

15. Kureichik V., Gerasimenko E. Multi-Commodity Maximum Flow Determining in a Fuzzy Graph with Vitality Degrees, *Proceedings of 11th International Conference on Application of Information and Communication Technologies, AICT 2017, Moscow, Russia*, pp. 347-351.
16. Gerasimenko E.M. Nahozhdenie potoka minimal'noy stoimosti v transportnoy seti metodom ranzhirovaniya matematicheskogo ozhidaniya nechetkih funktsiy stoimostey [Finding the flow of the minimum cost in the transport network by ranking the expectation of fuzzy cost functions], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 4 (129), pp. 247-251.
17. Gerasimenko E.M. Nahozhdenie potokov v transportnyh setyah v usloviyah nechetkosti i chastichnoy neopredelennosti: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk [Finding flows in transport networks in conditions of fuzziness and partial uncertainty: abstract. cand. of eng. sc. diss.]. Taganrog, 2014, 22 p.
18. Kirik E.S., Dekterev A.A., Litvintsev K.Yu., Harlamov E.B., Malyshev A.V. Matematicheskoe modelirovanie evakuatsii pri pozhare [Mathematical modeling of evacuation in case of fire], *Matematicheskoe modelirovanie* [Mathematical modeling], 2014, Vol. 26, No. 1, pp. 3-16.
19. Samoshin D.A. Sostav lyudskih potokov i parametry ih dvizheniya pri evakuatsii: monografiya [Composition of human flows and parameters of their movement during evacuation: monograph]. Moscow: Akademiya GPS MCHS Rossii, 2016, 210 p.
20. Yusoff M., Ariffin J., Mohamed A. Optimization Approaches for Macroscopic Emergency Evacuation Planning: A Survey, *International Symposium on Information Technology*, 2008, Vol. 3, pp. 1-7.
21. Yueming, C., Deyun, X. Emergency evacuation model and algorithms, *Journal of Transportation Systems Engineering & Information Technology*, 2008, Vol. 8 (6), pp. 96-100.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.В. Боженок.

Герасименко Евгения Михайловна – Южный федеральный университет; e-mail: egerasimenko@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371621; к.т.н.; кафедра систем автоматизированного проектирования; к.т.н.; доцент.

Gerasimenko Evgeniya Michailovna – Southern Federal University; e-mail: egerasimenko@sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371621; the department of CAD; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 519.712.2

DOI 10.23683/2311-3103-2019-4-26-36

Л.А. Гладков, Н.В. Гладкова

ЭВОЛЮЦИОННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КАК ИНСТРУМЕНТ РАЗРАБОТКИ МНОГОАГЕНТНЫХ СИСТЕМ*

Предлагается методика эволюционного проектирования автономных агентов и многоагентных систем (МАС), на основе которой осуществляется разработка и реализация нечетких и гибридных моделей формирования агентов. Рассмотрены существующие подходы к проектированию информационных систем на основе многоагентных организаций. Проанализированы особенности и недостатки существующих подходов. Отмечено, что использование принципов теории эволюционного развития, разработка новых подходов, использующих природные аналоги, позволяет повысить эффективность действующей методологии проектирования многоагентных систем. Описана модель взаимодействия агентов в мультиагентной системе. Рассмотрены различные подходы к эволюционному проектированию агентов и многоагентных систем, которые могут опираться на различные модели эволюции. Представлена формальная постановка задачи эволюционного проектирования искусственных систем. Выделены принципиальные проблемы, возникающие при создании общей теории эволюции агентов и многоагентных систем. Рассмотрены особенности различных моделей и уровней эволюции. Разработана концепция проектирования агентов и многоагентных систем, согласно которой процесс проектирования включает в себя базовые компоненты самооргани-

* Исследование выполнено при поддержке РФФИ (проект № 19-01-00715).

защиты, в том числе процессы взаимодействия, скрещивания, адаптации к среде и т.д. Предложена модель формирования агента – потомка, на основе анализа возможных видов взаимодействия агентов – родителей в процессе эволюционного проектирования. Построена общая методика эволюционного проектирования агентов и мультиагентной системы. Разработаны и описаны различные типы операторов кроссинговера, сформулирована идея создания агентств (семей) как единиц эволюционирующих многоагентных систем. Разработана и реализована программная система поддержки эволюционного проектирования агентов и многоагентных систем. Представлено краткое описание проведенных вычислительных экспериментов, подтверждающих эффективность предложенного метода.

Многоагентные системы; интеллектуальные организации; эволюционное проектирование; гибридные модели; генетические алгоритмы.

L.A. Gladkov, N.V. Gladkova

EVOLUTIONARY DESIGN AS A TOOL FOR DEVELOPING MULTI-AGENT SYSTEMS

The article proposes a methodology for the evolutionary design of autonomous agents and multi-agent systems (MAS), on the basis of which the development and implementation of fuzzy and hybrid models of the formation of agents is carried out. Existing approaches to the design of information systems based on multi-agent organizations are considered. Analyzed the features and disadvantages of existing approaches. It is noted that the use of the principles of the theory of evolutionary development, the development of new approaches that use natural analogues, makes it possible to increase the effectiveness of the existing methodology for designing multi-agent systems. A model of agent interaction in a multi-agent system is described. Different approaches to the evolutionary design of agents and multi-agent systems, which can be based on different models of evolution, are considered. A formal formulation of the evolutionary design problem of artificial systems is presented. The fundamental problems that arise when creating a general theory of the evolution of agents and multi-agent systems are highlighted. The features of various models and levels of evolution are considered. The concept of designing agents and multi-agent systems has been developed, according to which the design process includes the basic components of self-organization, including the processes of interaction, crossing, adaptation to the environment, etc. A model of forming an agent - a descendant, based on the analysis of possible types of agent interaction - parents in the process of evolutionary design is proposed. A general methodology for the evolutionary design of agents and a multi-agent system has been built. Various types of crossover operators were developed and described, the idea of creating agencies (families) as units of evolving multi-agent systems was formulated. A software system has been developed and implemented to support evolutionary design of agents and multi-agent systems. A brief description of the performed computational experiments confirming the effectiveness of the proposed method is presented.

Multi-agent systems; intellectual organizations; evolutionary design; hybrid models; genetic algorithms.

Введение. В настоящее время актуальной задачей при разработке и построении информационных систем и технологий в различных отраслях социальной и экономической активности человека является их интеллектуализация, т.е. придание создаваемым информационным системам функций обычно выполняемых человеком [1, 2]. Такими функциями можно считать работу по анализу и принятию решений в условиях неполной, нечеткой или противоречивой входной информации, поиск и выделение в массивах входной информации ранее неизвестных, нетривиальных, но практически полезных закономерностей, их оценка и интерпретация [3, 4].

Методы и подходы, применяемые для проектирования информационных систем на основе многоагентных организаций, требуют предварительного решения определенного перечня вопросов, в том числе определение необходимых функций и типов агентов, выбор используемых протоколов коммуникации [5–7]. Однако при этом, как правило, не учитываются возможности использования механизмов самоорганизации, законов эволюции, принципов кооперации агентов в МАС.

Одной из возможностей повышения эффективности действующей методологии проектирования МАС является использование принципов теории эволюционного развития, новых подходов, использующих природные аналоги. Важным моментом является возможность использования в процессе проектирования синергетических принципов, теории самоорганизации. Любая самоорганизация предполагает кооперацию агентов в многоагентной системе, она предполагает возможность адаптации агента к среде и наличие некоторой схемы эволюции [8].

Одним из наиболее эффективных на сегодняшний день инструментариев при решении поставленных задач повышения «интеллектуальности» информационных систем является использование гибридных математических моделей сочетающих в себе достоинства различных методов вычислительного интеллекта, таких например, как эволюционные вычисления, нейросетевые модели, биоинспирированные методы, мультиагентные технологии [5, 6, 9–13].

Постановка задачи. Одной из основных задач построения эффективных интеллектуальных информационных систем является создание программы агента, которая реализует функцию агента, преобразуя входные воздействия в ответные реакции.

В настоящее время известны различные подходы и методы построения искусственных агентов и мультиагентных систем, в частности, методологии восходящего проектирования на основе ролей агентов и взаимодействий между ними (Gaia, MASE, PASSI, TROPOS и др.) [14, 15], методологии нисходящего проектирования в многомерном пространстве критериев и т.п.

Классическая методология требует построения множества моделей, которые определяют спецификацию многоагентной системы. Каждая модель состоит из компонентов и взаимоотношений между ними. Разрабатываемые модели разделяются на внешние и внутренние. Внешние модели относятся к системному уровню описания: основными компонентами в них являются сами агенты, взаимодействия между которыми описываются с использованием отношений наследования, агрегации и т.п. Таким образом, разрабатываются абстрактные структуры агентов. Внутренние модели предлагаются для каждого отдельного класса агентов и описывают внутренние структуры агентов: их мнения, цели, планы и т.д. [5, 6].

Обычно выделяются два основных вида внешних моделей: модель агентов и модель взаимодействий, определяющая способы связи (коммуникации) между агентами. Модель агентов разделяется на модель классов агентов и модель экземпляров агентов. Эти две модели определяют классы агентов и их возможные реализации, связанные между собой отношениями наследования, агрегации и др. Классы агентов определяют различные атрибуты агентов, включая атрибуты, задающие мнения, цели и планы агента.

Назначение модели агентов состоит в описании различных типов агентов, существующих в системе. Типы агентов определяются множеством ролей. Поэтому разработчик может предложить объединить несколько сходных ролей в один тип агентов. Главным критерием на этой стадии является эффективность реализации: проектировщик стремится к оптимизации решений, и объединение нескольких ролей есть один из способов достижения этой эффективности [5, 6].

Примером, когда принимается подобное решение, может служить ситуация, в которой вычислительные ресурсы, требуемые для каждого агента, очень велики. Тогда, весьма желательно сократить число агентов, поэтому принимается решение об объединении нескольких ролей в одном агенте. Здесь необходимо стремиться к нахождению разумного компромисса между простотой понимания функциональных характеристик агента и эффективностью его реализации.

Модель взаимодействия агентов включает в себя описание услуг (сервисов), взаимосвязей и обязательств, существующих между агентами. Она состоит из множества протоколов, определяемых для каждого межролевого взаимодействия. Здесь под протоколом мы понимаем схему взаимодействия. Общее понятие протокола включает следующий набор атрибутов:

- ◆ назначение: краткое описание смысла взаимодействия (например, «запрос информации», «выдача задания»);
- ◆ инициатор: роль, ответственная за инициирование взаимодействия;
- ◆ респондент: роль(и), с которой(ыми) осуществляется взаимодействие;
- ◆ входы: информация, используемая инициатором для начала взаимодействия;
- ◆ выходы: информация, предоставляемая респондентом в ходе взаимодействия.

При этом предполагается, что реализация протокола будет вызывать серию взаимодействий.

Данная схема определяется формально, абстрагируясь от конкретной схемы реализации (непосредственной последовательности шагов). Подобное рассмотрение взаимодействий означает, что основное внимание уделяется природе и назначению взаимодействия, а не точной схеме обмена сообщениями.

Внутренняя модель, представляющая мнение, цели и планы конкретного класса агентов, является непосредственным расширением объектно-ориентированных моделей (мнения и цели) и динамических моделей (планы) [5].

Кроме указанных видов моделей, могут строиться также:

- ◆ модели, описывающие задачи, которые могут выполняться агентами (исходные цели, варианты их декомпозиции, методы решения задач, и пр.);
- ◆ модели организации (например, описание сообщества агентов или характеристики организации, куда должна внедряться данная МАС);
- ◆ модели коммуникации, которые уточняют характеристики партнерского интерфейса человека с компьютером.

Однако практически все известные методологии требуют предварительного определения функций и типов агентов, а также опираются на достаточно жесткие, заранее заданные протоколы коммуникации. По сути, они не учитывают различные механизмы самоорганизации, эволюции, кооперации агентов в МАС. Поэтому, большую актуальность имеет создание нового класса методологий и методов проектирования агентов и МАС, основанных на использовании бионических принципов, методов и моделях, в частности, на идеях и технологиях эволюционного проектирования. Эволюционное проектирование является подходом, лежащим на границе теории проектирования и теории самоорганизации. Любая самоорганизация предполагает кооперацию агентов в многоагентной системе, она также связана с адаптацией агента к среде и некоторой схемой эволюции. Возможны разные подходы к эволюционному проектированию агентов и МАС, которые могут опираться на различные модели эволюции [5, 9, 10]. Естественным основанием для классификации концепции и стратегий ЭП может служить анализ причин развития агента или МАС: внешних или внутренних.

В первом случае эволюционное проектирование МАС рассматривается как процесс ее эволюционной адаптации к внешней среде. Здесь внешняя среда есть причина эволюции разрабатываемой системы и ее важнейшая движущая сила. Тогда главным направлением развития создаваемой МАС полагается ее соответствие текущим условиям среды, которое может достигаться путем прямого приспособления системы к среде.

В частности, отправной момент эволюции МАС может быть связан с наступлением кризисных условий среды. Такие условия нарушают естественное функционирование МАС и ее агентов. В этой ситуации мутация (например, приобрете-

ние нового гена) позволяет агенту выжить и адаптироваться к изменившимся условиям. Эта категория мутаций наиболее перспективна и направлена на исправление функциональной недостаточности.

Во втором случае причины изменения МАС усматриваются в ней самой; они могут быть связаны с целеустремленностью агентов, их приспособлением для достижения общей цели и т.п.

Будем понимать под эволюционным проектированием агента процессы формирования его наследственной изменчивости и эволюционной адаптации к внешней среде. Иными словами, ЭП определяется как процесс формирования и развертывания, как генотипа, так и фенотипа агента. Генотип агента соответствует всей наследственной (генетически обусловленной) информации, которую агент получает от родителей, а фенотип содержит набор структур агента (определяемых ситуативными правилами), которые возникают в результате развития генотипа в определенной среде. При этом часто требуется обрабатывать качественную нечеткую информацию и рассматривать различные стратегии и компьютерные модели эволюции.

Рассмотрим концепцию эволюционного проектирования агентов и основные пути ее реализации. Формально проблему эволюционного проектирования (ЭП) искусственных систем можно представить в виде [16, 17]:

$$ED = \langle E, K, O, Q \rangle,$$

где E – множество моделей эволюции; K – множество критериев ЭП; O – множество объектов ЭП; Q – множество процедур ЭП.

Очевидно, что процесс развития любых систем, в том числе агентств и многоагентных систем, складывается как из постепенных изменений, которые могут длиться на протяжении жизни многих поколений, так и резких, быстрых скачков.

Создание общей теории эволюции агентов и МАС предполагает рассмотрение ряда принципиальных проблем, включая:

- ◆ анализ общих причин и движущих сил эволюции агентов в МАС;
- ◆ исследование механизмов развития приспособлений (адаптации) агентов к среде и ее изменениям;
- ◆ определение причин и механизмов возникновения разнообразия типов агентов и агентств;
- ◆ изучение основных методов и средств имитационного моделирования эволюционных процессов.

Существует множество моделей эволюции, каждая из которых отражает взгляд того или иного ученого на теорию эволюционного развития [18]. Наиболее широко известны, теории эволюции Дарвина и Ламарка. Кроме того существует много других разновидностей эволюционной теории [19], например, теории Поппера, де Фриза, Кимуры, Дубинина и т.д. Все эти теории описывают отдельные аспекты общего эволюционного процесса. Анализ рассмотренных теорий эволюции показывает, что не одна из них не свободна от недостатков, любая модель эволюции отражает определенные свойства, которые в наибольшей степени хотел бы учесть разработчик. В частности, большой интерес с позиции проектирования агентов и МАС представляет симбиогенез (симбиогенез) – способ образования агентов-потомков путем слияния геномов разных видов. Поэтому процедура выбора общей схемы и конкретной модели эволюции применимой к задачам теории агентов зависит от конкретной задачи, которую должна решать проектируемая система. Для того, чтобы сделать правильный выбор разработчик должен тщательно изучить существующие варианты, а также рассмотреть возможность использования других современных эволюционных теорий.

В информационной теории эволюции способ распространения информации между агентами одного поколения независимо от их систематической принадлежности получил название горизонтального переноса в отличие от вертикального переноса информации, осуществляющегося между поколениями. Таким образом, агенты быстро получают ценную информацию, на приобретение которой по традиционной схеме дарвинизма ушли бы десятки и сотни лет.

Экосистемная теория эволюции рассматривает типы эволюции, происходящие в экосистемах, находящихся в состоянии кризиса. В результате этого кризиса может резко сокращаться размер популяций, т.е. создаются условия для генетического поиска и резкого увеличения размаха изменчивости. Когда конкуренция падает, живая природа может позволить себе эволюционное экспериментирование. В остальной период времени эволюция носит постепенный характер.

Выделяются также уровни макроэволюции и микроэволюции. В биологии внутривидовой уровень эволюции принято называть микроэволюцией, а надвидовой – макроэволюцией. Отличия микроэволюции от макроэволюции применительно к агентам и МАС приведены в табл. 1.

Таблица 1

Процесс	Микроэволюция	Макроэволюция
Единица отбора	Агент	Виртуальное сообщество (система различных МАС)
Источник изменчивости	Мутация/ скрещивание	Образование виртуального сообщества
Тип отбора	Естественный отбор в МАС	Отбор различных типов МАС
Тип самовоспроизведения	Темп размножения	Темп образования виртуальных сообществ
Механизмы эволюции	Генетический дрейф	Филогенетический дрейф

Опыт последних лет показал, что применение в информатике однородных методов, т.е. методов, соответствующих одной научной парадигме, для решения сложных проблем, далеко не всегда приводит к успеху. В гибридной архитектуре, объединяющей несколько парадигм, эффективность одного подхода может компенсировать слабость другого [20]. Интеграция и гибридизация различных методов и информационных технологий позволяет решать сложные задачи, которые невозможно решить на основе каких-либо отдельных методов или технологий. При этом в случае интеграции разнородных информационных технологий следует ожидать синергетических эффектов более высокого порядка, чем при объединении различных моделей в рамках одной технологии.

Выбор технологии для обработки исходной информации, зависит от особенностей решаемых задач, от числа количественных и качественных параметров, описывающих проблему, от уровня ее проработанности. Поэтому необходимо определить условия применимости каждой из рассматриваемых технологий, а также разработать методы и алгоритмы, позволяющие адаптировать их к решению конкретных задач проблемной области.

Описание модели. Предлагается модель формирования агента – потомка, на основе анализа возможных видов взаимодействия агентов – родителей в процессе эволюционного проектирования. Рассматривается популяция агентов представляющая собой эволюционирующую многоагентную систему (ЭМАС) с определенным набором параметров. Для построения модели используется модифицированный генетический алгоритм, его роль сводится к нахождению эффективных

структур взаимодействий между агентами и формированию агента-потомка. Генетический алгоритм выполняет роль вышестоящего координатора, накладывающего ограничения на деятельность всей популяции агентов. Анализ результата наложения этих ограничений позволяет накапливать в популяции положительные свойства и формировать наиболее подходящие под конкретные условия структуры агентств и потомков.

Выбор генетических операторов зависит от видов взаимодействий между агентами. В данной модели рассматриваются четыре возможных вида взаимодействия, они представлены как схемы порождения потомков, т.е. представляют собой операторы скрещивания. Модель организована таким образом, что в одной схеме взаимодействия одновременно могут участвовать только два агента, а это означает, что у каждого нового агента (агента-потомка) имеется ровно два агента-родителя. Для каждой из четырех схем взаимодействия существуют необходимые условия срабатывания, т.е. далеко не каждая пара особей способна вступить во взаимодействие. Для того чтобы пара агентов имела возможность приступить к взаимодействию, необходимо, чтобы их нормализованные генотипы удовлетворяли условиям срабатывания одной заданной схемы.

Пусть имеется некоторая популяция агентов (эволюционирующая много-агентная система) $EMAS = \{A_1, \dots, A_n\}$, где A_i – i -й агент. Каждый i -й агент системы характеризуется набором параметров (p_{i1}, \dots, p_{in}) , одна часть которых передается по наследству, а другая образуется в процессе собственной деятельности агента. Будем обозначать набор параметров, передаваемых по наследству (a_{i1}, \dots, a_{in}) . Совокупность этих параметров образует генотип агента. В свою очередь, фенотип агента связан с определением различных правил его взаимодействия со средой.

В общем случае популяция имеет G поколений. Для каждого поколения выделяются агенты двух типов: агенты – родители A_{pi} и агенты – потомки A_{nk} . Вместе агенты – родители и агенты – потомки образуют частный случай агентства, именуемый семьей. Пара последовательных агентств (три поколения агентов) образует минимальную единицу (элементарное состояние) ЭМАС.

Каждый агент в агентстве имеет свой генотип и фенотип. Будем считать, что генотип агента состоит из 2 генов, которые несут информацию о состоянии самого агента, и возможностях его взаимодействия с другими агентами. Как состояние агента, так и возможности его взаимодействия с другими агентами (формирования потомка) характеризуются соответствующими ресурсными параметрами – общим ресурсом агента RES_g и ресурсом, используемым для рождения потомка (вкладываемым в потомка) RES_b , при этом $RES_b < RES_g$. Каждая пара родителей порождает, по меньшей мере, одного потомка, т.е. по сути, реализуется эволюционный оператор (оператор скрещивания):

$$evo: A_{pi} \times A_{pj} \rightarrow A_{nk}$$

где $A_{pi} \times A_{pj}$ – взаимодействие пары агентов-родителей, принадлежащих множеству родителей; A_{nk} – агент-потомок. При этом $evo \in EVO$, где EVO – множество эволюционных операторов (операторов скрещивания).

Оператор скрещивания отражает схему взаимодействия между агентами. В работе предложено четыре схемы возможных взаимодействий, в каждой схеме определен свой уникальный набор условий срабатывания:

$$EVO = \{As, Comb, SelU, Mer\},$$

где As – оператор скрещивания типа «ассоциация» (агенты-родители имеют примерно одинаковый общий ресурс и на паритетных началах участвуют в создании нового агента; здесь стимуляция к скрещиванию у обоих агентов является внутренней, а ресурс вновь образованного агента-потомка меньше ресурса каждого из родителей);

Comb – оператор типа «комбинация» (один из агентов-родителей имеет приоритет, поскольку является владельцем существенно большего ресурса, а ресурс агента-потомка находится в диапазоне между ресурсами агентов-родителей; при этом для «слабого» родителя стимуляция к скрещиванию может являться внешней); *SelU* – оператор типа «селективное объединение» (элитные агенты-родители выбираются для создания нового сильного агента, при этом исходные агенты отдают на формирование агента-потомка большое количество ресурсов, но остающиеся у них ресурсы оказываются выше уровня выживания); *Mer* – оператор типа «слияние» (ресурс агента-потомка оказывается больше, чем у каждого из агентов-родителей, а остаточный ресурс исходных агентов-родителей оказывается ниже некоторого прожиточного минимума, и они умирают; при этом стимуляция к скрещиванию является внешней).

Таким образом, для порождения нового агента необходимо наличие пары агентов-родителей, удовлетворяющих определенным условиям реализации взаимодействия. Вид эволюционного оператора можно определить из табл. 2.

Таблица 2

Вид оператора	Отношения между родителями (соотношение общих ресурсов родителей)	Равномерность вкладываемых в потомка ресурсов	Выживание родителей	Стимуляция (внутренняя/внешняя)
Ассоциация	+	+	+	+
Комбинация	-	-	+	-
Селективное объединение	+	+	+	+
Слияние	+	+	-	-

Описание алгоритма. Таким образом, для порождения нового агента необходимо наличие пары агентов-родителей, удовлетворяющих определенным условиям реализации взаимодействия. Предлагается следующая методика эволюционного проектирования агентов и мультиагентной системы. В общем виде последовательность действий такова:

1. Определение основных критериев (условий) эволюционного проектирования агентов.
2. Нечеткое кодирование ресурсных характеристик агентов.
3. Мутация агентов. В процессе жизнедеятельности МАС агентов происходит мутация генов агентов-родителей.
4. Выбор пары агентов-родителей из исходной МАС и установление отношений между ними на поколении G_i .
5. Скрещивание агентов-родителей и формирование агента-потомка.
6. Формирование семьи (агентства). Создание единиц эволюционных МАС.
7. Выбор пары агентов-родителей и установление отношений между ними на поколении G_{i+1} .
8. Проверка выполнения условия останковки. Происходит сравнение значения счетчика текущего поколения G_i с числом моделируемых поколений G_{max} , вводимым в начальных условиях моделирования. Если значение счетчика больше значения G_{max} , процесс моделирования прерывается.

Результаты экспериментов. Была разработана программная система поддержки эволюционного проектирования агентов и МАС. Результатом работы программы являются количественные характеристики, показывающие, какие схемы взаимодействия агентов участвовали в процессе формирования агента-потомка и какие агентства сформировались при порождении агента-потомка.

Был проведен ряд экспериментов для определения среднего числа типов скрещивания агентов при заданных входных параметрах: количество особей в начальной популяции - 100; порог вероятности получения дополнительного ресурса особью – 0,2; порог вероятности исключения расхода общего ресурса – 0,2. В экспериментах использовалось фиксированное количество агентов в начальной популяции, после определения средних значений сформированных структур (агентств) число моделируемых поколений может варьироваться.

После определения средних значений сформированных структур (агентств) мы изменяем число моделируемых поколений: $G_{max} = 10$, $G_{max} = 30$, $G_{max} = 50$. Результаты тестов показаны на рис. 1.

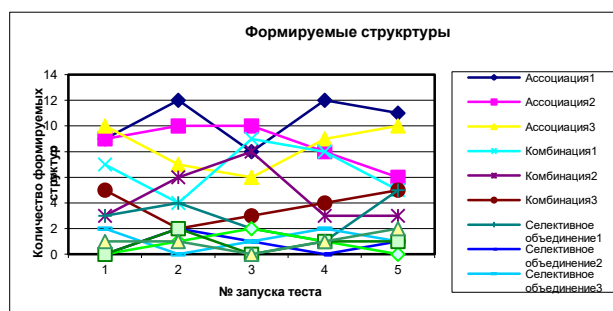


Рис. 1. Результаты тестов

Заключение. В данной работе решается задача повышения эффективности действующей методологии проектирования информационных систем на основе многоагентных организаций, выполнена разработка новых методов и подходов с использованием принципов теории эволюционного развития, биоинспирированных подходов, теории самоорганизации, принципов кооперации агентов в многоагентной системе, возможностей адаптации агента к среде.

Предложена модель формирования агента – потомка, на основе анализа возможных видов взаимодействия агентов – родителей в процессе эволюционного проектирования. Разработан механизм формирования популяции агентов, представляющей эволюционирующую многоагентную систему с заданным набором параметров на основе использования эволюционных методов. Использование предложенного механизма позволяет накапливать в популяции положительные свойства и формировать наиболее подходящие под конкретные условия структуры агентств и потомков.

В ходе экспериментов создавалась популяция агентов, и тестировалась предложенная в данной работе модель взаимодействия агентов. Каждый ген, а именно относительная величина общего ресурса и относительная величина «вкладываемого» в агента-потомка ресурса, генерировался в диапазоне $[0,1]$. Анализ полученных экспериментальных данных позволит определить оптимальные характеристики, параметры и условия срабатывания для различных схем взаимодействия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гладков Л.А., Гладкова Н.В. Возможности управления знаниями на основе гибридных интеллектуальных методов // Открытое образование. – 2013. – № 6 (101). – С. 61-65.
2. Гладков Л.А., Гладкова Н.В. Новые подходы к построению систем анализа и извлечения знаний на основе гибридных методов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 7 (108). – С. 146-153.

3. *Rassel S., Норвиг П.* Искусственный интеллект: Современный подход. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006.
4. *Luger G.F.* Artificial Intelligence. Structures and Strategies for Complex Problem Solving. – 6th Ed. Addison Wesley, Boston MA, 2009.
5. *Тарасов В.Б.* От многоагентных систем к интеллектуальным организациям. – М.: Эдиториал УРСС, 2002. – 352 с.
6. *Тарасов В.Б., Голубин А.В.* Эволюционное проектирование: на границе между проектированием и самоорганизацией // Известия ТРТУ. – 2006. – № 8 (63). – С. 77-82.
7. *Kadhim M.A., Alam M.A., Kaur H.* A Multi-intelligent Agent System for Automatic Construction of Rule-based Expert System // International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA). – 2016. – Vol. 9. – P. 62-68.
8. *Зинченко Л.А., Курейчик В.М.* Синергетическое эволюционное проектирование // Тр. восьмой национальной конференции по искусственному интеллекту (КИИ-2002). – М.: Физматлит, 2002. – Т. 2. – С. 876-884.
9. *Гладков Л.А., Курейчик В.М., Курейчик В.В., Сороколетов П.В.* Биоинспирированные методы в оптимизации. – М.: Физматлит, 2009. – 382 с.
10. *Емельянов В.В., Курейчик В.В., Курейчик В.М.* Теория и практика эволюционного моделирования. – М.: Физматлит, 2003. – 432 с.
11. *Ярушкина Н.Г.* Основы теории нечетких и гибридных систем. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 320 с.
12. *Батыришин И.З., Недосекин А.О. и др.* Нечеткие гибридные системы. Теория и практика / под ред. Н.Г. Ярушкиной. – М.: Физматлит, 2007. – 208 с.
13. *Голубин А.В., Тарасов В.Б.* Нечеткие генетические алгоритмы // Тр. Международных научно-технических конференций «Интеллектуальные системы» (AIS'05) и «Интеллектуальные САПР» (CAD-2005). – М.: Физматлит, 2005. – Т. 1. – С. 39-45.
14. *Wooldridge M., Jennings N.R., Kinny D.* The Gaia Methodology for Agent-Oriented Analysis and Design // Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000. – Vol. 3. – P. 285-312.
15. *Zambonelli F., Jennings N.R., Wooldridge M.* Developing Multiagent Systems: The Gaia Methodology // ACM Transactions on Software Engineering and Methodology. – 2003. – Vol. 12, No. 3. – P. 317-370.
16. *Прангишвили И.В.* Системный подход и общесистемные закономерности. – М.: СИНТЕГ, 2000. – 528 с.
17. *Борисов В.В., Круглов В.В., Федюлов А.С.* Нечеткие модели и сети. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 284 с.
18. *Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М.* Генетические алгоритмы. – М.: Физматлит, 2010. – 368 с.
19. *Назаров В.И.* Эволюция не по Дарвину: смена эволюционной модели. – М.: КомКнига, 2005. – 520 с.
20. *Гладков Л.А.* Решение задач поиска и оптимизации решений на основе нечетких генетических алгоритмов и многоагентных подходов // Известия ТРТУ. – 2006. № 8 (63). – С. 83-88.

REFERENCES

1. *Gladkov L.A., Gladkova N.V.* Vozможности upravleniya znaniyami na osnove gibridnykh intellektual'nykh metodov [Possibilities of knowledge management on the basis of hybrid intellectual methods], *Otkrytoe obrazovanie* [Open education], 2013, No. 6 (101), pp. 61-65.
2. *Gladkov L.A., Gladkova N.V.* Novye podkhody k postroeniyu sistem analiza i izvlecheniya znaniy na osnove gibridnykh metodov [New approaches to the construction of systems of analysis and extraction of knowledge based on hybrid methods], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2010, No. 7 (108), pp. 146-153.
3. *Rassel S., Norvig P.* *Iskusstvennyy intellekt: Sovremennyy podkhod* [Искусственный интеллект: Современный подход]. Moscow: Izdatel'skiy dom «Vil'yams», 2006.
4. *Luger G.F.* Artificial Intelligence. Structures and Strategies for Complex Problem Solving. 6th Ed. Addison Wesley, Boston MA, 2009.
5. *Tarasov V.B.* Ot mnogoagentnykh sistem k intellektual'nym organizatsiyam [From multi-agent systems to intelligent organizations]. Moscow: Editorial URSS, 2002, 352 p.

6. *Tarasov V.B., Golubin A.V.* Evolyutsionnoe proektirovanie: na granitse mezhdu proektirovaniem i samoorganizatsiey [Evolutionary design: on the border between design and self-organization], *Izvestiya TRTU [Izvestiya TSURE]*, 2006, No. 8 (63), pp. 77-82.
7. *Kadhim M.A., Alam M.A., Kaur H.* A Multi-intelligent Agent System for Automatic Construction of Rule-based Expert System, *International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA)*, 2016, Vol. 9, pp. 62-68.
8. *Zinchenko L.A., Kureychik V.M.* Sinergeticheskoe evolyutsionnoe proektirovanie [Synergetic evolutionary design] *Tr. vos'moy natsional'noy konferentsii po iskusstvennomu intellektu (KII-2002)* [Proceedings of the eighth national conference on artificial intelligence (CII-2002)]. Moscow: Fizmatlit, 2002, Vol. 2, pp. 876-884.
9. *Gladkov L.A., Kureychik V.M., Kureychik V.V., Sorokoletov P.V.* Bioinspirirovannye metody v optimizatsii [Bioinspired methods in optimization]. Moscow: Fizmatlit, 2009, 382 p.
10. *Emel'yanov V.V., Kureychik V.V., Kureychik V.M.* Teoriya i praktika evolyutsionnogo modelirovaniya [Theory and practice of evolutionary modeling]. Moscow: Fizmatlit, 2003, 432 p.
11. *Yarushkina N.G.* Osnovy teorii nechetkikh i gibridnykh system [Fundamentals of fuzzy and hybrid systems theory]. Moscow: Finansy i statistika, 2004, 320 p.
12. *Batyrshin I.Z., Nedosekin A.O. i dr.* Nechetkie gibridnye sistemy. Teoriya i praktika [Fuzzy hybrid systems. Theory and practice], ed. by N.G. Yarushkinoy. Moscow: Fizmatlit, 2007, 208 p.
13. *Golubin A.V., Tarasov V.B.* Nechetkie geneticheskie algoritmy [Fuzzy genetic algorithms], *Tr. Mezhdunarodnykh nauchno-tekhnicheskikh konferentsiy «Intellektual'nye sistemy» (AIS'05) i «Intellektual'nye SAPR» (CAD-2005)* [Proceedings Of the international scientific and technical conferences "Intelligent systems "(AIS'05) and" Intelligent CAD " (CAD-2005)]. Moscow: Fizmatlit, 2005, Vol. 1, pp. 39-45.
14. *Wooldridge M., Jennings N.R., Kinny D.* The Gaia Methodology for Agent-Oriented Analysis and Design, *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2000, Vol. 3, pp. 285-312.
15. *Zambonelli F., Jennings N.R., Wooldridge M.* Developing Multiagent Systems: The Gaia Methodology, *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*, 2003, Vol. 12, No. 3, pp. 317-370.
16. *Prangishvili I.V.* Sistemnyy podkhod i obshchesistemnye zakonomernosti [System approach and system-wide regularities]. Moscow: SINTEG, 2000, 528 p.
17. *Borisov V.V., Kruglov V.V., Fedulov A.S.* Nechetkie modeli i seti [Fuzzy models and networks]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2007, 284 p.
18. *Gladkov L.A., Kureychik V.V., Kureychik V.M.* Geneticheskie algoritmy [Genetic algorithm]. Moscow: Fizmatlit, 2010, 368 p.
19. *Nazarov V.I.* Evolyutsiya ne po Darvinu: smena evolyutsionnoy modeli [Evolution is not Darwinian: the evolutionary change model]. Moscow: KomKniga, 2005, 520 p.
20. *Gladkov L.A.* Reshenie zadach poiska i optimizatsii resheniy na osnove nechetkikh geneticheskikh algoritmov i mnogoagentnykh podkhodov [Solution of problems of search and optimization of solutions based on fuzzy genetic algorithms and multi-agent approaches], *Izvestiya TRTU [Izvestiya TSURE]*, 2006, No. 8 (63), pp. 83-88.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Ю.А. Гатчин.

Гладков Леонид Анатольевич – Южный федеральный университет; e-mail: leo@tgn.sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371625; кафедра САПР; доцент.

Гладкова Надежда Викторовна – e-mail: leo_gladkov@mail.ru; тел.: 88634393260; кафедра ДМ и МО; старший преподаватель.

Gladkov Leonid Anatol'evich – Southern Federal University; e-mail: leo@tgn.sfedu.ru; 44, Nekrasovskiy lane, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371625; CAD department; associated professor.

Gladkova Nadezhda Viktorovna – e-mail: leo_gladkov@mail.ru; phone: +78634393260; DM&MO department; senior teacher.