

Чуев А.В., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ИНДИКАТОРНЫХ СЕТЕЙ*

chuev_a@mail.ru

В статье рассмотрены вопросы построения сетевых моделей систем различной природы. Рассмотрены понятия индикаторной сети Петри, многоагентной триадной сети, бинарной индикаторной сети, ООО-модели (три «О» модели), линейной проекции дорожной карты. Приведены примеры графового описания каждого из понятий, описана их область применения, а также примеры практического применения. Приведен пример ленты поведения, отражающей динамику сетевой модели. Даны рекомендации по выбору той или иной сетевой модели в зависимости от задач, решаемых в процессе моделирования. В качестве универсального средства моделирования во всех случаях применен математический аппарат индикаторных сетей.

Ключевые слова: индикаторная сеть Петри, имитационное моделирование, многоагентная триадная сеть, бинарная индикаторная сеть, ООО-модель, линейная проекция дорожной карты.

Введение. При решении различных задач немаловажную роль играет предварительное моделирование системы. При проектировании многоагентных систем (МАС) [1, 2] необходимо построить модели как самих агентов, там и их взаимосвязей. При проектировании систем управления технологическими процессами строятся модели самих процессов и управляющих автоматов [3]; при реализации проектов по развитию предприятий и организаций, по созданию новых предприятий, внедрению новых технологий и продуктов, а также проектов в сфере государственного управления широкой популярностью пользуется модель «дорожная карта» [4]; при оптимизации работы систем массового обслуживания проводится, как правило, их имитационное моделирование [5] и т.д. Достаточно удобно применять во всех перечисленных сферах сетевые подходы к построению моделей. При этом моделирование сложных систем возможно на основе универсального математического аппарата индикаторных сетей Петри, который в различных его модификациях может быть использован при моделировании систем и процессов различной природы, в том числе перечисленных выше.

1. Индикаторная сеть

Понятие индикаторной сети было введено С.А. Юдицким в [1]. Индикаторная сеть (1) включает в себя пять составляющих, описанных ниже:

$$IS = \langle G, F, \beta, \pi_1, \pi_2 \rangle \quad (1)$$

1. $G = \langle P, T, \alpha, \alpha^* \rangle$ – двудольный граф, 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 . Переходы отображают причинно-следственную связь между позициями двудоль-

ного графа в дискретном времени $\tau=0,1,\dots,k$. Пусть p и q соответственно входная и выходная позиции некоторого перехода (из p ведет дуга в переход, а из перехода ведет дуга в q). Переменные, сопоставленные позициям, являются либо булевыми, принимающими два значения (Истина: 1, Ложь: 0), либо численными, которые могут принимать любые значения на заданном интервале. Для булевых переменных p, q имеет место причинно-следственное отношение: если в момент τ $p(\tau)=1$, то в следующий момент $\tau+1$ $q(\tau+1)=1$. Для численных переменных: если $p(\tau)$ принадлежит интервалу $[p_{\min}, p_{\max}]$, то $q(\tau+1)=q(\tau)+\delta$, где $\delta \neq 0$ ($\delta > 0$ или $\delta < 0$). Переход интерпретируется как событие, изменяющее значение (состояние) позиций.

2. $F = \{F_i, i=1, \dots, e\}$ – множество индикаторных выражений. Индикаторным выражением будем называть продукцию (логическую нотацию «ЕСЛИ – ТО») вида F_i : $ИЛФ_{i1}(\tau) \rightarrow ИЛФ_{i2}(\tau+1)$, детализирующую причинно-следственный механизм «Условие – Действие» при выполнении перехода двудольного графа, то есть переход от одной индикаторной логической формулы (ИЛФ) к другой.

3. $\beta: T \rightarrow F$ – функция, задающая пометку переходов графа дополнительными условиями, заданными экспертом.

4. $\pi_1: P \times T \rightarrow N$, $\pi_2: T \times P \rightarrow N$ – функции «взвешивания» числами натурального ряда соответственно входных и выходных дуг переходов, $N = \{0, 2, \dots, n\}$. Если дуга графа не помечена, то по умолчанию ее вес равен 1. Под весом входной дуги перехода понимается количество меток во входной позиции, которое изымается из нее при срабатывании перехода. Под весом выходной дуги – количество меток, которое переходит в выходную позицию.

Динамика индикаторной сети отображается лентой поведения, которая строится с учетом

ограничений на порядок срабатывания переходов двудольного графа (например, в момент t может сработать не более одного перехода, и для любого перехода известно подмножество переходов, которые могут сработать в следующий момент $t+1$).

Покажем универсальность применения индикаторных сетей при построении ряда сетевых моделей.

2. Многоагентная триадная сеть

На основе индикаторной сети в [1] предложена модель многоагентной триадной сети. Агент в такой сети представляет собой совокупность трех взаимодействующих индикаторных сетей, названных графами целей, действий и показателей. Пример триадной сети дан на рис. 1.

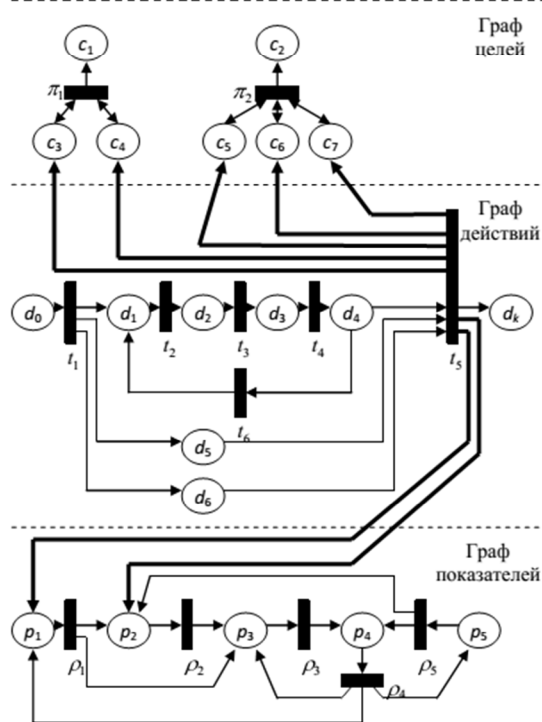


Рис. 1. Графовое представление триадной модели логистического подразделения сети супермаркетов

Такое представление удобно при моделировании сложных систем, поскольку в нем орга-

нично сочетаются цели, которые должны быть достигнуты в процессе работы системы, действия, направленные на достижение этих целей, и ключевые показатели функционирования работы системы. Графовая форма описания модели наглядно показывает причинно-следственные связи и взаимовлияние параметров системы друг на друга.

В качестве систем, для которых может применяться триадная модель, помимо логистического подразделения сети супермаркетов, можно назвать любую организационную систему, в которой стоит задача балансировки ролевых процессов, сложный технический объект, для которого стоят задачи надежности и анализа возможных последствий возникновения тех или иных событий. Триадная модель также может применяться при моделировании ликвидации чрезвычайных ситуаций и при построении дорожных карт развития систем.

3. Бинарная индикаторная сеть

Однако, как показывает практика, не во всех случаях необходима такая избыточность, как представлено в триадной модели. Существует целый спектр систем, в которых ключевые показатели оказывают небольшое влияние либо вообще не влияют друг на друга. В этом случае отпадает необходимость в построении графа показателей, и триадная структура вырождается в бинарную. Такая сеть названа бинарной индикаторной сетью (БИС) либо, применительно к дорожным картам, бинарной сетевой дорожной картой (БСДК) [6].

Бинарная индикаторная сеть в отличие от триадной состоит уже не из трех, а из двух взаимодействующих графов – целей и действий. Показатели теперь входят в индикаторные формулы как дополнительные условия срабатывания переходов. На рис. 2 приведен пример БИС, моделирующей технологический процесс выращивания искусственных сапфиров [7].

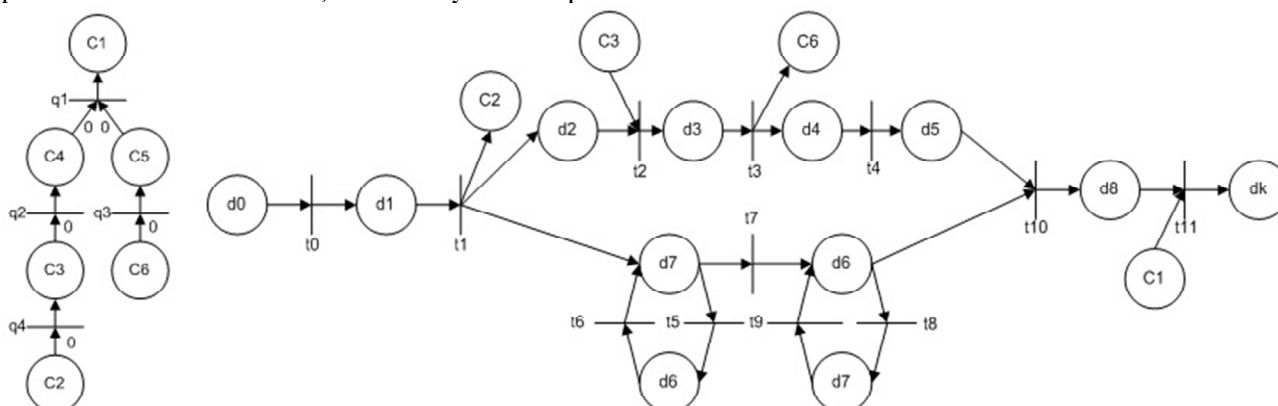


Рис. 2. Графы целей и действий БИС технологического процесса выращивания искусственных сапфиров

Индикаторные формулы для примера на рис.2:

Для графа целей:

$$\Phi(q_1): (C_4=1) \wedge (C_5=1) \wedge (C_1=0) \rightarrow (C_4=1) \wedge (C_5=1) \wedge (C_1=1)$$

$$\Phi(q_2): (C_3=1) \wedge (C_4=0) \rightarrow (C_3=1) \wedge (C_4=1)$$

$$\Phi(q_3): (C_6=1) \wedge (C_5=0) \rightarrow (C_6=1) \wedge (C_5=1)$$

$$\Phi(q_4): (C_2=1) \wedge (C_3=0) \rightarrow (C_2=1) \wedge (C_3=1).$$

Для графа действий:

$$F(t_0): (d_0=1) \wedge (P_6=1) \wedge (P_5=1) \wedge (d_1=0) \rightarrow (d_0=0) \wedge (P_6=0) \wedge (P_5=0) \wedge (d_1=1)$$

$$F(t_1): (d_1=1) \wedge (C_2=0) \wedge (P_4 > T_{nv}) \wedge (d_2=0) \wedge (d_6=0) \wedge (\tau \leq \tau_2) \rightarrow \\ \rightarrow (d_1=0) \wedge (C_2=1) \wedge (d_2=1) \wedge (d_6=1)$$

$$F(t_2): (d_2=1) \wedge (C_3=1) \wedge (d_3=0) \rightarrow (d_2=0) \wedge (C_3=1) \wedge (d_3=1)$$

$$F(t_3): (d_3=1) \wedge (d_4=0) \rightarrow (d_3=0) \wedge (d_4=1)$$

$$F(t_4): (d_4=1) \wedge (d_5=0) \rightarrow (d_4=0) \wedge (d_5=1)$$

$$F(t_5): (d_7=1) \wedge (d_6=0) \wedge (P_4 < T_{nv}) \wedge (\tau < \tau_3) \rightarrow (d_7=0) \wedge (d_6=1)$$

$$F(t_6): (d_6=1) \wedge (d_7=0) \wedge (P_4 > T_{nv}) \rightarrow (d_6=0) \wedge (d_7=1)$$

$$F(t_7): (d_7=1) \wedge (d_6=0) \wedge (\tau > \tau_3) \rightarrow (d_7=0) \wedge (d_6=1)$$

$$F(t_8): (d_6=1) \wedge (d_7=0) \wedge (P_4 > T_{zad}) \wedge (\tau < \tau_4) \rightarrow (d_6=0) \wedge (d_7=1)$$

$$F(t_9): (d_7=1) \wedge (d_6=0) \wedge (P_4 < T_{nv}) \rightarrow (d_7=0) \wedge (d_6=1)$$

$$F(t_{10}): (d_5=1) \wedge (d_6=1) \wedge (P_2=1) \wedge (P_3=1) \wedge (d_8=0) \wedge (\tau > \tau_4) \rightarrow \\ \rightarrow (d_5=0) \wedge (d_6=0) \wedge (P_2=0) \wedge (P_3=0) \wedge (d_8=1)$$

$$F(t_{11}): (d_8=1) \wedge (C_1=1) \wedge (P_1=0) \wedge (d_k=0) \wedge (\tau \leq \tau_1) \rightarrow \\ \rightarrow (d_8=0) \wedge (C_1=1) \wedge (P_1=1) \wedge (d_k=1).$$

Как видно, взаимодействие между графами осуществляется за счет введения в граф действий дублирующих целевых позиций из графа целей. Индикаторные формулы нагружаются дополнительными переменными, задающими условия срабатывания переходов.

Область применения БИС, как и триадных сетей, тоже достаточно широка. С одной стороны, БИС удобно использовать, когда нужно оценить общую картину развития событий, а с другой – бинарная модель находит свое применение и при моделировании технологических процессов и даже управляющих автоматов, при этом в такой модели будет присутствовать и интеллектуальная составляющая (граф целей), служащая мотивационной основой для совершения действий. Примерами моделей на основе БИС могут служить модель технологического процесса выращивания искусственных сапфиров [7], модель управляющего автомата процесса вытягивания искусственного сапфира, модели алгоритмов обработки изображений состояния монокристалла сапфира и создания вертикального градиента температур [8]. На основе БИС может быть предложена и дорожная карта «Обеспечение информационной безопасности многофункционального центра (МФЦ)», разработка которой актуальна в настоящее время в связи с требованиями законодательства в области информационной безопасности.

4. ООО-модель

Еще одной моделью, основанной на индикаторных сетях, стала ООО-модель (три «О» модель) [9]. Эта модель была разработана для

моделирования систем массового обслуживания. Она включает в себя три уровня (три «О»): обеспечения, обслуживания и отчетности. Уровни обеспечения и обслуживания сопоставимы с графом действий и включают в себя один или несколько циклических графов, описывающих соответственно последовательности действий при обеспечении системы ресурсами и при обслуживании заявок. Уровень отчетности в свою очередь сопоставим с графами целей и показателей и отражает совокупность и взаимосвязь основных показателей работы системы. Он тоже циклический, поскольку расчет производится каждый отчетный период. Пример графового описания ООО-модели магазина самообслуживания дан на рис. 3.

Как и в предыдущих случаях графовое описание ООО-модели дополняется индикаторными формулами, задающими условия срабатывания переходов. В ООО-модели использован агентный подход к моделированию (уровни обеспечения и обслуживания состоят из множества графов, каждый из которых описывает действия отдельного агента – заявки, посетителя, специалиста приема документов и т.д.). Преимущества такого подхода состоят в том, что можно детально отследить действия каждой из составляющих системы, повышается надежность и отказоустойчивость системы. Кроме того, децентрализованный подход позволяет изменять отдельные компоненты системы без существенной ее перестройки.

Применять ООО-модели можно при моделировании множества различных систем массо-

вого обслуживания, однако наиболее ощутимый эффект будут давать модели систем, в которых присутствует человек как заявитель или как об-

работчик заявок. При этом ООО-модель будет являться одновременно и инструкцией или планом действий человека.

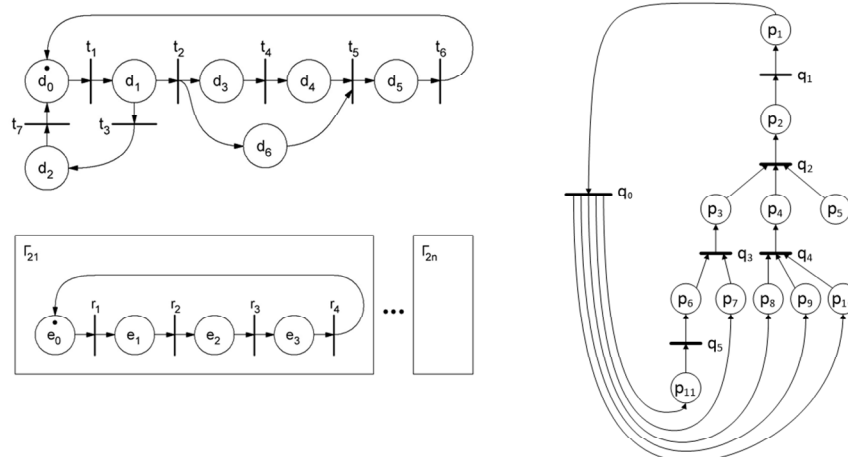


Рис. 3. ООО-модель магазина самообслуживания (слева сверху – уровень обеспечения, слева внизу – уровень обслуживания, справа – уровень отчетности)

Примеры построенных ООО-моделей: модель магазина самообслуживания [9], модель многофункционального центра предоставления государственных и муниципальных услуг [10].

Результатом проведения имитационного эксперимента с помощью каждой из описанных

выше моделей является лента поведения, которая представляет собой сводную таблицу изменения в дискретном времени всех переменных модели. Пример ленты поведения для ООО-модели на рис. 3 дан на рис. 4.

| τ | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| d_0 | | | | | | | | | | | | | |
| d_1 | | | | | | | | | | | | | |
| d_2 | | | | | | | | | | | | | |
| d_3 | | | | | | | | | | | | | |
| d_4 | | | | | | | | | | | | | |
| d_5 | | | | | | | | | | | | | |
| d_6 | | | | | | | | | | | | | |
| e_0 | | | | | | | | | | | | | |
| e_1 | | | | | | | | | | | | | |
| e_2 | | | | | | | | | | | | | |
| e_3 | | | | | | | | | | | | | |
| p_1 | p_{11} | p_{11} | p_{11} | p_{11} | p_{11} | p_{11} | p_{11} | p_{11} | p_{12} | p_{12} | p_{12} | p_{12} | p_{12} |
| p_2 | p_{21} | p_{21} | p_{21} | p_{21} | p_{21} | p_{21} | p_{21} | p_{22} | p_{22} | p_{22} | p_{22} | p_{22} | p_{22} |
| p_3 | p_{31} | p_{31} | p_{31} | p_{32} | p_{32} | p_{33} | p_{33} | p_{33} | p_{34} | p_{34} | p_{35} | p_{35} | p_{35} |
| p_4 | p_{41} | p_{41} | p_{41} | p_{41} | p_{41} | p_{41} | p_{41} | p_{42} | p_{42} | p_{42} | p_{42} | p_{42} | p_{42} |
| p_5 | p_{51} | p_{51} | p_{51} | p_{51} | p_{51} | p_{51} | p_{51} | p_{52} | p_{52} | p_{52} | p_{52} | p_{52} | p_{52} |
| p_6 | p_{61} | p_{61} | p_{61} | p_{61} | p_{62} | p_{62} | p_{62} | p_{62} | p_{63} | p_{63} | p_{63} | p_{63} | p_{64} |
| p_7 | p_{71} | p_{71} | p_{71} | p_{72} | p_{72} | p_{73} | p_{73} | p_{73} | p_{74} | p_{74} | p_{75} | p_{75} | p_{75} |
| p_8 | p_{81} | p_{81} | p_{81} | p_{81} | p_{81} | p_{81} | p_{81} | p_{82} | p_{82} | p_{82} | p_{82} | p_{82} | p_{82} |
| p_9 | p_{91} | p_{91} | p_{91} | p_{91} | p_{91} | p_{91} | p_{91} | p_{92} | p_{92} | p_{92} | p_{92} | p_{92} | p_{92} |
| p_{10} | p_{101} | p_{101} | p_{101} | p_{101} | p_{101} | p_{101} | p_{101} | p_{102} | p_{102} | p_{102} | p_{102} | p_{102} | p_{102} |
| p_{11} | p_{111} | p_{111} | p_{111} | p_{111} | p_{112} | p_{112} | p_{112} | p_{112} | p_{113} | p_{113} | p_{113} | p_{113} | p_{114} |

Рис. 4. Пример ленты поведения

5. Линейная проекция дорожной карты

Наконец, последней сетевой моделью, рассматриваемой в данной статье, основой для которой стала индикаторная сеть, является линейная проекция дорожной карты (ЛПДК) [11].

ЛПДК несколько отличается от описанных ранее моделей и базируется на применении табличного языка и языка индикаторной логики. Пример таблиц ЛПДК дан на рис. 5.

| | $P(t)$ | $x(t)$ | | $P(t)$ | $x(t)$ | | $P(t)$ | $x(t)$ | | $P(t)$ | $x(t)$ |
|-------|---------|--------|---|---------|--------|---|---------|--------|---|---------|--------|
| P_1 | 0 | 1 | → | 0 | 1 | → | 0 | 1 | → | 0 | 1 |
| P_2 | +1 | 0 | → | 0 | 1 | → | 0 | 1 | → | 0 | 1 |
| P_3 | -1 | 0 | → | 0 | 1 | → | 0 | 1 | → | 0 | 1 |
| P_4 | [0,+2] | 1 | → | [+1,+3] | 1 | → | [+2,+4] | 0 | → | [+1,+4] | 0 |
| P_5 | [0,-2] | 0 | → | [-1,-3] | 0 | → | [-2,-4] | 0 | → | [-1,-5] | 0 |
| P_6 | [-2,+2] | 0 | → | [-3,+3] | 0 | → | [-4,+4] | 0 | → | [-5,+5] | 0 |
| | $t=0$ | | | $t=1$ | | | $t=2$ | | | $t=3$ | |

Рис. 5. Пример линейной проекции дорожной карты

ЛПДК представляет собой последовательность таблиц, строки которых соответствуют параметрам p_i , а пары столбцов внутри таблицы – соответственно состоянию системы $S(t)$ и векторной логической переменной $X(t)$ в моменты $t=0, 1, \dots, m$. В клетки левого столбца таблицы вписываются значения параметров в точечном или интервальном. Параметру $p_i(t)$ ставится в соответствие логическая переменная $x_i(t)$, называемая индикатором (значения индикаторов вписываются в правый столбец таблицы). Переход от одного состояния задается функцией $\Phi_i(x_j(t))$, где $i=0, 1, \dots, m$ – индексы моментов, выделенных на временной шкале, $j=1, \dots, n$ – индексы индикаторов параметров системы. Связки, соединяющие соседние состояния $t, t+1$, изображаются стрелками, ведущими из строчек таблицы предыдущего состояния в соответствующие строчки последующего состояния. Стрелки (связки) помечаются числами, выражающими приращение (положительное, отрицательное или нулевое) значения параметров.

Как следует из названия, ЛПДК это модель, предназначенная только для построения дорожных карт. Однако, как и предыдущие модели она основывается на языке индикаторной логики. Можно сказать, что ЛПДК является дальнейшим упрощением триадной и бинарной моделей.

Заключение. Как видно, на сегодняшний день разработан целый ряд моделей, основанных на индикаторных сетях и индикаторной логике и позволяющих решать целый спектр задач. Применение того или иного подхода и выбор соответствующей модели в первую очередь обусловлен потребностями лица, проводящего моделирование. К примеру, если необходимо детально отследить работу специалистов и прохождения заявок по каналам системы массового обслуживания, то целесообразно использовать ООО-модель, а если нужно увидеть общую картину, то достаточно будет бинарной модели. Если основной целью построения дорожной карты является отслеживание показателей системы, тогда уместно применение линейной проекции дорожной карты, а если же важен порядок действий для достижения целей, то нужно использовать триадную или бинарную структуру. При этом при моделировании во всех случаях можно использовать математический аппарат индикаторных сетей, который можно принять за универсальный аппарат моделирования сложных сетевых систем.

**Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Белгородской области в рамках проекта № 14-41-08016 «р_офи_м».*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Юдицкий С.А. Моделирование динамики многоагентных триадных сетей. М.: СИНТЕГ, 2012. 112 с.
2. Ивашкин Ю.А. Агентные технологии и мультиагентное моделирование систем: учеб. пособие. М: МФТИ, 2013. – 268 с.
3. Юдицкий С.А., Магергут В.З. Логическое управление дискретными процессами. М.: Машиностроение, 1987. 175 с.
4. Карасев О.И. Методология разработки технологических дорожных карт [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://cent-energy.ru/doc/rm/Karasev.pdf> (дата обращения: 08.09.2015).
5. Хинчин А.Я. Работы по математической теории массового обслуживания; под ред. Б.В. Гнеденко. М.:Физматгиз, 1963. 236 с.
6. Юдицкий С.А., Магергут В.З., Чуев А.В. Бинарные сетевые дорожные карты процессов управления проектами // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2013. №4. С. 1-9.
7. Чуев А.В. Магергут В.З. Юдицкий С.А. Моделирование дискретных химико-технологических процессов на основе бинарных индикаторных сетей Петри / Математическое и компьютерное моделирование в биологии и химии. Перспективы развития: II Международная научная Интернет-конференция: материалы конф.: в 2 т. // Сервис виртуальных конференций Pax Grid; сост. Синяев Д.Н. (Казань, 24 сентября 2013 г.), Казань: ИП Синяев Д.Н., 2013. Т.2. С.102-108.
8. Чуев А.В., Магергут В.З., Юдицкий С.А. Построение бинарной имитационной модели процесса выращивания искусственных сапфиров / XXVIII - Международная научная конференция «Математические Методы в Технике и Технологиях ММТТ- 28», 2015, 7 с. (в печати).
9. Юдицкий С.А., Магергут В.З., Чуев А.В., Желтова Л.В. Моделирование виртуальных систем массового обслуживания на индикаторных сетях Петри // Современные системы искусственного интеллекта и их приложения в науке. Всероссийская научная интернет-конференция с международным участием: материалы конф. (Казань, 25 июня 2013 г.), Казань: ИП Синяев Д.Н., 2013. С.157-162.
10. Чуев А.В., Юдицкий С.А., Магергут В.З. Расширение концепции ООО-модели для систем массового обслуживания на примере многофункционального центра предоставления государственных и муниципальных услуг // Научные ведомости БелГУ. 2015. № 1(198), вып. 33/1. С. 85-93.

11. Юдицкий С.А. Оглядываясь назад. Моделирование. Медитация. Сопереживание. Сб. статей. 2013-2015. М: 2015. 104 с. (Гл. 2. До-

рожные карты с принятием решений на основе гибридных индикаторных сетей).

Chuev A.V.

MODELING OF DIFFERENT TYPES OF COMPLEX SYSTEMS BASED ON INDICATOR NETWORKS

The article discusses the construction of network models of different nature systems. Considered the concepts of indicator Petri nets, multi-agent triad network, binary indicator network, OOO-model (the three "O" model), linear roadmap projection. Examples of the graph description of each of the concepts, described their scope, as well as examples of practical application. An example of the behavior tape, reflecting the dynamics of the network model. Recommendations on the choice of a network model, depending on the problems to be solved in the process of modeling. As a universal means of simulation in all cases applied mathematical apparatus of indicator networks.

Key words: indicator Petri net, simulation, multi-agent triad network, binary indicator network, OOO-model, linear roadmap projection.