

УДК 021.8 + 025.1

ББК 78.34

## ТРИАДНО-СЕТЕВЫЕ ДОРОЖНЫЕ КАРТЫ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ

Юдицкий С. А.<sup>1</sup>

(ФГБУН Институт проблем управления  
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

*Рассмотрена графодинамика дорожных карт процессов развития систем различного назначения. Введена базовая модель «индикаторная сеть» и на ее основе построена комплексная модель «триадно-сетевая дорожная карта», отображающая динамику целей, действий и показателей на заданном временном горизонте развития. Предложен интерактивный алгоритм имитационного моделирования развития с формированием последовательности периодов стабильности, разделенных критическими точками, в которых осуществляется преобразование дорожной карты.*

Ключевые слова: цели, действия, показатели, триадно-сетевая дорожная карта, двудольный граф, индикаторное выражение, период стабильности, критическая точка.

### 1. Введение

Дорожные карты представляют собой известный наглядный способ графической интерпретации процессов развития систем на долгосрочную перспективу, отражающий различные пути достижения системой экспертно заданного конечного состояния. Разработка дорожных карт является в основном творческим процессом, их согласование и периодическую корректировку рекомендуется проводить в форме экспертных семинаров.

---

<sup>1</sup> Семен Абрамович Юдицкий, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (yuseab@yandex.ru).

В этой связи несомненный эффект дала бы алгоритмизация и последующая компьютеризация процесса построения и анализа дорожной карты с применением интерактивного имитационного моделирования на всех этапах ее жизненного цикла. Однако эта задача, по нашим данным, пока формально не поставлена и не решена. Предлагаемую работу следует рассматривать как попытку восполнить имеющийся пробел на основе «триадного моделирования» [5].

Суть триадного моделирования заключается в следующем. Ключевыми параметрами процесса развития любой системы являются: цели, к достижению которых стремится развивающаяся система; действия, направленные на достижение целей; показатели, определяющие состояние системы. Параметры отображаются лингвистическо-балльными переменными, характеризующимися словесной и количественной оценкой (в виде числа баллов). Цели, действия и показатели образуют три взаимодействующих уровня модели развития, где значения переменных, связи между ними, а также связи между уровнями и связи системы с внешней средой могут изменяться при развитии системы. Каждый уровень моделируется так называемой индикаторной сетью [6] – двудольным графом, дополненным продукционными выражениями типа «ЕСЛИ – ТО» на базе логических формул (индикаторными выражениями). Совокупность трех упомянутых уровней образует динамическую модель «Триадно-сетевая дорожная карта (ТДК)». Проводя имитационное моделирование ТДК на заданном временном интервале, получаем описание динамики целей, действий и показателей в дискретном времени.

Анализируемый временной горизонт процесса развития системы (горизонт прогнозирования) состоит из  $n \geq 1$  «участков стабильности», на которых изменяются только значения параметров, но остаются неизменными их состав и взаимосвязи. Другими словами, участок характеризуется фиксированной ТДК. Участки стабильности разделены критическими точками, определяемыми как моменты появления «предупреждения» (например, выход показателя за пределы допустимого диапазона значений, недостижение цели за нормативное время, «зависание» процесса из-за недостаточности ресурсов или ошибочной по-

следовательности действий и т.д.). В критических точках выполняется преобразование ТДК – изменение состава и/или взаимосвязей параметров путем операций над графами и корректировки индикаторных выражений.

Каждому участку стабильности на горизонте моделирования ставится в соответствие ТДК. При этом начальную карту задает лицо, проводящее моделирование (ЛПМ). В ходе имитационного моделирования определяются критические точки, в которых ЛПМ трансформирует ТДК предыдущего участка в ТДК последующего участка стабильности. Таким образом, процесс развития в общем случае характеризуется  $(n - 1)$ -кратным изменением дорожной карты. Изменение по усмотрению ЛПМ производится на всех трех или лишь на некоторых уровнях карты и носит выборочный характер: выделяется фрагмент графового описания уровня, выделенный фрагмент «вырезается» и замещается другим фрагментом при сохранении преемственности в отношении остальной части графа уровня. Эта процедура подобна операции в медицине и потому названа «графохирургической» операцией [5].

Триадное моделирование является интерактивным в том смысле, что оно выполняется в форме диалога между компьютером и ЛПМ: компьютер отслеживает функционирование (развитие) системы на участке стабильности и фиксирует появление критической точки («предугрозы»), ЛПМ на основе полученной информации принимает решение и корректирует ТДК.

Статья имеет следующую структуру. В разделе 2 приводится определение и пример индикаторной сети, в разделе 3 рассмотрена ТДК на основе индикаторных сетей. В разделе 4 дано описание алгоритма интерактивного моделирования процесса развития системы на заданном временном горизонте, порождающего последовательность ТДК.

## **2. Индикаторные сети**

Определение индикаторной сети базируется на следующих понятиях.

1. Двудольный граф как статическая основа модели:

$$G = \langle P, T, \alpha, \alpha^* \rangle,$$

где  $P = \{p_i, i = 1, \dots, m\}$  – множество вершин-позиций;  
 $T = \{t_i, i = 1, \dots, n\}$  – множество вершин-переходов;  
 $\alpha: T \rightarrow 2^P$ ,  
 $\alpha^*: T \rightarrow 2^P$  – функции, задающие соответственно подмножества входных и выходных позиций перехода;  $2^P$  – множество всех подмножеств  $P$ .

Пример двудольного графа дан на рис. 1, где  $x_1, x_2$  – внешние переменные (имеют только выходные дуги);  $p_1, \dots, p_4$  – внутренние переменные (имеют входные и выходные дуги).

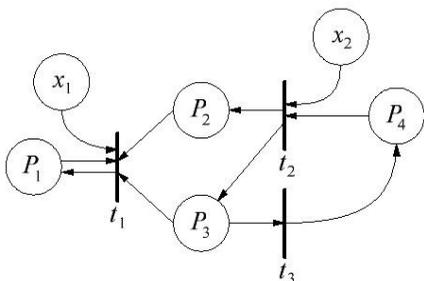


Рис. 1. Пример индикаторной сети: статическая модель

2. Индикатором сравнения будем называть булеву переменную вида  $y = (z_1 \# z_2)$ , где  $z_1, z_2$  – переменные, принимающие численные значения ( $z_2$  может быть константой);  $\#$  – знак бинарного отношения, принадлежащего множеству  $\{=, \neq, >, \geq, <, \leq\}$ . Индикатор принимает значение  $y = 1$ , если выполняется отношение  $\#$ , и  $y = 0$ , если не выполняется.

3. Индикаторной логической формулой (ИЛФ) назовем формальное представление, полученное путем применения конечное число раз к индикаторам сравнения логических операций дизъюнкции, конъюнкции, отрицания ( $\vee, \wedge, \neg$ ), а также, возможно, кванторов существования и всеобщности. Примеры ИЛФ для числовых переменных, зависящих от времени  $\tau$ , даны в таблице 1.

Таблица 1. Пример индикаторной сети: динамическая модель

	$F(t_i)$
$t_1$	$(P_1(\tau) > 1) \wedge (P_2(\tau) > 2) \wedge (P_3(\tau) \geq 3) \wedge (x_1(\tau) > 0) \wedge (x_1(\tau) \leq 10) \rightarrow (P_1(\tau + 1) = P_1(\tau) + 1)$
$t_2$	$(P_4(\tau) \geq 2) \wedge (P_4(\tau) < 8) \wedge ((x_2(\tau) = 1) \vee (x_2(\tau) = 5)) \rightarrow (P_2(\tau + 1) = P_2(\tau) - 1) \wedge (P_3(\tau + 1) = P_3(\tau) - 1)$
$t_3$	$(P_3(\tau) \geq 3) \rightarrow (P_4(\tau + 1) = P_4(\tau) + 2)$

4. *Индикаторным выражением* будем называть продукцию (нотацию ЕСЛИ–ТО) вида  $F_i$ :  $ИЛФ_{i1}(\tau) \rightarrow ИЛФ_{i2}(\tau + 1)$ , отображающую динамику перехода двудольного графа (таблица 1). Набор индикаторных выражений для всех переходов двудольного графа представляет собой динамическую модель системы.

Таблица 2. Пример индикаторной сети: лента поведения

$\tau$	0	1	2	3	4	5
$x_1$	5	4	4	5	5	5
$x_2$	5	5	5	5	5	5
$P_1$	3	4	5	5	5	5
$P_2$	4	3	2	1	0	0
$P_3$	4	3	2	1	0	0
$P_4$	3	5	7	7	7	7

5. *Индикаторная сеть* – это тройка:

$$IS = \langle G, F, \beta \rangle,$$

где  $G$  – двудольный граф,  $F = \{F_i, i = 1, \dots, e\}$  – множество индикаторных выражений;  $\beta: T \rightarrow F$  – функция, задающая пометку переходов графа индикаторными выражениями.

6. Динамика индикаторной сети отображается *лентой поведения* (таблица 2), которая строится с учетом ограничений на порядок срабатывания переходов двудольного графа (например, в момент  $\tau$  может сработать не более одного перехода, и для любого перехода известно подмножество переходов, которые могут сработать в следующий момент  $\tau + 1$ ). Процедура построения ленты поведения в общем случае включает следующие шаги:

- для начального момента  $\tau = 0$  задаем значения всех переменных;
- для каждого последующего момента  $\tau > 0$  для каждого перехода из вышеуказанного подмножества вычисляем значение ИЛФ( $\tau$ ) в левой части помечающего его индикаторного выражения;
- если ИЛФ( $\tau$ ) = 1, то вычисляем значения переменных, на которых в правой части выражения ИЛФ( $\tau + 1$ ) = 1, и помещаем эти значения в столбец  $\tau + 1$  ленты поведения (во избежание противоречивости левые части продукций для переходов, входящих в одно и то же подмножество, должны быть попарно ортогональны). Для остальных переменных переносим их значения из столбца  $\tau$  в столбец  $\tau + 1$ ;
- ленту обрываем при одинаковом заполнении соседних столбцов (не выполнено условие срабатывания ни для одного перехода) или если в каком-нибудь столбце заданное число параметров вышло за пределы допустимого диапазона значений.

На индикаторных сетях очевидным образом реализуется проверка позиции на ноль. Это доказывает эквивалентность IS и машины Тьюринга [4], т.е. возможность моделирования индикаторной сетью любой дискретной системы. Представление типовых фрагментов ряда известных расширений сети Петри [3, 4] индикаторными выражениями показано в таблице 3.

Таблица 3. Представление расширений сетей Петри индикаторными выражениями

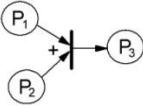
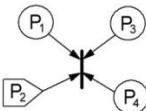
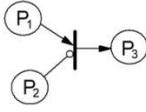
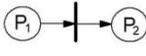
Тип перехода в расширении сети Петри	Графическое изображение	Индикаторное выражение
Исключающее ИЛИ		$((P_1(\tau) > 0) \wedge (P_2(\tau) = 0) \rightarrow (P_1(\tau + 1) = P_1(\tau) - 1) \wedge (P_3(\tau + 1) = P_3(\tau) + 1)) \vee ((P_1(\tau) = 0) \wedge (P_2(\tau) > 0) \rightarrow (P_2(\tau + 1) = P_2(\tau) - 1) \wedge (P_3(\tau + 1) = P_3(\tau) + 1))$

Таблица 3 (продолжение)

Тип перехода в расширении сети Петри	Графическое изображение	Индикаторное выражение
Переключатель		$((P_1(\tau) > 0) \wedge (P_2(\tau) = 0) \rightarrow (P_3(\tau + 1) = P_1(\tau) \wedge (P_4(\tau + 1) = 0)) \vee ((P_1(\tau) > 0) \wedge (P_2(\tau) = 1) \rightarrow (P_3(\tau + 1) = 0) \wedge (P_4(\tau + 1) = P_1(\tau)))$
Переход с запрещающей дугой		$(P_1(\tau) > 0) \wedge (P_2(\tau) = 0) \rightarrow (P_1(\tau + 1) = P_1(\tau) - 1) \wedge (P_3(\tau + 1) = P_3(\tau) + 1)$
Переход временной сети Петри		$(P_1(\tau) > 0) \wedge (\tau > a_{\min}) \wedge (\tau < a_{\max}) \rightarrow (P_1(\tau + 1) = P_1(\tau) - 1) \wedge (P_2(\tau + 1) = P_2(\tau) + 1),$ <p><math>a_{\min}, a_{\max}</math> – константы</p>

### 3. Триадно-сетевая дорожная карта

Как уже говорилось, ТДК состоит из трех взаимосвязанных индикаторных сетей (графов), позиции которых сопоставлены соответственно целям  $c_i$ , действиям  $d_i$ , показателям  $p_i$ . Воздействие внешней среды на графы обозначается переменными  $v_i$ . Пример ТДК дан на рис. 2, 3, 4. В формулах (1), (2), (3) показаны индикаторные выражения, моделирующие динамику срабатывания переходов каждого двудольного графа. Цели и действия характеризуются двоичными (булевыми) переменными, принимающими единичное значение, если цель достигнута, действие выполняется, и нулевое значение – в противном случае. При достижении каждой цели не должно быть превышено заданное нормативное время. Показателям и внешним воздействиям в общем случае сопоставляются числовые переменные с указанием диапазона допустимых значений.

На ТДК накладываются ограничения:

- граф целей не содержит циклов;

– если в графе показателей в какую-нибудь позицию  $p_i$  ведет более одной дуги, то знаки  $+$ ,  $-$  в индикаторах  $(p_i(\tau + 1) = p_i(\tau) \pm e)$ , где  $e$  – константа, содержащихся в правой части соответствующих индикаторных выражений, совпадают.

При введенных ограничениях граф целей, получив воздействие от графа действий, реализует цепочку переходов, завершающуюся равновесным состоянием, в котором не активирован ни один переход. В графе показателей при выполнении аналогичного процесса, инициированного графом действий, каждый показатель  $p_i$  либо монотонно возрастает, либо монотонно убывает.

Критическим будем считать такое состояние, в котором имеет место  $p_i > p_{i,\max}$  (при возрастании) или  $p_i < p_{i,\min}$  (при убывании), где  $[p_{i,\min}, p_{i,\max}]$  – диапазон допустимых значений показателя. В критическом состоянии графа показателей протекающий в нем процесс прерывается. При установлении равновесия в графе целей или/и критического состояния в графе показателей формируется сигнал обратной связи на граф действий – изменяется значение его соответствующей входной позиции. Одинаково обозначенные позиции, принадлежащие разным графам, интерпретируются как экземпляры (копии) одной и той же переменной. Изменение значения одной из этих позиций в тот же момент передается в остальные.

Проиллюстрируем вышесказанное на примере рис. 2, 3, 4. В результате срабатывания перехода  $t_1$  в графе действий (рис. 3) его выходная позиция  $p_1$ , а тем самым одноименная позиция графа показателей (рис. 4), получает приращение  $p_1 = 2$ . Примем, что показатели оцениваются по десятибалльной шкале. В графе показателей иницируется переходной процесс, завершающийся критическим состоянием в момент  $\tau = 8$  при значении  $p_3 = 11$ ,  $p_4 = 12$  (переменные  $p_3$ ,  $p_4$  превысили верхнюю границу допустимого десятибалльного интервала – таблица 4). Позиция  $p_3$  является входной для перехода  $t_8$  в графе действий. В результате срабатывания перехода  $t_2$  в графе действий принимают единичное значение оба экземпляра позиции  $c_1$  – в графах действий и целей. В графе целей (рис. 2) происходит переключение  $c_4 = 1$  с сохранением  $c_1 = 1$  и установлением равновесия. Позиция  $c_4$  в графе действий является входной для переходов

$t_4, t_5$ . Далее функционирование ТДК осуществляется аналогичным образом. При срабатывании перехода  $t_8$  в графе действий учитывается обратная связь как от графа целей, так и от графа показателей.

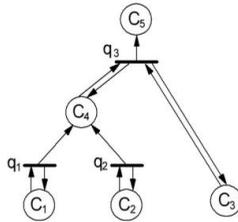


Рис. 2. Пример триадно-сетевой дорожной карты: граф целей

$$\Phi(q_1):(C_1 = 1) \wedge (C_4 = 0) \rightarrow (C_1 = 1) \wedge (C_4 = 1),$$

(1)  $\Phi(q_2):(C_2 = 1) \wedge (C_4 = 0) \rightarrow (C_2 = 1) \wedge (C_4 = 1),$

$$\Phi(q_3):(C_3 = 1) \wedge (C_4 = 1) \wedge (C_5 = 0) \rightarrow (C_3 = 1) \wedge (C_4 = 1) \wedge (C_5 = 1).$$

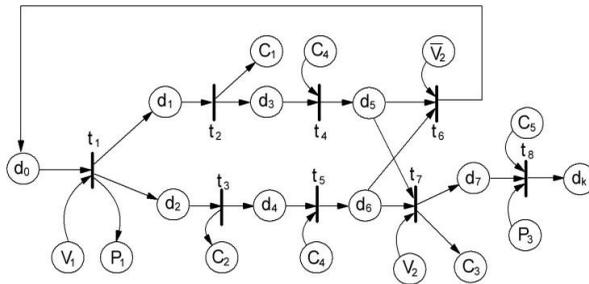


Рис. 3. Пример триадно-сетевой дорожной карты: граф действий

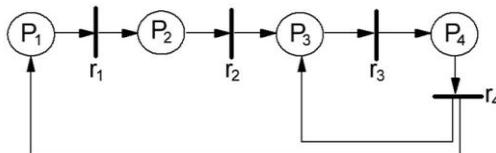


Рис. 4. Пример триадно-сетевой дорожной карты: граф показателей

$$\begin{aligned}
 & F(t_1) : d_0 = 1 \wedge (V_1 = 1) \wedge (P_1(\tau) > 3) \wedge (d_1 = 0) \wedge (d_2 = 0) \rightarrow \\
 & \rightarrow (d_0 = 0) \wedge (d_1 = 1) \wedge (d_2 = 1) \wedge (P_1(\tau + 1) = P_1(\tau) + 2), \\
 & F(t_2) : (d_1 = 1) \wedge (d_3 = 0) \wedge (C_1 = 0) \rightarrow (d_1 = 0) \wedge (d_3 = 1) \wedge (C_1 = 1), \\
 & F(t_3) : (d_2 = 1) \wedge (d_4 = 0) \wedge (C_2 = 0) \rightarrow (d_2 = 0) \wedge (d_4 = 1) \wedge (C_2 = 1), \\
 (2) \quad & F(t_4) : (d_3 = 1) \wedge (d_5 = 0) \wedge (C_4 = 1) \rightarrow (d_3 = 0) \wedge (d_5 = 1), \\
 & F(t_5) : (d_4 = 1) \wedge (d_6 = 0) \wedge (C_4 = 1) \rightarrow (d_4 = 0) \wedge (d_6 = 1), \\
 & F(t_6) : (d_5 = 1) \wedge (d_6 = 1) \wedge (d_0 = 0) \wedge (V_2 = 0) \rightarrow (d_5 = 0) \wedge (d_6 = 0) \wedge \\
 & \wedge (d_0 = 1), \\
 & F(t_7) : (d_5 = 1) \wedge (d_6 = 1) \wedge (d_7 = 0) \wedge (C_3 = 0) \wedge (V_2 = 1) \rightarrow (d_5 = 0) \wedge \\
 & \wedge (d_6 = 0) \wedge (d_7 = 1), \\
 & F(t_8) : (d_7 = 1) \wedge (d_k = 0) \wedge (C_5 = 1) \wedge (P_3 > 10) \rightarrow (d_7 = 0) \wedge (d_k = 1). \\
 \\
 & \Pi(r_1) : (P_1(\tau) \geq 2) \wedge (p_3 < 7) \rightarrow (P_2(\tau + 1) = P_2(\tau) + 2), \\
 (3) \quad & \Pi(r_2) : (P_2(\tau) \geq 4) \rightarrow (P_3(\tau + 1) = P_3(\tau) + 4), \\
 & \Pi(r_3) : (P_3(\tau) \geq 7) \rightarrow (P_4(\tau + 1) = P_4(\tau) + 3), \\
 & \Pi(r_4) : (P_4(\tau) \geq 6) \rightarrow (P_1(\tau + 1) = P_1(\tau) + 2) \wedge (P_3(\tau + 1) = P_3(\tau) + 2).
 \end{aligned}$$

Таблица 4. Пример триадно-сетевой дорожной карты:  
лента показателей

$\tau$	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
$r$	$t_1$	$r_1$	$r_2$	$r_3$	$r_4$	$r_3$	$r_4$	$r_3$	$r_4$	-
$P_1$	0	2	2	2	2	4	4	6	6	8
$P_2$	2	2	4	4	4	4	6	6	6	6
$P_3$	3	3	3	7	7	9	9	11	11	13
$P_4$	3	3	3	3	6	6	9	9	12	12

Поясним построение ленты показателей, представленной в таблице 4. Из графа показателей (рис. 4) следует порядок срабатывания переходов  $r_1 r_2 r_3 r_4 (r_1 \vee r_3) \dots$ , где после срабатывания  $r_1$  в момент  $\tau$  в следующий момент  $\tau + 1$  срабатывает  $r_2$ , после  $r_2$  срабатывает  $r_3$ , после  $r_3$  срабатывает  $r_4$ , после  $r_4$  может сработать  $r_1$  или  $r_3$ , и т.д. Срабатывание любого перехода  $r$  в момент  $\tau$  инициируется условием  $\text{ИЛФ}_{\text{лев}}(r) = 1$  в левой части выражения  $\Pi(r)$  – см. (3). В следующий момент  $\tau + 1$  происходит изменение

значений показателей в соответствии с правой частью  $\text{ИЛФ}_{\text{прав}}(r)$  этого выражения.

В ленте показателей в таблице 4 в начальный момент  $\tau = 0$  транспонированный вектор-столбец  $B(0) = (0, 2, 3, 3)$ , в момент  $\tau = 1$  вследствие воздействия от графа действий  $B(1) = (2, 2, 3, 3)$  и выполняется условие  $\text{ИЛФ}_{\text{лев}}(r_1) = 1$ . Это вызывает срабатывание  $r_1$ , в результате которого  $B(2) = (2, 4, 3, 3)$ , и т.д. В момент  $\tau = 5$  при  $B(5) = (4, 4, 9, 6)$  проверяются условия для переходов  $r_1$ ,  $r_3$ , для которых имеет место свойство ортогональности  $\text{ИЛФ}_{\text{лев}}(r_1) \wedge \text{ИЛФ}_{\text{лев}}(r_3) = 0$ , так как  $(p_3(\tau) < 7) \wedge (p_3(\tau) \geq 7) = 0$ . В момент  $\tau = 5$ , как и в последующий момент  $\tau = 7$ , выполняется условие  $\text{ИЛФ}_{\text{лев}}(r_3) = 1$ , и после перехода  $r_4$  срабатывает  $r_3$ .

#### **4. Алгоритм интерактивного моделирования развития систем на основе триадно-сетевых дорожных карт**

Алгоритм выполняется в виде последовательности шагов, иллюстрируемой блок-схемой на рис. 5. На шаге 1 формируется начальная ТДК для момента  $\tau = 0$ , соответствующего началу горизонта моделирования. При выполнении шага 1 последовательно вводятся конфигурации графа целей (этап 1.1), графа действий (этап 1.2), графа показателей (этап 1.3), устанавливаются связи между графами (этап 1.4), вводятся индикаторные выражения, «нагружающие» переходы графов (этап 1.5). На шаге 2, соответствующем периоду стабильного функционирования системы, осуществляется мониторинг процесса с определением наличия критической точки. Если точка до истечения длительности горизонта моделирования не обнаружена, то ЛПМ принимает решение о завершении эксперимента (конец работы алгоритма). Если критическая точка обнаружена, то переход к шагу 3 – при участии ЛПМ осуществляем преобразование ТДК (с применением «графохирургических» операций) для формирования дорожной карты следующего периода стабильности. Далее следует переход к шагу 2. Ниже более подробно рассмотрен алгоритм.

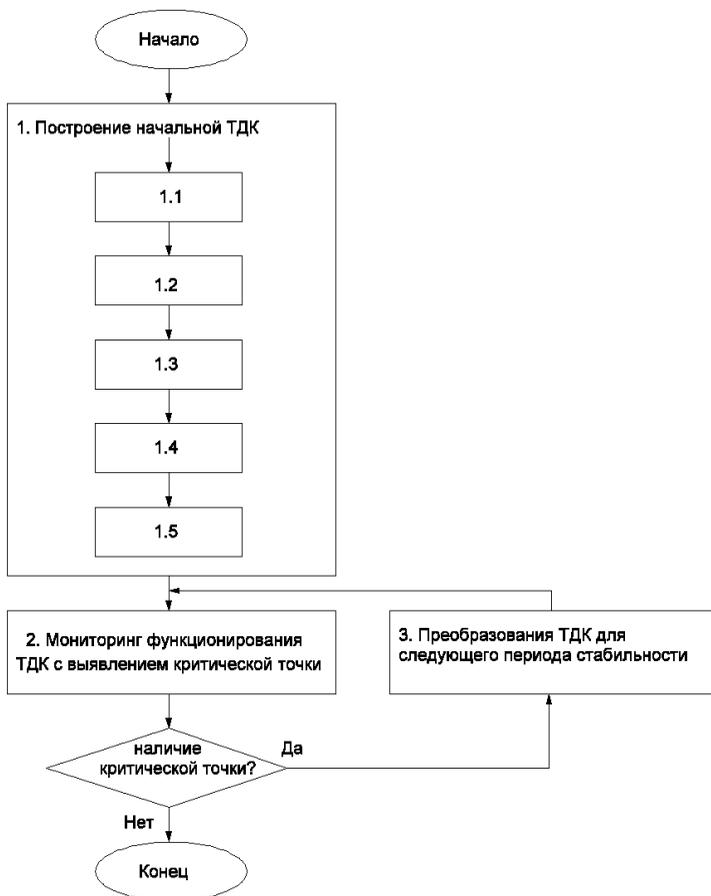


Рис. 5. Блок-схема алгоритма моделирования развития системы на основе триадно-сетевой дорожной карты

1. Построение ТДК для начального момента горизонта моделирования.

1.1. Формирование конфигурации графа целей.

Граф начинаем строить с позиции для главной (конечной) цели, являющейся итогом развития системы на данном горизонте. Далее вводятся позиции для непосредственно подчиненных ей целей (подцелей), достижение которых обу-

сравнивает достижение главной. Процедура повторяется для подцелей и т.д., пока не доходим до начальных целей, которым не подчинена никакая другая цель. Если главных целей несколько, то для каждой из них повторяем то же самое. В графе целей применяются два вида  $n$ -арных отношений «цель–подцели», при числе подцелей не менее двух: конъюнктивное и альтернативное. При конъюнктивном отношении обязательно достижение всех подцелей, при альтернативном – только одной. На графе первое отношение реализуется вершиной-переходом, в которую ведут дуги из позиций всех подцелей, а из нее дуга в позицию цели. При втором отношении вводится переход для каждой подцели. В графе целей переход интерпретируется как событие «Достижение цели является следствием достижения подцелей, которое после срабатывания перехода сохраняется». Для этого на графе проводятся «обратные» дуги из перехода в позиции подцелей. Целеполагание является предметом интеллектуальной деятельности ЛПМ. Психология целеполагания с акцентом на типовые ошибки, приводящие к неудаче, подробно рассмотрена в [2].

В примере на рис. 2 главная цель –  $c_5$ , начальные –  $c_1, c_2, c_3$ . Цели  $c_5$  подчинены подцели  $c_3, c_4$ , входящие в отношение конъюнктивности; цели  $c_4$  – подцели  $c_1, c_2$ , входящие в отношении альтернативности.

## 1.2. Формирование конфигурации графа действий.

В графе действий позиции соответствуют целенаправленным действиям, переходы – событиям завершения одних действий, которое синхронизировано с инициированием других. Для любого перехода пересечение подмножеств входных и выходных позиций (действий) пусто. Действия развернуты во времени, переходы срабатывают мгновенно. Дополнительно вводятся два «пустых» действия: начальное  $d_0$  и конечное  $d_k$ , интерпретируемые соответственно как подготовленность к запуску процесса (потока непустых действий) и его завершение.

В примере графа действий на рис. 3 в качестве входных/выходных позиций переходов помимо действий показана

ны копии позиций целей и показателей, а также внешние позиции. Таким образом моделируются взаимодействия между уровнями ТДК и связи системы с внешней средой. Переход  $t_1$  запускается, если выполнены начальные условия ( $d_0 = 1$ ) и подано внешнее воздействие ( $v_1 = 1$ ). Результатом срабатывания  $t_1$  является запуск действий  $d_1$ ,  $d_2$  и приращение показателя  $p_1$ . Разветвление процесса после прохождения верхней и нижней параллельных ветвей – выбор перехода  $t_6$  или  $t_7$ , определяется взаимно исключающими друг друга внешними воздействиями  $v_2 = 0$ ,  $v_2 = 1$ , и т.д.

### 1.3. Формирование конфигурации графа показателей.

В графе показателей позиции соответствуют ключевым показателям системы, переходы определяют факт влияния входного показателя на подмножество выходных показателей (переход имеет только одну входную дугу). Один и тот же показатель не может быть для перехода одновременно входным и выходным. Взаимозависимость показателей интерпретируется как причинно-следственная связь между состоянием входного показателя и скачкообразным изменением выходных показателей. В примере на рис. 4 показатель  $p_1$  влияет на  $p_2$ , показатель  $p_2$  – на  $p_3$ , показатель  $p_3$  – на  $p_4$ , показатель  $p_4$  – на  $p_1$  и  $p_3$ .

### 1.4. Установление связей между графами.

В общем случае каждый из трех графов ТДК может взаимодействовать с внешней средой и двумя остальными графами. Для моделирования взаимодействий используется «размножение» позиций – представление их в нескольких экземплярах (копиях) с совпадающими значениями соответствующей переменной. Если срабатывание перехода  $z$  графа  $g$ , принадлежащего ТДК, обусловлено внешней переменной  $x$  – параметром другого графа или воздействием среды, то в граф  $g$  в качестве входной позиции перехода  $z$  вводится копия  $x$ . Если же срабатывание перехода  $z$  воздействует на среду или изменяет значение параметра другого графа, то копия  $x$  вводится как выходная позиция перехода  $z$ . Переход  $z$  может иметь несколько входных и выходных копий позиций.

В примере на рис. 2, 3, 4 копирующие позиции  $v_i$ ,  $c_i$ ,  $p_i$  введены для переходов графа действий (рис. 3).

#### 1.5. Составление индикаторных выражений для переходов графа.

В полученных на предыдущих этапах шага 1 графах ТДК для каждого перехода вводится индикаторное выражение  $\text{ИЛФ}_{\text{лев}} \rightarrow \text{ИЛФ}_{\text{прав}}$ , где индикаторы сравнения в составе левой формулы взаимно однозначно соответствуют всем входным и выходным позициям перехода, а индикаторы в составе правой формулы – также всем входным и выходным позициям, за исключением выходных позиций  $v_i$  (внешние воздействия могут обуславливать переход, но его срабатывание не влияет на их значение).

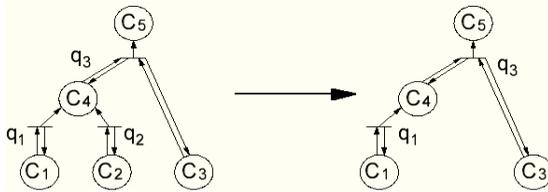
Описание внутри «индикаторных» скобок формируется следующим образом. Для *графа целей*: в составе  $\text{ИЛФ}_{\text{лев}}$  для подцелей  $c_i = 1$  и для цели  $c_j = 0$  значения  $p$ ,  $d$ ,  $v$  устанавливает ЛПМ. В формуле  $\text{ИЛФ}_{\text{прав}}$  допускаются только индикаторы  $c_j = 1$ . В *графе действий*: в  $\text{ИЛФ}_{\text{лев}}$  для индикаторов входных и выходных позиций перехода, сопоставленных действиям, вписывается соответственно  $d_i = 1$ ,  $d_j = 0$ , а для индикаторов других переменных – по выбору ЛПМ. Для  $\text{ИЛФ}_{\text{прав}}$  значения  $d$  изменяются на противоположные. Если срабатывание перехода графа действий вызывает достижение цели или/и изменение значения показателя, то это также фиксируется в  $\text{ИЛФ}_{\text{прав}}$ . В *графе показателей*: любой переход имеет одну входную и  $n \geq 1$  выходных позиций, соответственно индикаторное выражение  $\text{ИЛФ}_{\text{лев}}$  состоит из одного либо более, а  $\text{ИЛФ}_{\text{прав}}$  – из  $n$  индикаторов. Знаки сравнения и значения констант в индикаторах выбирает ЛПМ. Далее ЛПМ вводит логические знаки конъюнкции  $\wedge$ , дизъюнкции  $\vee$ , отрицания  $\neg$ , соединяющие полученные индикаторы. Таким образом, процедура преобразования графовой основы ТДК в индикаторные выражения переходов является интерактивной, она частично формализована и может выполняться автоматически, частично базируется на экспертных потенциях ЛПМ. Индикаторные выражения переходов графов целей, действий и показателей приведены в (1), (2), (3).

2. Мониторинг процесса функционирования системы на интервале стабильности.

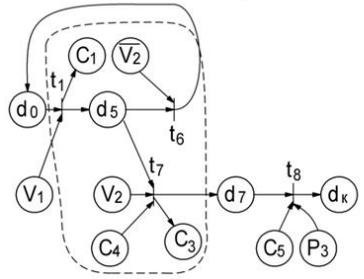
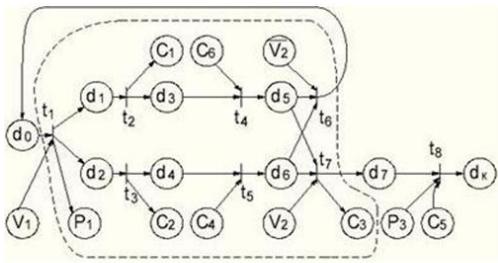
Результатом мониторинга является диаграмма динамики параметров ТДК, пример которой дан в таблице 5. Горизонтальными линиями на ней изображены интервалы единичного значения булевых переменных – внешних воздействий, целей, действий, а числами – балльные значения показателей. Интервалы внешних воздействий задает ЛПМ, руководствуясь своим представлением о возможном поведении внешней среды. Остальные параметры вычисляются для каждого такта – промежутка между моментами  $\tau$ ,  $\tau + 1$ ,  $\tau = 0, 1, \dots, N$ , согласно процедуре, изложенной в разделе 2. Критическая точка (момент), как уже говорилось ранее, соответствует «предугрозе»: например, выходу показателя за допустимые пределы, достижению цели после истечения нормативного времени и т.д. Пусть в примере (таблица 5) изменение показателей регламентируется десятибалльной шкалой, т.е. от 0 до 10 баллов, а цель  $c_5$  должна быть достигнута не позже конца пятого такта. Но в соответствии с диаграммой в таблице 5 при заданных начальных условиях в пятом такте показатель  $p_3$  превысил верхнюю границу шкалы, а цель  $c_5$  достигается только в седьмом такте. Следовательно, критической точкой является момент  $\tau = 6$ , и, начиная с шестого такта, рассмотрение можно было не продолжать.

3. Преобразование триадно-сетевой дорожной карты.

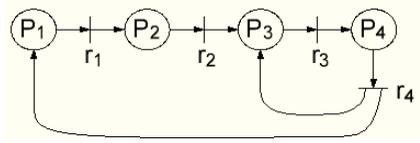
Для следующего периода стабильности преобразуем графы целей и действий в карте на рис. 2, 3, оставив без изменения граф показателей. Преобразование с применением метода «графохирургии» проиллюстрировано на рис. 6. Из графа действий «вырезаем» фрагмент с двумя параллельными ветвями, входным переходом  $t_1$  и выходными переходами  $t_6, t_7$  (обведен пунктиром в верхней части рис. 6б). Вместо него «вставляем» фрагмент с аналогичными входным и выходными переходами, не содержащий параллельных ветвей (обведен в нижней части рис. 6б). Во введенном фрагменте отсутствует целевая позиция  $c_2$ , которая удаляется и из графа целей (замещается пустым фрагментом), что показано на правом рис. 6а.



а)



б)



в)

Рис. 6. Пример преобразования триадно-сетевой дорожной карты для а) графа целей; б) графа действий; в) графа показателей

Таблица 5. Диаграмма динамики параметров ТДК в период стабильности ( $\tau$  – такт,  $\Phi$  – факторы)

$\Phi \backslash \tau$	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$v_1$									
$v_2$									
$c_1$									
$c_2$									
$c_3$									
$c_4$									
$c_5$									
$d_0$									
$d_1$									
$d_2$									
$d_3$									
$d_4$									
$d_5$									
$d_6$									
$d_7$									
$d_k$									
$p_1$	2	2	4	4	4	4	4	6	8
$p_2$	0	2	4	6	8	10	12	14	16
$p_3$	0	0	0	4	8	12	16	22	28
$p_4$	0	0	0	0	0	3	6	9	12

## 5. Заключение

Статья посвящена графодинамике дорожных карт – признанного инструментария прогнозирования и планирования процессов развития систем широкого назначения, в том числе процессов управления проектами, на заданном временном горизонте (графодинамика – это направление системного анализа, оперирующее переменными в форме графов и отношениями, определенными на графах [1]). Применительно к дорожным картам в статье акцент сделан на следующие факторы.

*Триадность развития*, определяемая динамикой взаимовлияния трех взаимосвязанных групп параметров – целей про-

цесса; действий, направленных на достижение целей; ключевых показателей, характеризующих состояние системы.

*Скачкообразность развития.* Горизонт прогнозирования состоит из периодов (участков) стабильности, разделенных критическими точками. На участке стабильности не меняется состав параметров (целей, действий, показателей) и связи между ними, но изменяются значения параметров. Динамика развития системы отображается триадной моделью [5]. При этом на участке стабильности могут обнаруживаться признаки «предугрозы», фиксируемые в виде критической точки на временной оси (точки бифуркации). А это, в свою очередь, инициирует перестройку триадной модели дорожной карты – изменения состава параметров и связей между ними.

*Перестройка триадно-сетевой дорожной карты.* Преобразование в критической точке триадной модели может касаться всех трех ее составляющих, либо части из них. Преобразование осуществляется в два этапа: на первом корректируется графовая основа (графы целей, действий, показателей), на втором – графы трансформируются в индикаторные выражения переходов. Последнее требует участия аналитика. Коррекцию графов производят не «с чистого листа», а с учетом преемственности путем «графохирургических операций» [5] – выделяют фрагмент графа и замещают его другим фрагментом, возможно пустым. Процедура имитационного моделирования триадно-сетевых дорожных карт является интерактивной, частично она выполняется автоматически, частично человеком (имеет место органическое сочетание «искусственного и естественного интеллекта»).

## Литература

1. АЙЗЕРМАН М.А., ГУСЕВ Л.А., ПЕТРОВ С.В., СМИРНОВА И.Н. *Динамический подход к анализу структур, описываемых графами (основы графодинамики)* // Автоматика и телемеханика. – 1977. – №7. – С. 135–151; №9. – С. 123–136.
2. ДЕРНЕР Д. *Логика неудачи.* – М.: Смысл, 1997. – 243 с.
3. КОТОВ В.Е. *Сети Петри.* – М.: Наука, 1984. – 158 с.
4. ПИТЕРСОН ДЖ. *Теория сетей Петри и моделирование систем.* – М.: Мир, 1984. – 264 с.

5. ЮДИЦКИЙ С.А. *Моделирование динамики многоагентных триадных сетей*. – М.: Синтег, 2012. – 112 с.
6. ЮДИЦКИЙ С.А., МАГЕРГУТ В.З. *Триадное моделирование на индикаторных сетях поведения дискретных систем // Тринадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием КИИ-2012: Труды конференции. Том 3. Белгород, 2012. – С. 234–241.*

## **THE TRIADIC-NETWORKED ROADMAPS FOR SYSTEMS DEVELOPMENT**

**Semen Yuditsky**, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences RAS, Moscow, professor ([yuseab@yandex.ru](mailto:yuseab@yandex.ru))

Abstract: The graph dynamics is considered of roadmaps of systems development processes for various applications. The basic model of «indicatory network» is introduced. This model is used to build a comprehensive model of a «triadic-networked roadmap» showing the dynamics of objectives, actions, and indicators on the required time horizon of development. An interactive algorithm is proposed for development simulation with formation of a sequence of stability periods separated with critical points where the roadmap is being transformed.

Keywords: objectives, actions, indicators, triadic-networked roadmap, a bipartite graph, indicatory expression, stability period, the critical point.

*Статья представлена к публикации  
членом редакционной коллегии Л. И. Микуличем*