

И. А. Кириков, А. В. Колесников, С. В. Листопад

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТА САМООРГАНИЗАЦИИ
В КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМАХ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ
РЕШЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ МНОГОАГЕНТНЫХ СИСТЕМ**

На примере многоагентной системы рассмотрено создание интеллектуальной компьютерной системы поддержки принятия решений с самоорганизацией на основе анализа взаимодействия участников. Представлена универсальная структура системы, реализующей данный подход. Приведены результаты тестирования различных типов архитектур на предмет вероятности возникновения синергетического эффекта и оценки его влияния на качество решения сложных задач.

A creation of decision support self-organising intellectual computer system based on the analysis of an interaction between participants on example of multi-agent system is considered. The universal structure of system implementing proposed method is presented. The results of testing different types of architectures for probability of arising of the synergetic effect and estimation of its impact on the quality of solutions to complex problems are given.

Ключевые слова: самоорганизация, система поддержки принятия решений, многоагентная система.

Key words: self-organisation, decision support system, multi-agent system.

Введение

В последние десятилетия самоорганизация стала распространенным междисциплинарным понятием [1]. Она исследуется в философии, физике, биологии, химии, социологии, лингвистике и других науках. Идеи самоорганизации восходят к работам И. Канта и Г. В. Ф. Гегеля, а в XX веке — А. Богданова, Э. Шредингера, Л. фон Берталанфи, Н. Моисеева, И. Пригожина, И. Стенгерс, Г. Хакена и др. [2]. Несмотря на то что каждая научная школа дает свое определение понятию «самоорганизация», все они сходятся в одном — система проявляет самоорганизацию, если она самостоятельно определяет свою внутреннюю структуру, реагируя на изменения во внешнем мире. Такое поведение системы позволяет ей адаптироваться к изменяющейся среде, а также принимать нестандартные решения, что подчеркивается отечественными и зарубежными учеными [3–5]. Так, В. Е. Хиценко отмечает, что именно устойчивая неравновесность самоорганизующихся систем обеспечивает надежность в поиске оптимальных решений.

1. Понятие самоорганизации

Процессы самоорганизации типичны для окружающего мира [6; 7]: *ячейки Бенара* — структура, возникающая в тонком слое вязкой жидкости при критическом перепаде температуры между верхней и нижней поверхностью слоя (рис. 1, а); *жизненный цикл гриба миксомицета* — на стадии размножения множество отдельно живущих клеток собираются в точку, специализируются и образуют гриб, после чего он выбрасывает споры и жизненный цикл начинается заново (рис. 1, б); *излучение лазера* — множество некоррелированных цугов волн накачивающей лампы преобразуется в один цуг синусоидальных волн лазера (рис. 1, в).

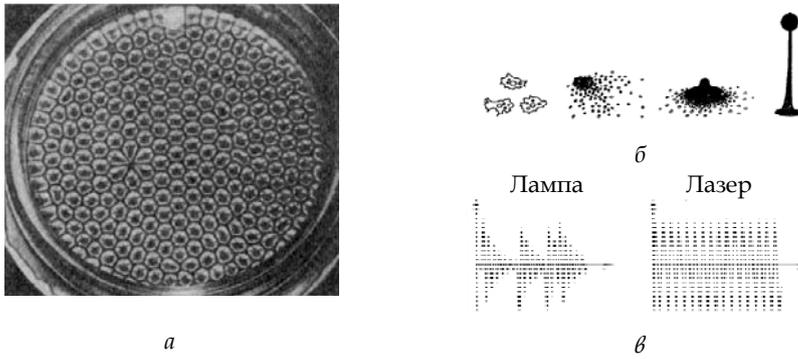


Рис. 1. Примеры самоорганизации в природе и технике:
a — ячейки Бенара; *б* — жизненный цикл гриба миксомицета; *в* — излучение лазера

У самоорганизующихся систем есть общие черты [6]:

- 1) *эндогенный глобальный порядок* — система переходит в стабильное глобальное состояние за счет внутренних процессов;
- 2) *эмерджентность* — функциональность системы в целом не сводится к сумме функций ее элементов;
- 3) *самосохранение* — свойство системы восстанавливать себя, воспроизводить или восстанавливать свои компоненты;
- 4) *адаптивность* — способность к реорганизации обуславливает возможность адаптироваться к изменениям внешней среды.

Проявление эффектов самоорганизации не ограничивается приведенными примерами. Они наблюдаются повсеместно, в том числе в коллективах людей, принимающих решения, — системах поддержки принятия решений (СППР). Если в СППР возникает эффект самоорганизации, принимаемые ею решения становятся качественно лучше решений отдельных экспертов, а сама система — более гибкой, надежной и эффективной. Благодаря этому эффекту СППР способна решать более сложные задачи, нежели отдельный эксперт. Это нужно учитывать при проектировании компьютерных систем поддержки принятия решений (КСППР) для решения сложных практических задач.

2. Самоорганизация в системах поддержки принятия решений

Принятие решений в СППР, например в военных советах, коллегиях министерств, совещаниях, информационных центрах, отличается от принятия индивидуальных решений, там каждый участник группы преследует собственные цели, которые могут согласовываться или противоречить целям других участников [8]. Член группы выслушивает других экспертов и высказывает свое мнение. Процесс принятия решения в СППР — поиск компромисса, управляемый лицом, принимающим решения (ЛПР). Цель поиска — «резонансное состояние» хода обсуждения в СППР, возникновение синергетического эффекта, когда коллективное решение оказывается качественно лучше и лишено недостатков частных мнений экспертов.

Приведем случай с выбором эффективного управленческого решения, принятого ЛПР, приведшего к возникновению синергетического эффекта при разработке Microsoft ОС Windows NT [9]. Первый год проект осуществлялся в полном хаосе с постоянным недостатком управления и был на грани срыва. Возникла дилемма: как достичь системной согласованности и не погубить творческую атмосферу? Решением стал приказ руководителя проекта Д. Катлера, чтобы каждый «ел собственную собачью пищу». Это означало использование разработчиками в качестве собственной ОС незаконченных версий Windows NT. Это правило помогло создать команду с общей системой ценностей. Заработала положительная обратная связь: каждая удачная находка облегчала написание кода и приводила к новым успехам, а каждый «прокол» тормозил дело, пока не становился нетерпимым и не устранялся. Этот пример показывает, как грамотное управленческое решение запустило процесс самоорганизации. Нахождение такого воздействия зависит от опыта и знаний ЛПР, которые в основном интуитивны и неформализуемы.

В этой связи актуально создание систем, моделирующих работу СППР и возникающий в них эффект самоорганизации (синергетический эффект), в результате которого совместное решение СППР качественно лучше любого из частных. Одна из них — многоагентная система (МАС) с самоорганизацией на основе анализа взаимодействия агентов [10], имитирующая поведение



Агент, принимающий решения, рассылает агентам поиска решения данные для решения задачи, определяет порядок их взаимодействия. После того как последние решили свои подзадачи, он выбирает одно из альтернативных решений, которое передает интерфейсному агенту, или запускает очередную итерацию решения задачи, пересылая решение, полученное каждым агентом поиска решения, остальным агентам поиска решения для доработки. На новой итерации агенты пытаются улучшить решения, полученные на предыдущей. Таким образом, агрегируются решения агентов поиска решения. Именно агент, принимающий решения, «отвечает» за организацию синергетического эффекта в МАС. С помощью функции «анализ взаимодействий» [10] он анализирует цели агентов и определяет тип архитектуры МАС (с нейтральными агентами, с сотрудничающими агентами или с конкурирующими агентами), который должен продолжить работу по поиску решения. Ниже рассмотрен алгоритм определения типа архитектуры МАС по степени согласованности взаимодействия агентов (алгоритм функции «анализ взаимодействий»):

- 1) представить цели агентов в виде нечетких целей [10]. Для этого целевые значения каждого свойства, описывающего решение, представить нечетким множеством;
- 2) исключить из рассмотрения агентов, безразличных к результату решения, чья нечеткая цель — константа;
- 3) вычислить меру сходства целей для каждой пары агентов в соответствии с выражением

$$s(A, B) = 0,5 \cdot \left(\frac{\int_{val_{min}}^{val_{max}} \mu_{A \cap B}(pr) d(pr)}{\int_{val_{min}}^{val_{max}} \mu_A(pr) d(pr)} + \frac{\int_{val_{min}}^{val_{max}} \mu_{A \cap B}(pr) d(pr)}{\int_{val_{min}}^{val_{max}} \mu_B(pr) d(pr)} \right),$$

где pr — свойство решения, выступающее в качестве критерия оценки решения; val_{min} , val_{max} — минимальное и максимальное значения свойства pr соответственно; μ_A , μ_B — функции принадлежности нечетких целей агентов A и B ; $\mu_{A \cap B}$ — функция принадлежности пересечения целей агентов A и B ;

4) определить значение лингвистической переменной (ЛП) *тип отношений* для каждой пары агентов на основе значения меры сходства целей $cl = \langle \beta, T, U, G, M \rangle$, где $\beta = \text{тип отношений}$ — наименование ЛП; $T = \{\text{конкуренция, нейтралитет, сотрудничество}\}$ — множество значений ЛП (терм-множество), каждое из которых — наименование нечеткой переменной; $U = [0; 1]$ — область определения (универсум) нечетких переменных, входящих в определение ЛП; $G = \emptyset$ — синтаксическая процедура, описывающая процесс образования из элементов множества T новых термов; $M = \{\mu_{\text{конкуренция}}(s), \mu_{\text{нейтралитет}}(s), \mu_{\text{сотрудничество}}(s)\}$ — семантическая процедура, ставящая в соответствие каждому терму множества T , а также каждому новому терму, образуемому процедурой G , осмысленное содержание посредством формирования соответствующего нечеткого множества с функциями принадлежности $\mu_{\text{конкуренция}}(s) = (1 + (3 \cdot s)^8)^{-1}$, $\mu_{\text{нейтралитет}}(s) = (1 + (6 \cdot (s - 0,5))^8)^{-1}$, $\mu_{\text{сотрудничество}}(s) = (1 + (3 \cdot (s - 1))^8)^{-1}$. В результате получаем матрицу **СЛ** значений ЛП cl ;

5) найти агента, сотрудничающего с обоими агентами для каждой пары конкурирующих (нейтральных) агентов, и заменить в матрице, полученной на четвертом шаге, тип отношений между этим агентом и каждым из конкурирующих (нейтральных) агентов на нейтральный. Если ни для одной пары конкурирующих (нейтральных) агентов не существует ни одного агента, сотрудничающего с обоими агентами, перейти к пункту 6);

6) идентифицировать тип архитектуры МАС в целом на основе модифицированной матрицы **СЛ** значений лингвистической переменной cl (*тип отношений*). Если в **СЛ** присутствуют только нейтральные отношения, архитектура МАС относится к типу с нейтральными агентами. Если же присутствуют отношения сотрудничества или конкуренции, архитектура МАС относится к типу с сотрудничающими или конкурирующими агентами соответственно.

Определив тип МАС, агент, принимающий решения, устанавливает необходимость (или ее отсутствие) замены одного типа отношений агентов на другой и корректировки их целей. Смена типа архитектуры означает, что МАС изменяет алгоритм своего функционирования, проявляя свойство самоорганизации.

Для этого агент, принимающий решения, должен иметь базу знаний о том, какой из типов архитектур МАС эффективнее в тех или иных условиях, для того или иного класса задач. Для ее создания исследуем зависимость возникновения синергетического эффекта от степени сходства целей агентов на примере СЗК, описанной в разделе 4.

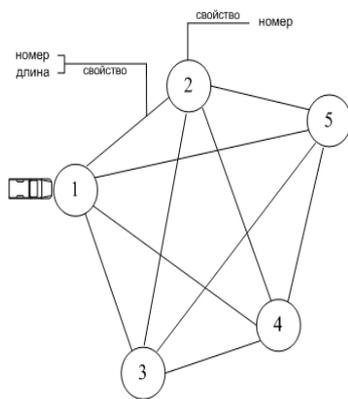


4. Описание тестовой задачи

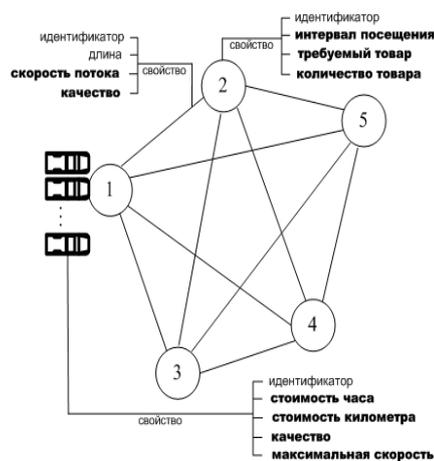
В основе СЗК лежит классическая задача коммивояжера (КЗК). При этом она учитывает многие факторы реального мира, которые КЗК оставляет «за бортом». Так, если в КЗК требуется найти маршрут наименьшей стоимости объезда коммивояжером N клиентов (городов), то в СЗК требуется найти совокупность маршрутов для нескольких транспортных средств (ТС), оптимальную по четырем критериям: суммарная стоимость маршрута; общая длительность поездок для всех транспортных средств; вероятность опоздания хотя бы к одному клиенту; надежность.

Мерой надежности будем считать математическое ожидание увеличения стоимости совокупности маршрута. В СЗК учитываются такие стохастические факторы, как возникновение дорожных пробок и в результате вероятность опоздания к клиенту, потери от боя груза и другие. Для сравнения графы КЗК и СЗК приведены на рисунке 3. Различия между графами выделены жирно.

Классическая задача коммивояжера



Сложная задача коммивояжера



○ — клиент; — — дороги;  — транспортное средство

Рис. 3. Графы классической (слева) и сложной (справа) задачи коммивояжера

Сложная задача коммивояжера — приближение КЗК к практической задаче доставки грузов клиентам несколькими транспортными средствами. В задаче используется полный спектр переменных и отношений, которыми оперируют эксперты при построении маршрутов доставки грузов на практике. Так, например, длина дороги, стоимость часа работы или километра пробега ТС обозначаются детерминированными переменными, скорость потока (свойство дороги) — стохастической, интервал доставки и идентификаторы — четкими лингвистическими, а качество дороги или ТС — нечеткими. Кроме того, для учета допустимости маршрута с точки зрения нарушения сроков доставки используются логические переменные. Для обработки переменных каждого типа используются свои методы. Также требуется отображать взаимосвязь переменных различных типов, что согласно работе [11] переводит задачу в класс неоднородных, сложных для моделирования. Это означает, что решить задачу одним из известных методов нельзя.

Необходимо перейти к построению системы в рамках синергетического подхода к искусственному интеллекту, комбинирующей интеллектуальные технологии, обрабатывающие переменные из различных классов. Такая система должна «уметь» самостоятельно конструировать метод решения подаваемой на ее вход задачи. Был разработан лабораторный прототип МАС для решения сложной задачи коммивояжера (MAS SZK), оценивающий условия возникновения синергетического эффекта, в частности появления свойства эмерджентности, в зависимости от типа архитектуры МАС, чтобы сформулировать правила «условия — архитектура» базы знаний агента, принимающего решения.



5. Результаты экспериментов

Эксперименты с системой MAS SZK проводились на примере пяти СЗК с 10, 15, 20, 25, 30 городами и тремя архитектурами MAS различающимися по степени взаимодействия агентов: MAS с сотрудничающими, нейтральными и конкурирующими агентами. Для всех трех архитектур цель агента, принимающего решения, — минимизировать стоимость и длительность маршрута, вероятность опоздания и надежность маршрута. В качестве меры надежности выбрано математическое ожидание увеличения стоимости совокупности (по одному для каждого ТС) маршрутов. Архитектуры различаются только целями агентов поиска решения.

В MAS с нейтральными агентами каждый из четырех агентов поиска решения минимизирует значение «своего» критерия оценки решения (совокупности маршрутов).

В MAS с сотрудничающими агентами все четыре агента поиска решения минимизируют все четыре критерия оценки решения (аналогично агенту, принимающему решения).

В MAS с конкурирующими агентами один агент минимизирует стоимость и максимизирует длительность, второй — максимизирует стоимость и минимизирует длительность, третий — минимизирует вероятность опоздания и максимизирует надежность, а четвертый — максимизирует вероятность опоздания и минимизирует надежность.

С тестовыми задачами для каждого класса архитектуры MAS было проведено по 100 вычислительных экспериментов. В ходе экспериментов рассчитывались следующие параметры: 1) процент решений MAS, лучших, чем любое из частных решений агентов (рис. 4, табл. 1); 2) среднее значение цели агента, принимающего решения. Первый параметр характеризует вероятность возникновения эффекта самоорганизации (синергетического эффекта) в MAS. Чем выше значение этого параметра, тем выше эффективность MAS. Значение, близкое к нулю, свидетельствует о неэффективном взаимодействии агентов MAS и необходимости смены ее архитектуры. Второй параметр характеризует среднее для 100 экспериментов значение функции принадлежности нечеткой цели агента, принимающего решения (критерий оптимальности принимаемых MAS решений). Значение этого параметра изменяется в интервале $[0; 1]$: чем оно выше, тем более качественные решения принимаются MAS.

Как видно из рисунка 4 и таблицы 1, независимо от размерности задачи, синергетический эффект наиболее часто возникает в MAS с нейтральными агентами. На втором месте — MAS с кооперирующими агентами. При этом заметна тенденция к снижению вероятности возникновения синергетического эффекта с повышением размерности задачи. Объясняется это тем, что с повышением размерности задачи агенты поиска решения хуже справляются с поставленной перед ними задачей из-за ограниченности реализуемых ими методов поиска. В результате они не в состоянии улучшить найденное другими агентами решение.

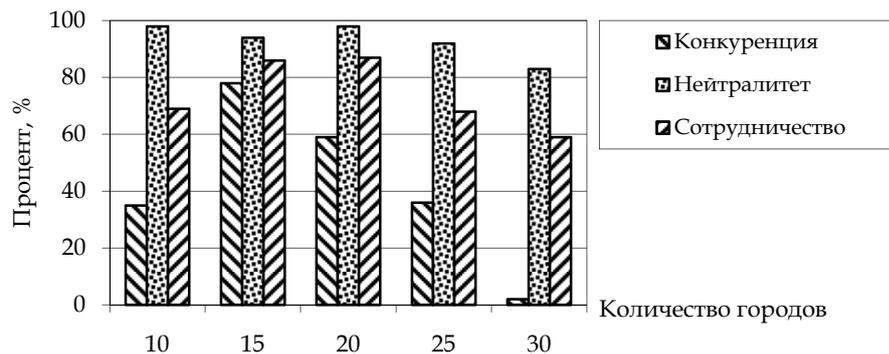


Рис. 4. Соотношение решений MAS, лучших, чем любое из частных решений агентов

Таблица 1

Количество решений MAS, лучших, чем любое из частных решений агентов, %

Взаимодействие агентов	Количество городов				
	10	15	20	25	30
Конкуренция	35	78	59	36	2



Нейтралитет	98	94	98	92	83
Сотрудничество	69	86	87	68	59

Также заметно, что с ростом размерности задачи увеличивается разрыв по вероятности возникновения синергетического эффекта между МАС с нейтральными агентами и МАС других архитектур, что свидетельствует об эффективности взаимодействия агентов, реализованного в данной МАС, и его активном влиянии на качество принимаемых решений.

На рисунке 5 и из таблицы 2 видно, что качество принимаемых решений МАС с нейтральными агентами выше, чем МАС других архитектур. Это следствие того, что в МАС с нейтральными агентами более вероятно возникновение синергетического эффекта. Чем меньше размерность СЗК, тем меньше влияние этого эффекта на качество решения.

Так, из рисунка 5 и таблицы 2 видно, что среднее значение цели агента, принимающего решения (можно сказать, цели МАС в целом), для задач с 10–20 городами практически совпадают. Однако для задач с 25 и 30 городами МАС с нейтральными агентами выдает более качественные решения (ближе к единице) по сравнению с МАС других типов архитектур.

Таким образом, при малой размерности задачи можно выбирать архитектуру МАС случайным образом либо на основе анализа других параметров СЗК (полнота матрицы смежности, топологические особенности и так далее), а при размерности задачи более 30 городов, когда возникающий синергетический эффект начинает играть серьезное значение, лучше выбирать МАС с нейтральными или сотрудничающими агентами.

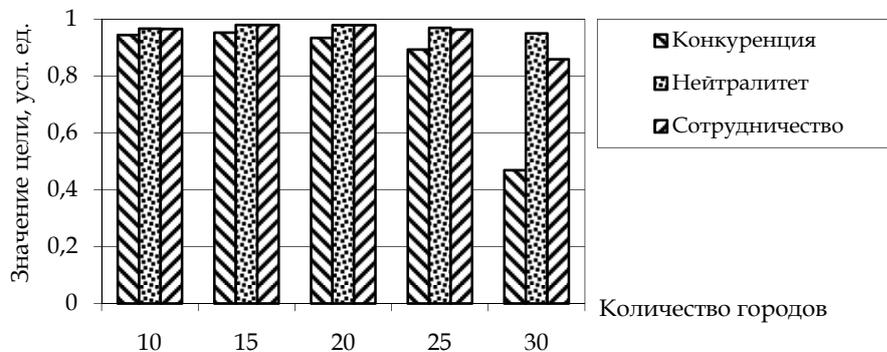


Рис. 5. Среднее значение цели агента, принимающего решения

Таблица 2

Среднее значение цели агента, принимающего решения, усл. ед.

Взаимодействие агентов	Количество городов				
	10	15	20	25	30
Конкуренция	0,9449	0,9528	0,9348	0,8935	0,4687
Нейтралитет	0,9669	0,9802	0,9796	0,9699	0,9504
Сотрудничество	0,9661	0,98	0,9795	0,9639	0,8592

Эта зависимость формирует одно из правил нечеткой базы знаний по выбору архитектур МАС агента, принимающего решения. Чтобы сформировать полноценную базу знаний, следует исследовать зависимости вероятности возникновения синергетического эффекта от других параметров и сформулировать правила выбора архитектур МАС на основе данных зависимостей.

В результате в КСППР, построенной как МАС с самоорганизацией на основе анализа степени взаимодействия агентов, агент, принимающий решения, сможет адаптировать взаимодействие агентов под условия конкретной задачи, чтобы повысить качество принимаемых решений.

Заключение

В настоящей статье были рассмотрены основные свойства самоорганизующихся систем. Показано, что именно эффект самоорганизации в системах поддержки принятия решений обуславливает высокое качество решений, предлагаемых такими системами.

В связи с этим предложен подход к созданию интеллектуальной КСППР с самоорганизацией, один из элементов которой имитирует работу ЛПР по организации работы коллектива экспертов над сложной задачей. Такая КСППР может имитировать эффекты самоорганизации на основе анализа сведений о целях участников (агентов) и давать рекомендации ЛПР о необходимости



изменения состава и взаимодействия участников либо корректировки поставленных перед ними целей.

Представлен алгоритм определения типа архитектуры МАС по степени согласованности взаимодействия агентов, а также многоагентная система с самоорганизацией. Приведенные результаты сравнения различных архитектур МАС позволили определить, в каких организациях более вероятно возникновение синергетического эффекта, когда принятое коллективом решение будет лучше, чем любое из решений, предлагаемых отдельными интеллектуальными агентами.

Получена эвристическая зависимость вероятности возникновения синергетического эффекта от архитектуры МАС и размерности задачи.

Аналогичным образом можно получить знания об эффективности той или иной архитектуры МАС в зависимости от других параметров задачи, с тем чтобы сформировать базу знаний «условия – архитектура». В частности, для СЗК к таким параметрам относятся количество дорог (плотность дорожной сети), топологические особенности, число коммивояжеров и так далее. Но это предмет дальнейших исследований.

Список литературы

1. Schillo M., Fley B., Florian M. et al. Self-organization in multiagent systems: from agent interaction to agent organization // Third international workshop on modelling artificial societies and hybrid organizations (MASHO). Aachen, 2002. P. 37–46.
2. Акимова Т. А. Экономика устойчивого развития: учеб. пособие. М., 2009.
3. Хищенко В. Е. Самоорганизация: элементы теории и социальные приложения. М., 2005.
4. Адамар Ж. Исследование психологии процесса изобретения в области математики. М., 1970.
5. Пуанкаре А. О науке // Наука и метод. Кн. 1: Ученый и наука. М., 1983.
6. Di Marzo Serugendo G., Gleizes M.-P., Karageorgos A. Self-organization in multi-agent systems // The Knowledge Engineering Review. 2005. Vol. 20:2. P. 165–189.
7. Хакен Г. Информация и самоорганизация: макроскопический подход к сложным системам. М., 1991.
8. Козелецкий Ю. Психологическая теория решений. М., 1979.
9. Zachary P. Showstopper! The breakneck race to create Windows NT and the next generation at Microsoft. New York, 1994.
10. Кириков И. А., Колесников А. В., Листопад С. В. Моделирование самоорганизации групп интеллектуальных агентов в зависимости от степени согласованности их взаимодействия // Информатика и ее применение. 2009. Т. 3, вып. 4. С. 78–88.
11. Колесников А. В. Гибридные интеллектуальные системы. Теория и технология разработки. СПб., 2001.

Об авторах

Игорь Александрович Кириков – канд. техн. наук, доц., директор, Калининградский филиал ИПИ РАН, e-mail: kfipiran@yandex.ru

Александр Васильевич Колесников – д-р техн. наук, проф., РГУ им. И. Канта, ст. науч. сотр., Калининградский филиал ИПИ РАН, e-mail: avkolesnikov@yandex.ru

Сергей Викторович Листопад – науч. сотр., Калининградский филиал ИПИ РАН, e-mail: ser-list-post@yandex.ru

Authors

Dr Igor Kirikov – assistant professor, director, Kaliningrad branch of the Institute of Informatics Problems of the Russian Academy of Sciences, e-mail: kfipiran@yandex.ru

Professor Aleksandr Kolesnikov – IKSUR, senior scientific associate of Kaliningrad branch of the Institute of Informatics Problems of the Russian Academy of Sciences, e-mail: avkolesnikov@yandex.ru

Sergey Listopad – scientific associate, Kaliningrad branch of the Institute of Informatics Problems of the Russian Academy of Sciences, e-mail: ser-list-post@yandex.ru