарного отношения R_i, множества весов Ω_i, то есть

$$S_i = (X_i, R_i, \Omega_i), \tag{2}$$

где

$$S_i \in S_t = \{S_1, S_2, ..., S_n\};$$
$$X_i \subseteq X = \{x_1, x_2, ..., x_n\};$$
$$R_i \subseteq X_i \times X_i,\ \Omega_i \subseteq \Omega = \{\text{щ}_1, \text{щ}_2, ..., \text{щ}_k\}$$

(x_i – координаты системы, R_i – бинарное отношение в множестве X_i, $\omega_k = \lozenge x_i$, $\lozenge(\cdot)$ – «передача дуги $(\cdot)$»).

2. Принцип динамичности структур и процессов.

На макроуровне системы можно классифицировать в плане как структурной организации (одномерные, многомерные, с иерархической структурой), так и изменения структур во времени. Осуществляя также структуризацию процессов на уровне микроописания, можно обеспечить формализацию и исследование систем с единых позиций динамичности структур и процессов, используя для их описания динамические графы:

$$G_t = \langle X_t, (V_t, \Omega_t) \rangle, \tag{3}$$

где X_t, V_t, Ω_t – соответственно множества вершин, дуг и весов дуг:

$$X_t : t_* \to X;\ V : t_* \to V;\ \Omega_t : t_* \to \Omega;$$

$t_* = (t_1,\ t_2,\ ...,\ t_n)$ – упорядоченное конечное множество моментов времени.

Дадим иллюстрацию структуризации процессов на примере одномерной системы с конечной длительностью замыкания импульсного элемента (рис. 2, *a*). Граф структурных состояний системы показан на рисунке 2, *b*. На рисунке 2, *c*, представлен двудольный динамический граф системы.

Рекуррентные выражения для расчета процессов выводятся непосредственно из данной графовой модели и имеют вид:

$$\begin{cases} x_1(j\text{ф}) = a_{11}(\text{ф}) \cdot x_1\left(\overline{j-1}T\right) + a_{12}(\text{ф}) \cdot x_2\left(\overline{j-1}T\right) + a_{13}(\text{ф}) \cdot f\left(\overline{j-1}T\right) \\ x_2(j\text{ф}) = a_{21}(\text{ф}) \cdot x_1\left(\overline{j-1}T\right) + a_{22}(\text{ф}) \cdot x_2\left(\overline{j-1}T\right) + a_{23}(\text{ф}) \cdot f\left(\overline{j-1}T\right) \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_1(jT) = a_{11}(T-\text{ф}) \cdot x_1(j\text{ф}) + a_{12}(T-\text{ф}) \cdot x_2(j\text{ф}) \\ x_2(jT) = a_{22}(T-\text{ф}) \cdot x_2(jT) \end{cases} \tag{4}$$

Отметим также, что динамический граф позволяет определить устойчивость линейной системы. Для этого достаточно исключить дуги, смежные входному сигналу $f(0)$, и промежуточные вершины $x_1(\tau)$, $x_2(\tau)$. В итоге граф для определения устойчивости будет иметь вид (рис. 2, *d*).

Передачи дуг этого графа равны:

$$\begin{aligned} &b_{11}(T) = a_{11}(\tau) \cdot a_{11}(T-\tau) + a_{21}(\tau) \cdot a_{12}(T-\tau); \\ &b_{12}(T) = a_{12}(\text{ф}) \cdot a_{11}(T-\text{ф}) + a_{22}(\text{ф}) \cdot a_{12}(T-\text{ф}); \\ &b_{21}(T) = a_{21}(\text{ф}) \cdot a_{22}(T-\text{ф}); \\ &b_{22}(T) = a_{22}(\text{ф}) \cdot a_{22}(T-\text{ф}). \end{aligned} \tag{5}$$

Устойчивость определяется на основе норм $\left\|\vec{B}\right\|_I, \left\|\vec{B}\right\|_{II}$ матрицы смежности $\vec{B}$ графа:

$$\left\|\vec{B}\right\|_I = \max_r \sum_{i=0}^{n} \left|b_{ri}(T)\right|;\ \left\|\vec{B}\right\|_{II} = \max_i \sum_{i=0}^{n} \left|b_{ir}(T)\right|. \tag{6}$$

3. Универсальность. Предполагает единство подхода к моделированию структурно и параметрически сложных дискретных динамических, релейных и логико-динамических систем и их элементов на основе выделения в качестве доминирующей характеристики структуры, использования теоретико-множественного подхода и динамических графов.

4. Описание и исследование системы на нескольких уровнях абстракции. Формальной моделью на уровне структурных состояний являются динамические графы, аналитическое описание которых имеет вид:

$$S_i = (X_i, R_i, \Omega_i), \tag{7}$$

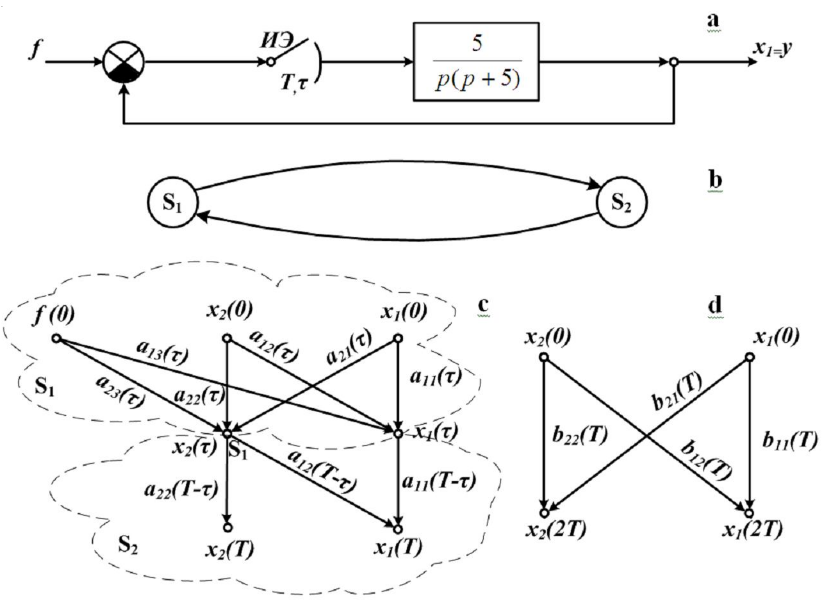

Рис. 2. Одномерная система с конечной длительностью замыкания τ ИЭ (*a*), граф структурных состояний системы (*b*), динамический граф для расчета процессов (*c*), динамический граф для определения устойчивости системы (*d*)

где

$$S_i \in S = (S_1,\ S_2,\ \ldots,\ S_n);$$
$$X_i \subseteq X = (x_1,\ x_2,\ \ldots,\ x_m);$$
$$R_i \in X_i \times X_i;\ \Omega_i \subseteq \Omega = (\text{щ}_1,\ \text{щ}_2,\ \ldots,\ \text{щ}_k)$$

(x_i – координаты непрерывной части системы, R_i – бинарное отношение в множестве X_i, ω_i – вес дуги x_k).

Модели нижнего уровня, предназначенные для имитации процессов в отдельных подсистемах, задаются графами вида

$$G_t = (X'_t,\ X''_t,\ V_t), \tag{8}$$

где

$$X_t = X'_t \cup X''_t;\ X'_t \cap X''_t = \varnothing;$$
$$\forall x, y \in X_t \left[x, y \in V_t \Rightarrow x \in X'_t \,\&\, y \in X''_t\right];$$
$$X'_t = \left(x'_1(jT),\ x'_2(jT),\ \ldots,\ x'_k(jT)\right);$$
$$X''_t = \left(x''_1\left(\overline{j+1T}\right),\ x''_2\left(\overline{j+1T}\right),\ \ldots,\ x''_k\left(\overline{j+1T}\right)\right);$$
$$\forall \left(x'_i, x''_j\right) \in V_t \left[\Diamond\left(x'_i, x''_j\right) = \nabla x''_j, x'_i\right];$$
$$i, j \in J = \{1,\ 2,\ \ldots,\ k\}$$

($\nabla x'', x' \Leftrightarrow$ «передача графа между узлами $(\cdot,\ \cdot)$»; $\Diamond x'_i, x''_j \Leftrightarrow$ «вес дуги $(\cdot,\cdot)$»; T – период дискретизации).

Обобщенная схема взаимодействия подобной двухуровневой схемы определяется с помощью динамического гиперграфа

$$H_t = (G_t, S_t), \tag{9}$$

где графы $G_t^j \in G_t$ интерпретируются как вершины гиперграфа, S_t – как ребра гиперграфа:

$$\forall S_i \in S \Rightarrow S_i \le G_i;\ G_t = \left\{G_t^1,\ G_t^2,\ \ldots,\ G_t^r\right\};$$
$$S_t : t_* \to S;\ S = \{S_1,\ S_2,\ \ldots,\ S_n\};\ t_* = (t_1,\ t_2,\ \ldots,\ t_n);$$
$$G_t^i = \left(X_t^i{}', X_t^i{}'', V_t^i\right);$$
$$X_t^i = X_t^i{}' \cup X_t^i{}'';\ X_t^i{}' \cap X_t^i{}'' = \varnothing;$$
$$\forall x^i{}',\ x^i{}'' \in X_t^i \left[\left(x^i{}',\ x^i{}''\right) \in V_t^i \Rightarrow x^i{}' \in X_t^i{}'' \,\&\right.$$
$$\left.\&\, x^i{}'' \in X_t^i{}'' \,\&\, \Diamond\left(x^i{}',\ x^i{}''\right) = \nabla x^i{}'', x^i{}'\right]$$

(t_* – линейно-упорядоченное конечное множество моментов времени, G_t – множество двудольных динамических графов; $X_t^i{}', X_t^i{}''$ – подмножество вершин i-го двудольного динамического графа; V_t^i – множество дуг i-го двудольного динамического графа).

5. Структурирование алгоритмов. Согласованность с проблемами разработки систем автоматизации проектирования. Предназначено для анализа структуры алгоритмических модулей различных систем с целью выявления минимально возможного количества элементарных алгоритмических модулей, необходимых для покрытия задач анализа и синтеза рассматриваемого множества систем. Так, можно было бы пойти по пути раздельного рассмотрения и создания системы автоматизированного проектирования для релейных, логико-динамических и дискретных систем, что является малоэффективным во всех отношениях. Структурирование же алгоритмов и выделение общих для этих систем элементарных алгоритмических модулей позволяет строить универсальные алгоритмы анализа и синтеза, охватывающие выделенное множество систем, и создавать на этой основе обобщенную систему автоматизации анализа, синтеза и проектирования. В свою очередь, решение задачи структурирования наиболее просто осуществляется на графовых моделях алгоритмов.

6. Использование физически прозрачных и простых понятий и характеристик непрерывных частей систем (импульсные переходные функции, схемы в переменных состояния, передаточные функции).

7. Максимальный учет физических особенностей систем, простота, неизбыточность в вычислительном отношении.

Развиваемый в настоящей работе подход позволяет достаточно просто решать задачу исследования динамики систем, реализующих логические законы управления. Покажем это на иллюстративном примере.

Пример. Требуется рассчитать переходной процесс в логико-динамической системе (рис. 3). Для решения поставленной задачи воспользуемся естественным разбиением системы на ряд более простых подсистем или структурных состояний: смена одной подсистемы другой будет происходить при выполнении определенных логических условий (предикатов) относительно координат системы.

Моменты перехода логико-динамической системы из состояния S_j в состояние S_i определяются фактическим переходом асинхронного автомата из одного состояния в другое.

Для простоты предположим, что система включает в свой состав объект управления второго порядка, описываемый передаточной функцией

$$W(p) = \frac{k}{(p + a_1)(p + a_2)},$$

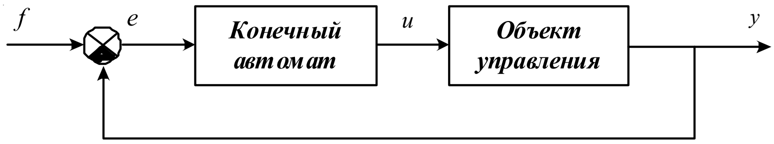

Рис. 3. Блок-схема одномерной ЛДС

и асинхронный конечный автомат с памятью, функционирование которого задается следующим образом:

$$z=\{z_1,z_2,z_3,z_4,z_5,z_6,z_7\};u=\{u_1,u_2,u_3\};\text{м}=\{\text{м}_1,\text{м}_2,\text{м}_3\}$$

$$F\text{м}_1=\{\text{м}_1(z_1/u_1),\text{м}_2(z_2/u_1),\text{м}_1(z_3/u_1),\text{м}_2(z_4/u_2)\};$$

$$F\text{м}_2=\{\text{м}_1(z_1/u_1),\text{м}_2(z_2/u_2),\text{м}_2(z_3/u_2),\text{м}_2(z_4/u_2),$$
$$\text{м}_2(z_5/u_2),\text{м}_2(z_6/u_2),\text{м}_3(z_7/u_3)\};$$

$$F\text{м}_3=\{\text{м}_2(z_4/u_2),\text{м}_3(z_5/u_3),\text{м}_3(z_6/u_3),\text{м}_3(z_7/u_3)\}.$$

Здесь каждая из букв входного алфавита автомата z отражает выполнение определенного логического условия относительно сигнала ошибки $e(t) = f(t) - y(t)$, где $f(t)$ – входное воздействие вида ступенчатой функции на входе КА. С учетом того, что класс выходных сигналов автомата – это ступенчатые сигналы, описываемые передаточной функцией $1/p$, а также того обстоятельства, что включение конечного автомата в состав системы привносит с собой эффект дискретизации структуры, строим графовую модель исследуемой системы, объединяя граф конечного автомата и граф непрерывной части (рис. 4, *a*). Изменение элементов графовой модели (множеств вершин, дуг, весов) будет обусловлено значениями предикатов, определенных на произвольных подмножествах этих множеств.

Пусть в начальный момент времени $t = 0$ ($x_1(0) = 0$, $x_2(0) = 0$) автомат находится в состоянии $\text{м}_2(z_4/u_2)$. Нам необходимо определить:

1) моменты переходов автомата из одного состояния в другое τ_1, τ_2, ... ;

2) координаты системы в эти моменты.

Для этого вначале от графа переходных состояний перейдем к двудольному графу, построенному для интервала $(0, \tau_1)$ (рис. 4, *b*), и по полученному графу составим уравнения для сигнала $e(t)$:

$$e(t)=1-\left(1+\frac{a_1}{a_1-a_2}e^{-a_2t}-\frac{a_2}{a_1-a_2}e^{-a_1t}\right)\cdot\frac{K}{a_1a_2}u(0). \quad (10)$$

Смена состояний автомата может произойти только при выполнении определенных условий, соответствующим буквам z_1 и z_3 входного алфавита автомата, КА при этом перейдет в состояние либо $\text{м}_1(z_1/u_1)$, либо $\text{м}_3(z_7/u_3)$. Приравнивая поочередно $e(t)$ численным значениям этих условий, из решения трансцендентного уравнения (10) получим моменты времени t_1 и t_2, в которые может произойти изменение значения управляющего воздействия $u(t)$. Сравнивая эти значения, найдем $\tau_{1\min}$ и $u(\tau_{1\min})$. Для $\tau_{1\min}$ пересчитываем значения всех координат объекта:

$$x_1(\text{ф})=\left(1+\frac{a_1}{a_1-a_2}e^{-a_2\text{ф}}-\frac{a_2}{a_1-a_2}e^{-a_1\text{ф}}\right)\cdot\frac{K}{a_1a_2}u(0);$$

$$x_2(\text{ф})=\left(1-e^{-a_2\text{ф}}\right)\cdot\frac{K}{a_2}u(0).$$

Дальнейшие шаги расчета предполагают аналогичные действия; так, например, для следующего интервала $(\tau_1; \tau_2)$ двудольный граф примет вид, представленный на рисунке 4, *c*. Алгоритм расчета процессов в одномерной логико-динамической системе может быть сформулирован следующим образом.

Алгоритм

1. Строим граф переходных состояний системы, объединяя с учетом макроструктуры граф конечного автомата и граф непрерывной части.

2. Разворачивая построенный граф на интервале $(\tau_{i-1}; \tau_i)$, $i = 1$, получаем двудольный граф и составляем по нему уравнение относительно входа конечного автомата.

3. С учетом условий функционирования автомата решаем полученное трансцендентное уравнение и находим момент времени τ_i перехода системы в новое структурное состояние.

4. Пересчитываем все координаты системы для найденного значения τ_i.

5. Возвращаемся к пункту 2, увеличивая i на 1 до тех пор, пока не получим полную информацию о поведении системы на интересующем интервале времени.

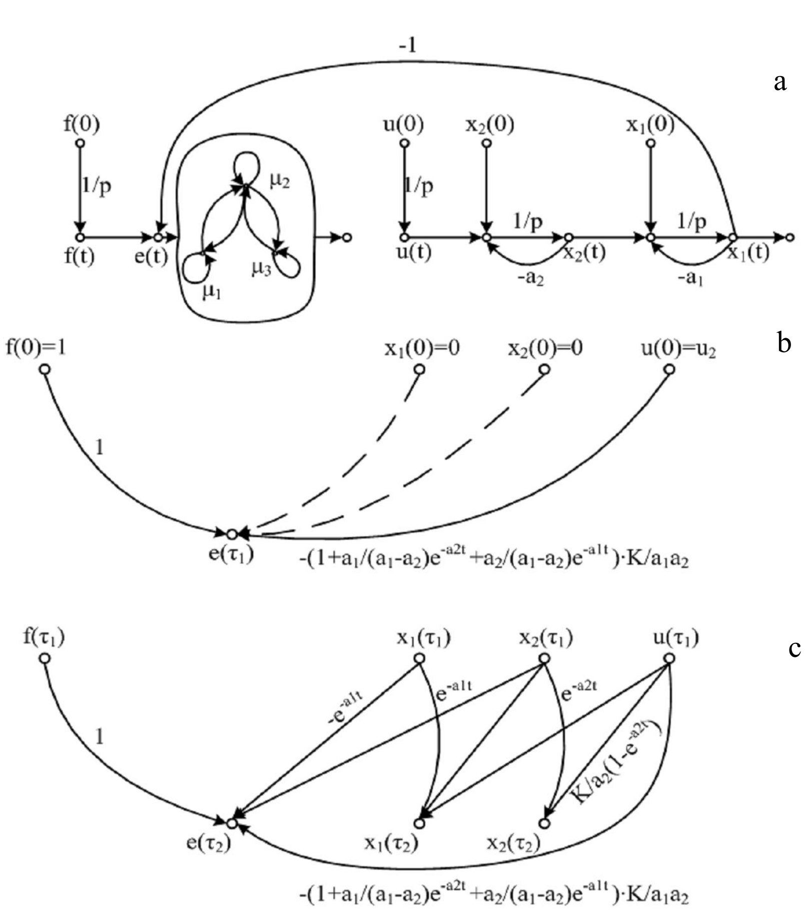

Рис. 4. Графовая модель одномерной ЛДС (*a*),динамический граф для интервала (0; τ_1) (*b*), динамический граф для интервала (τ_1; τ_2) (*c*)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жук, К. Д. Автоматизированное проектирование логико-динамических систем / К. Д. Жук, А. А. Тимченко. – Киев : Наукова думка, 1981. – 320 с.

2. Кадыров, А. А. Машинные методы моделирования и исследования структурно-сложных систем / А. А. Кадыров. – Ташкент : Фан, 1989. – 245 с.

3. Кадыров, А. А. Теория разнотемповых дискретных систем управления / А. А. Кадыров. – Ташкент : ТГТУ, 2013. – 168 с.

4. Кузин, Л. Т. Расчет и проектирование дискретных систем управления / Л. Т. Кузин. – М. : Машгиз, 1962. – 684 с.

5. Кунцевич, В. М. Нелинейные системы управления с частотно- и широтно-импульсной модуляцией / В. М. Кунцевич, Ю. Н. Чеховой. – Киев : Техника, 1970. – 340 с.

6. Ту Ю. Современная теория управления / Ту Ю ; пер. с англ. под ред. В. В. Солодовникова. – М. : Машиностроение, 1971. – 472 с.

7. Baron, A. The Metod for Lifetime Estimation through the Mechanical Properties in Tension / A. Baron, J. Bakhracheva // Mechanika (Kaunas). – 2004. – № 3. – P. 29–32.

8. Effect of Nitrogen Content on the Structure and Properties of Nitrocarburized Steel / V. I. Shapochkin, L. M. Semenova, Y. S. Bakhracheva, E. L. Gyulikhandanov, S.V. Semenov // Metal Science and Heat Treatment. – 2011. – Vol. 52, № 9-10. – P. 413–419.

9. Kadirov A.A. Imitative Simulation of Structurally Complex Systems Based on Dynamic Graphs // System Analysis. – 1990. – № 5. – P. 35–43.

10. Modeling and Control of Logical Discrete Event Systems / A. Kumar, D. Ratnesh, G. Garg, K. Vijay // The Springer International Series in Engineering and Computer Science. – 1995. – Vol. 300. – P. 164–176.

11. Platzer, A. Logical Analysis of Hybrid Dynamical Systems: Proving Theorems for Complex Dynamics / A. Platzer. – Springer, 2010. – 426 p.

12. Valve Cam Design Using Numerical Step-by-step Method / A. V. Vasilyev, J. S. Bakchracheva,

O. Kabore, Ju. O. Zelenskij // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 10, Инновационная деятельность. – 2014. – № 1 (10). – С. 26–32.

REFERENCES

1. Zhuk K.D., Timchenko A.A. *Avtomatizirovannoe proektirovanie logiko-dinamicheskikh sistem* [Automated Design of Logical-Dynamic Systems]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1981. 320 p.

2. Kadyrov A.A. *Mashinnye metody modelirovaniya i issledovaniya strukturno-slozhnykh system* [Machine Methods of Simulation and Structurally Complex Systems Studies]. Tashkent, Fan Publ., 1989. 245 p.

3. Kadyrov A.A. *Teoriya raznotempovykh diskretnykh sistem upravleniya* [Theory of Discrete Control Systems]. Tashkent, TGTU Publ., 2013. 168 p.

4. Kuzin L.T. *Raschet i proektirovanie diskretnykh sistem upravleniya* [Calculation and Design of Discrete Systems of Control]. Moscow, Mashgiz Publ., 1962. 684 p.

5. Kuntsevich V.M., Chekhovoy Yu.N. *Nelineynye sistemy upravleniya s chastotno- i shirotno-impulsnoy modulyatsiey* [Nonlinear Control Systems With Variable Frequency and Pulse-Width Modulation]. Kiev, Tekhnika Publ., 1970. 340 p.

6. Tu Yu. *Sovremennaya teoriya upravleniya* [Modern Control Theory]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1971. 472 p.

7. Baron A.A, Bakhracheva Yu.S. The Method for Lifetime Estimation Through the Mechanical Properties in Tension. *Mechanika (Kaunas)*, 2004, no. 3, pp. 29-32.

8. Shapochkin V.I., Semenova L.M., Bakhracheva Yu.S., Gyulikhandanov E.L., Semenov S.V. Effect of Nitrogen Content on the Structure and Properties of Nitrocarburized Steel. *Metal Science and Heat Treatment*, 2011, vol. 52, no. 9-10, pp. 413-419.

9. Kadirov A.A. Imitative Simulation of Structurally Complex Systems Based on Dynamic Graphs. *System Analysis*, 1990, no. 5, pp. 35-43.

10. Kumar A., Ratnesh D., Garg G., Vijay K., Modeling and Control of Logical Discrete Event Systems. *The Springer International Series in Engineering and Computer Science*, 1995, vol. 300, pp. 164-176.

11. Platzer A. *Logical Analysis of Hybrid Dynamical Systems: Proving Theorems for Complex Dynamics*. Springer, 2010. 426 p.

12. Vasilyev A.V., Bakhracheva Yu.S., Kabore O., Zelenskiy Yu.O. Valve Cam Design Using Numerical Step-by-Step Method. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 10, Innovatsionnaya deyatelnost* [Science Journal of Volgograd State University. Technology and Innovations], 2014, no. 1 (10), pp. 26-32.

CONCEPTUAL FOUNDATIONS OF GENERAL THEORY OF DISCRETE DYNAMIC, RELAY AND LOGICAL-DYNAMIC SYSTEMS BASED ON PHYSICAL DECOMPOSITION AND GRAPH MODELS

Kadyrov Amanulla Azizovich

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Director of Multisectoral Center for Strategic Innovations and Informatization
amanulla.kadirov@innovation.uz
Universitetskaya St., 2, 100095 Tashkent, Uzbekistan

Kadyrov Amir Amanullaevich

Candidate of Technical Sciences, Head of Department,
Multisectoral Center for Strategic Innovations and Informatization,
Project Manager, International Business Manager
amir.kadirov@gmail.com
Universitetskaya St., 2, 100095 Tashkent, Uzbekistan

Abstract. Among many different types of automatic control systems, discrete dynamic and logical-dynamic control systems are of greatest theoretical and practical interest. This is explained by a wide demand for these systems in the industry, aviation, aerospace, radiolocation, defense industry and other fields. At the same time, the modern theory of automatic control has enough effective methods of calculation and design for linear systems. The results obtained for non-linear and logical-dynamic systems are usually of a private nature and belong to a class of non-linearities or logical devices. In this connection, an important issue is the formation of a general theory of discrete dynamic and logical-dynamic control systems.

The analysis of discrete dynamical, relay and logical-dynamic systems shows the presence of factors of complexity inherent in each of the subclasses (types, kinds) of these systems. First of all, the structural complexity of managed objects, the combination of logical and dynamic variables and conditions, the variability of the structures and parameters, modes of operation of the pulse elements, nonlinear kinds of modulations, delay, etc. The difficulties arise in comprehensive manifestation of systems in all or several of these factors. However, this is characteristic of a complex system of automatic control.

The article presents the conceptual foundations of the general theory of discrete dynamical and logical-dynamic systems on the basis of shared fundamental properties of these classes – discrete structures and physical decomposition.

Key words: structural methods of modelling, discrete system, relay system, logical-dynamic system, dynamic graph, discreteness, decomposition.