УДК 519.876.5

АППАРАТ Е - СЕТЕЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

О.Ю. Батин, А.В. Галковский, П.Г. Загоскин
(представил д.т.н., проф. Е.И. Бобыр)

Рассматриваются особенности применения теории цифровых автоматов с памятью для описания математических моделей вооружения и военной техники (ВВТ), построенных с помощью Е - сетей. Приводится система ограничений и допущений с иллюстрацией описания работы коммутатора.

Распространенными математическими средствами формализации процессов функционирования сложных систем, к классу которых относятся объекты ВВТ, являются системы и сети массового обслуживания, вероятностные автоматы, сети Петри, Е - сети, агрегаты. Наибольшее применение нашли системы и сети массового обслуживания, сети Петри и их модификации, Е - сети.

Оценочные или Е - сети, как расширение сетей Петри, обладают высокой моделирующей способностью и универсальностью. Они могут быть использованы для построения общих, отражающих наиболее существенные факторы, моделей ВВТ.

При разработке структур моделей дискретных систем в качестве базовой информации можно использовать данные о логической взаимосвязи наблюдаемых в системе событий и условий, предопределяющих наступление этих событий. Базовые понятия "Условие" и "Событие" могут быть связаны отношением типа "Выполняется после". Построение полной структуры таких отношений для моделируемой проблемной ситуации составляет цель и задачу формирования структуры модели.

События выражают действия, реализация которых управляет состояниями системы. Состояния задаются в виде сложных условий, формулируемых как предикаты с переменными в виде простых условий. Только при достижении определенных состояний (в этом случае соответствующие предикаты принимают истинное значение) обеспечивается возможность действий (наступления событий). Условия, с фактами возникновения которых связана истинность предиката и, следовательно, возможность реализации события, называют "до-условиями" (предпосылками наступления события). В результате действия, совершившегося при реализации события, объявляются истинными все простые условия, непосредственно связанные с данным событием отношением "Выполняется после". Эти условия рассматриваются как "пост - условия" (прямые следствия событий). Таким образом, только после выполнения всех "до-условий" для некоторого события это событие может быть выполнено. После того, как событие имело место, истинными становятся все "пост - условия" данного события, которые затем, в свою очередь, могут быть "до - условиями" каких-либо других событий и т.д.

Такая концепция структуризации моделируемой проблемной ситуации поддерживается формальными средствами, разработанными в теории сетей Петри и, в частности, в наиболее мощном их расширении – **Е** - сетях [1, 2]. Если в сетях Петри точное знание моментов времени реализации событий в системе игнорировалось, то в Е-сетях важное значение придается четкой временной взаимосвязи реализуемых событий, что выделяет аппарат Е - сетей как одно из наиболее удобных средств формализации объектов военного назначения и процессов их функционирования в реальном масштабе времени.

В Е - сетях условия моделируются позициями, а события - переходами. Последовательная реализация событий в системе отображается в сети в виде последовательного и параллельного срабатывания ее переходов. Выполнение какого-либо условия в системе связано с появлением метки в соответствующей этому условию позиции сети. Действующие в Е - сетях соглашения о правилах срабатывания переходов выражают логические взаимосвязи между условиями и событиями в моделируемой системе.

Формально Е - сетью

$$\mathbf{MEN = (B, D, K, S)} \tag{1}$$

называется ориентированный бихроматический граф, состоящий из двух непустых непересекающихся множеств вершин-позиций $\mathbf{B = \{ b_i \}}$ и вершин-переходов $\mathbf{D = \{ d_j \}}$, связанных между собой дугами **K** по определенным функциональным правилам **S**, причем:

$$\mathbf{B \neq \varnothing;\ \ D \neq \varnothing;\ \ B \cap D \neq \varnothing.} \tag{2}$$

Функциональные правила **S** состоят в следующем: в каждую позицию может входить не более одной дуги, т .е.

$$\forall \mathbf{b_i} \sum_{\mathbf{j=1}}^{\mathbf{N_d}} \mathbf{I_{ij}} = \mathbf{1} \tag{3}$$

и выходить из позиции может тоже не более одной дуги, т.е.

$$\forall \mathbf{b_i} \sum_{\mathbf{j=1}}^{\mathbf{N_d}} \mathbf{O_{ij}} = \mathbf{1}\ . \tag{4}$$

Дуги **K** определяются прямой и обратной функциями инциденции:

$$\mathbf{K = (I(D), O(D));} \tag{5}$$

$$\mathbf{I: B \times D \to \{ 0, 1 \};} \tag{6}$$

$$\mathbf{O: D \times B \to \{ 0, 1 \}.} \tag{7}$$

Прямая функция инциденции **I(D)** обозначает множество позиций, смежных с переходами по входу. Обратная функция инциденции **O(D)** обозначает множество позиций, смежных с переходами по выходу.

Функции инциденции **I(D)** и **O(D)** задаются матрицами размерности $\mathbf{n \times m}$, где **n** – число столбцов, равное числу переходов в сети, **m** – число строк равное числу позиций в сети. Цифра **1** на пересечении столбца и строки обозначает: для **I(D)** соединение выхода соответствующей позиции со входом соответствующего перехода, для **O(D)** соединение выхода соответствующего перехода со входом соответствующей позиции. Отсутствие соединения обозначается цифрой **0**. На рис.1 представлен общий вид матриц инциденции.

I(D)

	d_1	d_2	D_3	d_4		d_n
b_1	1	0	0	0		0
b_2	0	0	1	0		0
b_3	0	0	0	0		1
b_m	0	1	0	0		0

O(D)

	d_1	d_2	d_3	d_4		d_n
b_1	0	1	0	0		0
b_2	1	0	0	0		0
b_3	0	0	1	0		0
	0	0	0	0		0
b_m	0	0	0	0		1

Рис.1. Общий вид матриц инциденции Е - сети

Для каждого перехода $\mathbf{d_j \in D}$ можно определить множество входных позиций перехода $\mathbf{I(d_j)}$ и множество выходных позиций перехода $\mathbf{O(d_j)}$ как

$$\mathbf{I}(d_j) = \{\mathbf{b_i \in B} \mid \mathbf{I(\ b_i, d_j\ ) = 1}\}; \tag{8}$$

$$\mathbf{O}(d_j) = \{\mathbf{b_i \in B} \mid \mathbf{O(\ b_i, d_j\ ) = 1}\}, \tag{9}$$

где $i = \overline{\mathbf{1, m}}$; $j = \overline{\mathbf{1, n}}$.

Функции инциденции отражают связи между условиями и событиями в системе. Таким образом, каждая дуга инцидентна позиции и переходу

$$\mathbf{K \subseteq (B \times D) \cup (D \times B)}. \tag{10}$$

Вершины-позиции и вершины-переходы являются структурными элементами Е-сети и могут использоваться только для отражения статики моделируемой системы (взаимосвязи событий и условий), но не позволяют моделировать динамику функционирования. Динамическими элементами являются метки. В отличие от сетей Петри в Е - сетях все метки, в общем случае, уникальны и характеризуются вектором атрибутов

$$\mathbf{Z_{ij}} = (\ \mathbf{z_1}, \mathbf{z_2}, \mathbf{z_3}, \ldots, \mathbf{z_k}\ ), \tag{11}$$

где **k** - количество элементов вектора атрибутов **j** - й метки в позиции $\mathbf{b_i}$. Атрибуты метки могут быть неоднородны, т.е. они могут содержать как числовые значения, так и текстовые выражения или же указатели на целые таблицы величин. Если проводить аналогию с таким классом сетей Петри, как раскрашенные сети Петри, то вектор атрибутов метки представляет собой не просто цвет из некоторого набора цветов метки, а одновременно целую палитру цветов или даже набор различных палитр.

Для представления динамических свойств сети вводится функция разметки (маркирования) сети

$$\mathbf{M(B) = (M(b_1), M(b_2), \dots , M(b_i), \dots , M(b_m))}, \tag{13}$$

где $\mathbf{M(b_i)}$ – разметка позиции $\mathbf{b_i}$,

$$\mathbf{M(b_i) = (m_1, m_2, \dots, m_k) \to \{ 0, 1, \dots , k \}}, \tag{14}$$

т.е. функция разметки для позиции $\mathbf{b_i}$ имеет целое неотрицательное значение $\mathbf{k}$, указывающее на то, что в позиции $\mathbf{b_i}$ находится $\mathbf{k}$ различных меток, каждая из которых описывается своим вектором атрибутов $\mathbf{Z_{ij}}$.

При графическом задании Е - сети разметка отображается помещением внутри вершин-позиций соответствующего числа точек, называемых метками.

Е - сеть функционирует переходя от одной разметки к другой. Начальная разметка обозначается как $\mathbf{M_0}$. Смена разметок происходит в результате срабатывания одного из переходов $\mathbf{d_j} \in \mathbf{D}$ сети. Необходимым условием срабатывания перехода $\mathbf{d_j}$ является

$$\exists\ \mathbf{b_i} \in \mathbf{I(d_j)}\ \{ \mathbf{M(b_i) \geq 1} \}. \tag{15}$$

Переход $\mathbf{d_j}$, для которого выполняется указанное условие, определяется как находящийся в состоянии готовности к срабатыванию или как возбужденный переход.

Срабатывание перехода $\mathbf{d_j}$ изменяет разметку сети $\mathbf{M(B)}$ на разметку $\mathbf{M'(B)}$ по следующему правилу:

$$\mathbf{M'(B) = M(B) - I(d_j) + O(d_j)}, \tag{16}$$

т.е., переход изымает метки из своих входных позиций и добавляет метки в выходные позиции. Для изображения смены разметки $\mathbf{M}$ на $\mathbf{M'}$ применяют обозначение $\mathbf{M} \vdash \mathbf{M'}$.

Е - сеть, в которой задана начальная разметка, называется размеченной Е - сетью и задаётся набором

$$\mathbf{MEN = (B, D, K, S, M_0)}, \tag{17}$$

где $\mathbf{M_0}$ – начальная разметка сети.

Множество вершин-позиций $\mathbf{B} = \{ \mathbf{b_i} \}$ состоит из простых позиций, которые, в отличие от сетей Петри, имеют по одному входу и выходу и могут содержать не более одной метки, т.е. обеспечивают выполнение свойства безопасности для Е - сетей.

Рассматривая позиции в Е - сетях заметим, что часто встречаемый на практике элемент – очередь, в аппарате Е-сетей определяется как макроэлемент (рис.2), состоящий из простых переходов и простых позиций. При моделировании сложной системы это увеличивает размерность модели, затрудняет процессы построения, отладки и анализа модели.

Если мы введем в аппарат Е - сетей новую позицию – позицию-очередь $\mathbf{q_i}$ как полноправный структурный элемент, то над такой позицией можно определить и изменять при необходимости дисциплину обслуживания (LIFO, FIFO, приоритетное обслуживание и т.д.).

Таким образом, простую позицию можно рассматривать лишь как частный случай позиции-очереди с длиной очереди равной единице.

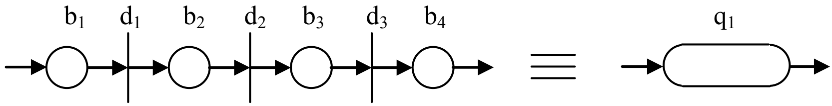

Рис.2. Макропозиция

Проблема безопасности в Е - сетях с очередями решается так же, как и при наличии только простых позиций, т.е.

$$\mathbf{b_i \in B\ \{M(b_i) \le 1\}} \tag{18}$$

только с учетом максимальной длины очереди, т.е.

$$\mathbf{b_i \in B\ \{M(b_i) \le l_i\}}. \tag{19}$$

Выполнение этого условия поддерживается в сети, как и прежде, логикой работы перехода.

Важно заметить, что при определении Е - сетей не вводились какие-либо ограничения на тип переходов, составляющих множество **D**. Часто используются лишь переходы заранее установленных типов, которые образуют так называемый «базовый» набор переходов. Смысл введения такого подкласса можно объяснить соображениями удобства реализации программ функционирования Е - сетей на некоторых языках программирования (например, СИМУЛА-67 или GPSS) [3].

К базовому набору переходов (рис. 3) относятся переходы [2]:

T – простой переход;
F – переход - размножение;
J – переход-объединение;
X – одновходовый коммутатор;
Y– приоритетный выбор.

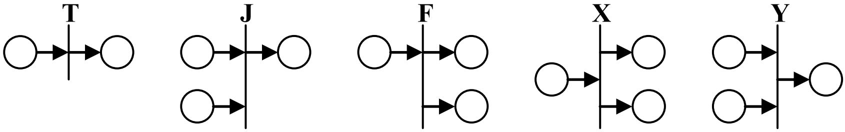

Рис.3. Базовый набор переходов.

Однако, данный аппарат Е - сетей позволяет строить имитационные модели только простых систем и процессов. При необходимости разработки имитационных моделей сложных систем, таких как объекты ВВТ, использование базовых средств аппарата становится проблематичным, так как резко возрастает сложность модели. При этом модель становится громоздкой, теряется главное преимущество аппарата Е - сетей –

наглядность, затрудняется анализ построенной модели, резко увеличивается время на отладку модели и её реализацию.

В [4] указаны основные направления модернизации аппарата Е - сетей. Так, например, было предложено снять ограничение на количество входов и выходов у базовых переходов для увеличения наглядности сложных моделей, сокращения времени, затрачиваемого на построение, отладку и реализацию модели. Предлагается ввести новый переход, назовем его «универсальный коммутатор», который может иметь любое количество входов и выходов. Теперь все базовые переходы будут являться только лишь его частными случаями. Однако, с увеличением числа входов и выходов у перехода логика его работы не может быть определена булевским значением разрешающей позиции $\mathbf{r_i = \{0;1\}}$. Поэтому предлагается передать управляющие функции разрешающей позиции непосредственно переходу и отказаться собственно от понятия разрешающей позиции. В этом случае к стандартному описанию перехода $\mathbf{d_n}$ должна быть добавлена функция $\mathbf{R_n}$, определяющая правила срабатывания перехода.

Каждая вершина-переход Е - сети имеет свои характеристики и записывается как

$$\mathbf{d_n = \left(H_n, B_n^i, B_n^o, G_n, \tau_n, R_n, W_n\right)}, \tag{20}$$

где $\mathbf{H_n}$ – тип перехода;

$\mathbf{B_n^i}$ – множество входных позиций;

$\mathbf{B_n^o}$ – множество выходных позиций;

$\mathbf{G_n}$ – функция возбуждения;

$\mathbf{\tau_n}$ – функция определения временной задержки;

$\mathbf{R_n}$ – функция срабатывания перехода;

$\mathbf{W_n}$ – функция преобразования атрибутов меток.

Закономерности работы многовходовых (многовыходовых) переходов трудно представимы в терминах теории множеств. Однако, совокупность перехода с множеством его входных и выходных позиций можно представить в виде вероятностного цифрового автомата с памятью. Для использования теории цифровых автоматов с памятью для описания средств аппарата Е-сетей введем следующие понятия, ограничения и допущения.

1. Переход цифрового автомата из одного состояния в другое будет происходить под воздействием входных сигналов $\mathbf{V_k}$, под которыми будем понимать появление меток во входных позициях $\mathbf{I(d_j)}$ перехода или удаление меток из выходных позиций $\mathbf{O(d_j)}$ перехода.

2. Функцию помещения и изъятия меток из позиций возложим на цифровые автоматы смежные соответственно по входам или выходам с данным цифровым автоматом.

3. Одно или несколько состояний цифрового автомата могут быть неустойчивыми (активными), т.е. из этих состояний цифровой автомат самостоятельно, без воздействия каких-либо внешних сигналов переходит в устойчивое состояние через некоторое, в общем случае ненулевое время $\mathbf{t_n}$. Все остальные переходы цифрового автомата из одного состояния в другое – неделимый акт изменения разметки входных и выходных позиций перехода – осуществляются мгновенно.

4. Переход цифрового автомата из неустойчивого состояния в устойчивое сопровождается выходными сигналами $\mathbf{U_l}$, под которыми будем понимать изменение разметки самим переходом, т.е. изъятие меток из входных позиций $\mathbf{I(d_j)}$ перехода и помещение их в выходные позиции $\mathbf{O(d_j)}$. В общем случае, выходные сигналы одного цифрового автомата являются входными сигналами одного или нескольких других цифровых автоматов. В ряде случаев выходной сигнал цифрового автомата может являться для него же и входным сигналом. Это возникает тогда, когда одна и та же позиция является смежной с переходом одновременно и по входу и по выходу.

5. Значение времени $\mathbf{t_n}$ перехода цифрового автомата из неустойчивого активного состояния в устойчивое и то устойчивое состояние, в которое перейдёт через это время цифровой автомат, могут быть или жестко зафиксированы в цифровом автомате, или определяться значениями входных сигналов, под которыми могут пониматься не только сами факты наличия меток в смежных с переходом позициях, но и значения вектора атрибутов этих меток.

6. Вероятностные свойства цифрового автомата определяются вероятностным характером времени нахождения его в активном состоянии и вероятностным характером перехода в одно из устойчивых состояний.

7. Если у цифрового автомата неустойчивых (активных) состояний несколько, то под воздействием некоторых входных сигналов цифровой автомат может перейти из одного неустойчивого состояния в другое неустойчивое, не прерывая своей фазы активности $\mathbf{t_n}$.

Теперь, с учетом введенного, в качестве примера опишем с помощью теории цифровых автоматов с памятью функционирование одного из введенных в [4] переходов Е - сети, который не входит в число базовых. На рис.4 приведены условное обозначение перехода, осуществляющего коммутацию меток со входа на какой-либо один выход, либо на оба выхода одновременно, и граф переходов цифрового автомата, который описывает его функционирование. Введем следующие обозначения.

Z – множество состояния цифрового автомата; **V** – алфавит входных сигналов; **U** – алфавит выходных сигналов.

$\mathbf{C_{12}}$ – Коммутатор (1 вход, 2 выхода).

Состояния цифрового автомата:

$\mathbf{Z_0}$ – нет метки ни на входе, ни на выходах;

$\mathbf{Z_1}$ – есть метка на входе, нет меток на обоих выходах;

Z_2 – нет метки на входе, есть метка только на 1 выходе;
Z_3 – нет метки на входе, есть метка только на 2 выходе;
Z_4 – есть метка на входе, есть метка только на 1 выходе;
Z_5 – есть метка на входе, есть метка только на 5 выходе;
Z_6 – нет метки на входе, есть метки на обоих выходах;
Z_7 – есть метка на входе, есть метки на обоих выходах.

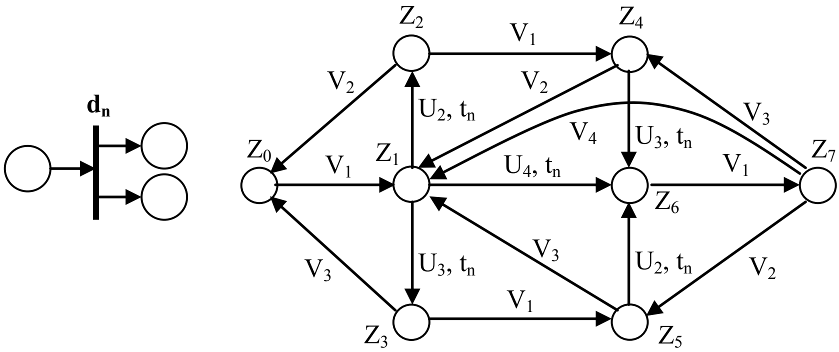

Рис.4. Условное обозначение коммутатора Е - сети
и граф переходов описывающего его цифрового автомата

Входные сигналы:
V_1 – появление метки на входе перехода;
V_2 – удаление метки с первого выхода;
V_3 – удаление метки со второго выхода;
V_4 – удаление метки с обоих выходов;
Выходные сигналы:
U_1 – перемещение метки со входа на первый выход;
U_2 – перемещение метки со входа на второй выход;
U_3 – перемещение метки со входа на оба выхода.

В представленном цифровом автомате состояния **Z_1**, **Z_4**, **Z_5** являются неустойчивыми (активными).

Таблица 1

Таблица входов

	Z_0	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	Z_7
V_1	Z_1 (0)	-	Z_4 (0)	Z_5 (0)	-	-	Z_7 (0)	-
V_2	-	-	Z_0 (0)	-	Z_1 (0)	-	-	Z_5 (0)
V_3	-	-	-	Z_0 (0)	-	Z_1 (0)	-	Z_4 (0)
V_4	-	-	-	-	-	-	-	Z_1 (0)

В таблице входов (табл. 1) и таблице выходов (табл.2) жирной линией обозначены неустойчивые (активные) состояния.

Цифровой автомат, описывающий функционирование коммутатора $\mathbf{C_{13}}$ (один вход, три выхода), имеет 16 состояний, 9 входных и 6 выходных сигналов.

Таблица 2

Таблица выходов

	Z_0	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	Z_7
U_2	-	Z_2 (t_n)	-	-	-	Z_6 (t_n)	-	-
U_3	-	Z_3 (t_n)	-	-	Z_6 (t_n)	-	-	-
U_4	-	Z_6 (t_n)	-	-	-	-	-	-

Обобщая вышесказанное, следует отметить, что предложенный аппарат формального описания Е - сетей существенно упрощает процесс перехода от концептуальной модели к математической модели изучаемых процессов и систем ВВТ; повышает их наглядность и возможности; сокращает время построения и время реализации модели; позволяет получить количественные значения показателей эффективности их функционирования.

Предложенный в статье метод описания Е - сетевых моделей в совокупности с разработанными в [4] направлениями модернизации аппарата Е-сетей для моделирования объектов ВВТ и процессов их функционирования является основой для создания инструментальной системы моделирования на базе Е - сетей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем. – М.: Мир, 1984. – 264 с.

2. Технология системного моделирования / Е.Ф. Аврамчук, А.А. Вавилов, С.В. Емельянов и др. – М.: Машиностроение; Берлин: Техник, 1988. – 520 с.

3. Применение микропроцессорных средств в системах передачи информации / Б.Я. Советов, О.И. Кутузов, Ю.А. Головкин, Ю.В. Аветов. – М.: Высшая школа, 1987. – 256 с.

4. Бобыр Е.И., Батин О.Ю, Соломатин А.В. Развитие математического аппарата Е-сетей для моделирования сложных систем // Системи обробки інформації. – Харків : НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 1999. – Вип. 2(6). – С. 74 - 77.