

УДК 004.822

## ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ ГИБРИДНОГО АВТОМАТА ДЛЯ ФОРМАЛИЗАЦИИ ПОВЕДЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АГЕНТОВ

**Клебанов Б.И., Антропов Т.В.***ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России  
Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, e-mail: kbi11@yandex.ru*

Одним из перспективных направлений цифровой экономики является применение имитационных моделей для определения и обоснования направлений развития территориальных образований – городов, регионов, отдельных населенных пунктов. Особую роль это моделирование играет при анализе и создании кибер-физических-социальных систем – одного из основных направлений цифровизации общества. В статье рассматривается возможность применения модели гибридного автомата для описания процессов поведения и развития агентов, обладающих в заданной среде определенными наборами потребностей, ресурсов и средств их реализации. Принято, что поведение индивидуумов определяется их потребностями, которые реализуются с помощью типовых рецептов поведения (паттернов). Модель агента представлена расширенным гибридным автоматом, учитывающим наличие альтернатив реализации потребностей агентов и функции выбора при переходе автомата из одного состояния в другое. Векторное поле, описывающее динамику изменения непрерывных переменных автомата, дополнено функциями генерации потребности, выбора и исполнения рецепта удовлетворения потребности. Рассмотрены частные модели обобщенного гибридного автомата, соответствующие объектам физической пространственно-распределенной среды и, в частности, статичного объекта, стареющего объекта с известным жизненным циклом, агентов с одной и несколькими потребностями, модель системы взаимодействующих агентов.

**Ключевые слова:** активный агент, потребность, гибридный автомат, взаимодействие агентов

## THE APPLICATION OF A HYBRID AUTOMATON MODEL FOR FORMALIZATION OF THE INTELLECTUAL AGENTS BEHAVIOR

**Klebanov B.I., Antropov T.V.***Ural Federal University n.a. the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg,  
e-mail: kbi11@yandex.ru*

One of the promising areas of the digital economy is the use of simulation models for determining and justifying the directions of territorial entities development – cities, regions, individual settlements. This modeling plays a special role in the analysis and creation of cyber-physical-social systems – one of the main directions of the digitalization of society. The article discusses the possibility of using the model of a hybrid automaton to describe the processes of behavior and development of agents that have certain sets of needs, resources and means of their realization in a given environment. It is accepted that the behavior of individuals is determined by their needs, which are realized by using typical behavior recipes (patterns). The agent model is represented by an extended hybrid automaton that takes into account alternatives for realizing the needs of agents and the selection function when the automaton transits from one state to another. The vector field describing the dynamics of changing continuous variables of the automaton is supplemented with the functions of generating demand, selecting and executing a recipe for satisfying needs. The paper considers particular models of a generalized hybrid automaton corresponding to the objects of a physical spatially distributed medium and, specifically, a static object, an aging object, agents with one or several needs, the model of a system of interacting agents.

**Keywords:** active agent, need, hybrid automaton, agents interaction

Моделирование, основанное на социальных агентах, получило широкое распространение в мире, так как оно помогает решать многие задачи, связанные с поведением человека в различных ситуациях. Особую роль это моделирование играет при анализе и создании кибер-физических социальных систем – одного из основных направлений цифровизации общества. Одним из интереснейших вопросов этих исследований является анализ поведения отдельных агентов в определенных условиях внешней среды, а также оценка влияния агентов на развитие среды [1–3]. В качестве модели поведения агентов чаще всего используется модель убеждений, желаний и намерений (англ. belief, desire, and intention (BDI)

model), которая представляет в основном процесс выбора пути реализации потребности. Целью данной работы является формализация процессов генерации и реализации потребностей.

Большинство рассматриваемых в литературе моделей агентов основаны на дискретно-событийных моделях [4]. В данной работе рассматривается возможность применения модели гибридного автомата для описания процессов поведения и развития агентов, обладающих определенными наборами потребностей, ресурсов и средств их реализации.

Гибридный автомат – это направленный граф, каждому узлу которого приписана динамическая система или гибридный ав-

томат, а дугам – условия смены поведения и последовательности действий, сопровождающих смену поведения [5–7]. Гибридные автоматы отличаются от дискретных автоматов наличием как непрерывных, так и дискретных состояний.

За основу используемого в данной работе определения агента взята модель гибридного автомата, представленная в [5]. Модель агента можно представить расширенным гибридным автоматом:

$$H = (Q, X, F, Init, Inv, E, G, R, Evt, P, S),$$

где  $Q$  – множество дискретных состояний  $q$ ;  $X$  – множество непрерывных переменных – характеристик агента;

$F: Q \times X \rightarrow X$  – векторное поле, описывающее динамику изменения непрерывных переменных автомата в рамках конкретных дискретных состояний, которое включает следующие функции:

$fg_i(p_i)$  – функция генерации  $p_i$  потребности;  $fv_i(p_i)$  – функция выбора рецепта удовлетворения  $p_i$  потребности, если на выбор тратится время;

$fe_i(r_i)$  – функция исполнения  $r_i$  рецепта удовлетворения  $p_i$  потребности (экземпляры функций);

$Init \subseteq Q \times X$  – множество начальных состояний;

$Inv: Q \rightarrow 2^X$  – область допустимых значений непрерывных переменных автомата для каждого  $q$ ;

$E \subseteq Q \times Q$  – множество дуг-переходов между дискретными состояниями;

$G: E \rightarrow 2^X$  – предикаты перехода по соответствующей дуге между парой дискретных состояний;

$R: E \times X \rightarrow 2^X$  – множество правил, определяющих изменение значений непрерывных переменных автомата при переходе по соответствующей дуге между парой дискретных состояний;

$Evt$  – множество событий, происходящих в системе автоматов;

$P$  – множество потребностей  $p$ ;

$S$  – множество событий, влияющих на переходы внутри автомата.

Далее рассмотрены модели объектов, которые являются частными случаями приведенной модели и могут быть использованы для представления различных классов объектов пространственной модели.

#### Модель простого статического объекта

К этому классу объектов относятся физические объекты среды, которые условно не изменяются с течением времени. Математическая модель такого объекта может быть представлена следующим образом:

$Q = \{q1\}$  – множество состояний агента

$q1$  – статическое состояние покоя.

$F$  – функции изменения внутренних параметров объекта отсутствуют

$Init = q1$  – начальное состояние

$X, E, G, R, P \subseteq \emptyset$

$Evt$  (создание, удаление) – возможные события.

#### Модель «стареющего» объекта

Это физические объекты среды, которые изменяются с течением времени и могут иметь при этом несколько состояний. Переход в предыдущее состояние в них невозможен.

Рассмотрим такой объект на примере ресурса. Гибридный автомат, соответствующий этому ресурсу, в случае двух состояний можно представить так:

$Q = \{q1; q2\}$  – множество состояний объекта

$q1$  – динамическое состояние ресурса – можно использовать;

$q2$  – динамическое состояние ресурса – нельзя использовать;

$F$  – функция изменения внутренних параметров объекта:

$$f(r(t)) = r(t - 1) - \delta,$$

где  $r$  – показатель возможности использования ресурса. При  $r(t) = 0$  объект исчезает.

Функция действует постоянно во множестве состояний  $Q$ .

$Init = q1$  – начальное состояние, так как будем считать ресурс сразу после создания возможным к использованию.

$E$  – множество дуг переходов

$e(q1; q2) \in E$  – дуга между  $q1$  и  $q2$ .

$G = \{g1\}$  – множество условий переходов

$g1: q1 \rightarrow q2$ , если  $r(t) \leq rS$ , где  $rS$  – пороговое значение показателя возможности использования.

Следует отметить, что создание и удаление объекта может быть выделено в отдельные состояния, если они являются продолжительными по времени. Здесь и далее будем считать это время ничтожно малым, поэтому не будем вводить эти состояния, а ограничимся событиями:

$Evt$  (создание, удаление)

Рассмотрим модель агента, обладающего 1 потребностью. Как отмечалось в [8–10], потребность можно реализовать разными рецептами.

Пусть цель агента – потребление ресурса, количество которого не ограничено.

$Q = \{q1; M\}$  – множество состояний агента

$q1$  – состояние покоя (потребности отсутствуют);

$M$  – допустимое множество состояний потребления ресурса, соответствующее возможным рецептам потребления;

$q2 \in M$  – состояние потребления ресурса, соответствующее выбранному рецепту;

$fg_1$  – функция уменьшения контролируемого внутреннего параметра агента с течением времени в состоянии  $q1$ .

$$fg_1(rIn(t)) = rIn(t-1) - \delta,$$

где  $rIn$  – внутренний параметр ресурса агента,  $\delta$  – величина, на которую изменяется  $rIn$  за один такт.

$fv_1$  – функция выбора рецепта удовлетворения потребности потребления ресурса.

$fe_1$  – функция увеличения контролируемого внутреннего параметра агента при реализации выбранного рецепта потребления в состоянии  $q2$ .

$$fe_1(rIn(t)) = rIn(t-1) + \alpha - \delta,$$

где  $\alpha$  – величина приращения  $rIn$  при потреблении ресурса.

Начальным состоянием автомата может быть любое  $q \in Q$ ;

$E$  – множество дуг переходов;

$e(q1; q2) \in E$  – дуга, между  $q1$  и  $q2$ ;

$P\{p_1\}$  – множество потребностей, состоящее из одной потребности  $p_1$  в данном случае.

Пусть  $rInT$  – критическое значение параметра  $rIn$ , при котором возникает потребность.

Множество возможных событий  $S\{s_1, s_2\}$ , где

$s_1: fg_1(rIn(t)) = fg_1(rInT)$  – возникновение потребности  $p_1$

$s_2: fe_1(rIn(t)) = \max$  – потребность  $p_1$  удовлетворена

$G$  – множество условий переходов между  $q1$  и  $q2$

$g1: q1 \rightarrow q2$ , если произошло событие  $s_1$ ;

$g2: q2 \rightarrow q1$ , если произошло событие  $s_2$ .

$R \in \emptyset$  – никакие значения переменных специальным образом не изменяются при переходах состояний.

Рассмотрим модель агента с двумя потребностями: потребления и пополнения ресурса.

$Q = \{q1; q2; q3\}$  – множество состояний агента

$q1$  – динамическое состояние покоя;

$q2$  – динамическое состояние потребления ресурса;

$q3$  – динамическое состояние пополнения ресурса.

$$P\{p_1, p_2\},$$

где  $p_1$  – потребность потребления ресурса;

$p_2$  – потребность пополнения запасов.

$fg_1$  – функция уменьшения внутреннего параметра ресурса агента с течением времени. Данная функция выполняется во всех состояниях.

$$fg_1(rIn(t)) = rIn(t-1) - \delta$$

$fv_1$  – функция выбора рецепта удовлетворения потребности потребления ресурса.

$fv_2$  – функция выбора рецепта удовлетворения потребности пополнения ресурса.

$fe_1$  – функция увеличения внутреннего параметра ресурса для  $q2$ .

$$fe_1(rIn(t)) = rIn(t-1) + \alpha$$

$fe_2$  – функция пополнения внешнего ресурса агента для  $q3$ .

$$fe_2(rOut(t)) = rOut(t-1) + \beta,$$

где  $rOut$  – параметр внешнего ресурса у агента,  $\beta$  – величина, на которую увеличивается  $rOut$  за один такт.

$fg_2$  – функция расходования агентом внешнего ресурса для  $q2$ .

$$fg_2(rOut(t)) = rOut(t-1) + \gamma,$$

где  $\gamma$  – величина, на которую уменьшается  $rOut$  за один такт.

Начальным состоянием автомата может быть любое  $q \in Q$ .

Пусть  $rOut$  – критическое значение имеющегося у агента внешнего ресурса для потребления,  $rInT$  – критическое значение внутреннего параметра  $rIn$ .

Множество событий  $S$  в данном случае:

$s_1: fg_1(rIn(t)) = fg_1(rInT)$  – возникновение потребности  $p_1$

$s_2: fe_1(rIn(t)) = \max p1$  – потребность  $p_1$  удовлетворена

$s_3: fg_2(rOut(t)) = fg_2(rOutT)$  – возникновение потребности  $p_2$

$s_4: fe_2(rOut(t)) = \max p2$  – потребность  $p_2$  удовлетворена

$s_5: fe_2(rOut(t)) = 0$  – количество внешнего ресурса равно 0

$G$  – условия переходов

$g1: q1 \rightarrow q2$ , если  $s_1 \& fe_2(rOut(t)) > fe_2(rOutT)$ ;

$g2: q2 \rightarrow q1$ , если  $s_2$ ;

$g3: q1 \rightarrow q3$ , если  $s_3$ ;

$g4: q3 \rightarrow q1$ , если  $s_4 \& fg_1(rIn(t)) > fg_1(rInT)$ ;

$g5: q3 \rightarrow q2$ , если  $s_1 \& s_4$ ;

$g6: q2 \rightarrow q3$ , если  $s_5$ .

Модель взаимодействия агентов при обмене ресурсами. В основе взаимодействия лежит необходимость удовлетворения определенной потребности агентом, но невозможность или нежелание сделать это в одиночку. Так как в данной статье мы не касаемся выбора, то будем считать, что агент A1 выбрал для взаимодействия A2.

После того как участники взаимодействия определены, агенты переходят в состояние заключения договора, либо минуя его, а затем начинают исполнять выбранные планы удовлетворения потребности. Будем считать договор потребностью агента, а со-

стояние договора будем выделять в отдельное состояние гибридного автомата этого агента.

$Q = \{q_1; q_2; q_3\}$  – множество состояний автомата

$q_1$  – динамическое состояние относительного покоя агентов (внутренние процессы, внешние процессы, отношения с внешней средой) – это сумма состояний  $A_1$  и  $A_2$ .

$q_2$  – состояние процесса заключения договора между агентами;

$q_3$  – состояние процесса обмена;

$F_1$  – функции изменения внутренних параметров агента  $A_1$

$F_2$  – функции изменения внутренних параметров агента  $A_2$

В данном случае в  $F_1$  и  $F_2$  используются формулы модели агента с двумя потребностями, рассмотренной ранее.

$G$  – условия переходов

$g_1: q_1 \rightarrow q_2$  – возникла потребность обмена у  $A_1$ , у  $A_2$  не возникла:

$$A1_{next}(t) \leq A1_{next}T; A2_{next}(t) > A2_{next}T,$$

где  $A1_{next}(t)$  – текущее наличие у  $A_1$  требуемого ресурса,

$A1_{next}T$  – пороговое значение у  $A_1$  требуемого ресурса,

$A2_{next}(t)$  – текущее наличие у  $A_2$  требуемого ресурса,

$A2_{next}T$  – пороговое значение у  $A_2$  требуемого ресурса.

$g_2: q_1 \rightarrow q_2$  – возникла потребность у  $A_2$ , у  $A_1$  не возникла:

$$A2_{next}(t) \leq A2_{next}T; A1_{next}(t) > A1_{next}T,$$

$g_3: q_1 \rightarrow q_2$  – возникла потребность у  $A_1$  и  $A_2$ :

$$A1_{next}(t) \leq A1_{next}T; A2_{next}(t) \leq A2_{next}T,$$

$g_4: q_2 \rightarrow q_1$  – установка связи, состояние ожидания,

$g_5: q_1 \rightarrow q_3$  – обмен,

$g_6: q_2 \rightarrow q_2$  – разрыв связи,

$g_7: q_3 \rightarrow q_1$  – завершение обмена.

Предложенная модель может быть использована в рамках алгоритма заключения договора:

1. Огласка ролей участников.

2. Ожидание согласия/несогласия участников с условиями.

3. Переход в состояние удовлетворения потребности в договоре (в случае, если все участники согласны) или выход из состояния договора и переход к выбору участника (в случае, если участники не согласны).

Пункт 3 может быть дополнен поиском компромисса:

3.1 корректировка условий участниками при несогласии с предложенными;

3.2 корректировка планов агента, огласка  $\rightarrow$  3.1

## Выводы

В рамках проведенного исследования получены следующие результаты:

1. Предложена расширенная модель гибридного автомата, учитывающая поведение активных агентов в процессе реализации потребностей.

2. Рассмотрены частные модели гибридных автоматов, соответствующие объектам среды обитания, которые могут быть использованы при разработке систем имитационного моделирования и управления развитием территориальных объектов.

## Список литературы

1. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса: Новый диалог человека с природой. М.: Прогресс, 1986. 432 с.
2. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р. Социальное моделирование – новый компьютерный прорыв (агент-ориентированные модели). М.: Экономика, 2013. 296 с.
3. Ali Orhan Aydin, Mehmet Ali Orgun. The Reactive-Causal Architecture: Radar Task Simulation. Journal of Artificial Societies and Social Simulation. 2012. [Electronic resource]. URL: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/15/4/5.html> (date of access: 22.03.2019).
4. Aksyonov K., Bykov E., Aksyonova O. Agent-directed resource conversion process model design principles. Simulation Series. 2016. № 48 (1). P. 84–89.
5. Бычков А.С. Достаточные условия экспоненциальной устойчивости нулевого стационарного состояния гибридного автомата // Математичні машини і системи. 2007. № 3,4. С. 168–175.
6. Смирнов А.В., Кашевник А.М., Пономарев А.В., Савосин С.В. Онтологический подход к организации взаимодействия сервисов интеллектуального пространства при управлении гибридными системами // Интеллектуальные системы и технологии. 2014. № 04. С. 42–51. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.isa.ru/aidt/images/documents/2014-04/42\\_51.pdf](http://www.isa.ru/aidt/images/documents/2014-04/42_51.pdf) (дата обращения: 28.02.2019).
7. Сениченков Ю.Б. Численное моделирование гибридных систем. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2004. 206 с.
8. Klebanov B., Riabkina E., Antropov T. The principles of multi-agent models of development based on the needs of the agents. Proceedings of the 35th Chinese Control Conference. CCC 2016. 2016. P. 7551–7555. DOI: 10.1109/ChiCC.2016.7554553.
9. Klebanov B.I., Antropov T.V. Cycle of the needs satisfaction, and information support of the society development simulation system. AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1836. Issue 1. P. 020039. DOI: 10.1063/1.4981979
10. Клебанов Б.И., Парфенов Ю.П., Антропов Т.В. Рецепт поиска и выбора в мультиагентной модели развития общества // Фундаментальные исследования. 2017. № 9–2. С. 317–321.