

Научная статья

УДК 681.3.06

<https://doi.org/10.23859/1994-0637-2021-1-100-4>

© Алексей Александрович Сукощи́ков¹, Анатолий Николаевич Швецов^{2✉},
Игорь Александрович Андрианов³, Дмитрий Валерьевич Кочкин⁴, 2021

^{1, 2, 3, 4}Вологодский государственный университет,
Вологда, Российская Федерация,

¹aas313@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8673-3314>

²smithv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7021-5184>

³igand@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2177-7084>

⁴kochkindv@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2822-1038>

© Alexey A. Sukonschikov¹, Anatoly N. Shvetsov^{2✉},
Igor A. Andrianov³, Dmitriy V. Kochkin⁴, 2021

^{1, 2, 3, 4}Vologda State University,
Vologda, Russian Federation,

¹aas313@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8673-3314>

²smithv@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7021-5184>

³igand@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2177-7084>

⁴kochkindv@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2822-1038>

Принципы построения самоорганизующихся информационно-телекоммуникационных систем

Аннотация. В статье рассматриваются фундаментальные основы функционирования и эволюции сложных распределенных информационно-телекоммуникационных систем (ИТС) в нейро-нечеткой агентно-ориентированной парадигме. Предложены принципы формализации данного класса систем: структуризация целей, агентная ориентация, иерархическая интеллектуальная организация, модульность интеллектуальных агентов, структурная и функциональная гибкость интеллектуальных агентов, единство математического аппарата, саморазвитие и эволюция. Сформулировано понятие распределенной интеллектуальной ИТС как многоуровневой иерархической совокупности технического и программного обеспечения под управлением агентно-ориентированных систем.

Ключевые слова: информационно-телекоммуникационные системы, интеллектуальные агенты, самоорганизующиеся системы, нечеткие модели.

Благодарность. Статья подготовлена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 19-01-00103 «Модели и методы построения информационно-телекоммуникационных систем на основе сообществ самоорганизующихся нейро-нечетких интеллектуальных агентов» и № 18-47-350001 «Модели и методы построения нейро-нечетких интеллектуальных агентов в информационно-телекоммуникационных системах»).

Principles of building self-organizing information and telecommunication systems

Abstract. The article discusses the basic foundations of the functioning and evolution of complex distributed information and telecommunication systems (ITS) in the neuro-fuzzy agent-based

paradigm. The formalization principles for such systems are proposed: goal structuring, agent orientation, hierarchical intellectual organization, modularity of intelligent agents, structural and functional flexibility of intelligent agents, single mathematical apparatus, self-development and system evolution. The concept of a distributed intelligent ITS as a geographically distributed multi-level hierarchical set of hardware and software controlled by agent-based systems is introduced.

Keywords: information and telecommunications systems, intelligent agents, self-organizing systems, fuzzy models.

Acknowledgements. The work was supported by the Russian Science Foundation (Project No. 19-01-00103 “Models and methods for building information and telecommunication systems based on self-organizing neuro-fuzzy intelligent agents”, No. 18-47-350001 “Models and methods for building neuro-fuzzy intelligent agents in information and telecommunication systems”).

Введение

В настоящее время можно отметить увеличение сложности взаимодействия и управления в информационно-телекоммуникационных системах (далее – ИТС), что обусловлено увеличением объемов обрабатываемых данных, изменениями топологии, задержками при определении меняющихся состояний и другими факторами. В связи с этим представляются перспективными исследование и разработка новых подходов к построению ИТС, в том числе с привлечением аппарата интеллектуальных агентов (далее – ИА). Следовательно, актуальной задачей является изучение возможностей по взаимодействию, а также организации и самоорганизации агентов в саморазвивающиеся сообщества, управляющие текущим функционированием и развитием системы с обеспечением требуемых показателей качества с применением моделей нейронных и нечетких ИА.

Многоуровневая системная организация ИТС включает программные, программно-аппаратные и аппаратные компоненты, восприимчивые к программному и программно-аппаратному управлению и подлежащие настройке и модификации. В процессе развития ИТС может изменяться архитектура сети (добавление и удаление сегментов), а также состав телекоммуникационного оборудования, количество и состав рабочих станций, параметры и характер трафика, приоритеты решаемых задач, глобальные и локальные критерии оптимизации.

Масштабы и скорость желаемых изменений требуют снижения степени влияния человеческого фактора на процессы модернизации и совершенствования ИТС. Таким образом, возникает проблема постоянного и своевременного совершенствования ИТС, реконфигурации архитектуры вычислительных сетей, адаптации к изменяющимся требованиям как внутренней, так и внешней информационной среды.

Указанная проблема формирует логичное требование самосовершенствования и саморазвития в процессе эксплуатации и модернизации ИТС, в развитии новых функциональных возможностей в соответствии с требованиями пользователей, структурой и характеристиками решаемых задач, особенностями вычислительной среды.

Самоорганизующимися системами в современной теории систем принято называть те, которые обладают способностью увеличивать свой внутренний порядок и

изменять организацию. Такая формулировка восходит к известной работе W. R. Ashby¹, считающейся первой публикацией, посвященной проблеме самоорганизации в кибернетических системах. В этой статье W. R. Ashby утверждает, что машина может быть самоорганизованной, т. е. детерминированной и в то же время способной к спонтанным изменениям внутренней организации. Представления о самоорганизации были впоследствии развиты W. R. Ashby в работе “Principles of the Self-Organizing System”².

В дальнейшем в области синергетики был предложен ряд понятий и созданы модели механизмов самоорганизации. В формулировке Г. Хакена³ системы, обладающие свойством самоорганизации, характеризуются возможностью образовывать макроскопические структуры, которые можно описать определенными параметрами порядка.

Согласно работе Е. Н. Князева, С. П. Курдюмова «Синергетика: нелинейность времени и ландшафты коэволюции»⁴, самоорганизующиеся системы обладают рядом признаков, обусловленных наличием в системе активных элементов, обеспечивающих ее приспособляемость к изменяющимся условиям внешней среды, но формирующих неопределенности, препятствующие детерминированному управлению данной системой.

Таковыми особенностями, характерными для класса рассматриваемых нами ИТС, являются:

- нестационарность многих параметров ИТС и стохастический характер поведения;
- необходимость и способность адаптироваться к изменяющимся условиям внешней инфокоммуникационной среды и противостоять воздействию помех и целенаправленному внешнему противодействию;
- принципиальная неравновесность и неопределенность глобальных состояний системы (основные параметры ИТС носят нечеткий характер);
- способность противостоять энтропийным процессам, разрушающим систему, и формировать неэнтропийные процессы, обеспечивающие восстановление структуры и основных показателей функционирования ИТС;
- способность формировать сценарии поведения активных компонентов ИТС, изменять программно-аппаратную структуру системы, обеспечивая установленные показатели эффективности;

¹ Ashby W. R. Principles of the Self-Organizing Dynamic System // The Journal of General Psychology. – 1947. – № 37. – P. 125–128.

² Ashby W. R. Principles of the Self-Organizing System // Principles of Self-Organization: Transactions of the University of Illinois Symposium / edited by H. Von Foerster and G. W. Zopf, Jr. – London: Pergamon Press, 1962. – P. 255–278.

³ Хакен Г. Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам. – Москва: КомКнига, 2005. – 248 с.

⁴ Князева Е. Н., Курдюмов С. П. Синергетика: нелинейность времени и ландшафты коэволюции. – Москва: КомКнига, 2007. – 272 с.

– способность формировать внутренние цели активных компонентов ИТС, соответствующие общим целям функционирования системы и задачам, поставленным пользователями ИТС.

Основная часть

Принципы формализации структур и процессов самоорганизации и саморазвития ИТС в нейро-нечеткой агентно-ориентированной парадигме

Проблемы самоорганизации применительно к агентно-ориентированным системам (далее – АОС) и мультиагентным системам (далее – МАС) исследовались в ряде работ. Следуя положениям, сформулированным в работах В. И. Городецкого «Самоорганизация и многоагентные системы. I. Модели многоагентной самоорганизации»¹, «Самоорганизация и многоагентные системы. II. Приложения и технология разработки»² и Bernon C., Chevrier V., Hilaire V., Marrow P. “Applications of Self-Organising Multi-Agent Systems: An Initial Framework for Comparison”³, можно выделить два класса самоорганизующихся систем. Если в системе отсутствует явное внешнее управление и нет внутренней централизации управления, то ее обычно называют сильной самоорганизующейся системой. Если же в системе наблюдается явное централизованное (внутреннее) управление, то такая система относится к слабым.

Рассматриваемые в статье агентно-ориентированные информационно-телекоммуникационные системы (далее – АОИТС) относятся к классу слабых, поскольку в них имеется централизованное управление. Оно в той или иной мере распределяется по уровням представления ИТС. Самоорганизующиеся системы обладают следующими основными свойствами⁴:

- автономность – система работоспособна без явного управления со стороны внешней среды;
- глобальный порядок (организация, структура), возникающий в результате локальных внутренних взаимодействий ее элементов;
- эмерджентные свойства – свойства, которые проявляются лишь на метауровне и не выявляются в ходе наблюдения за поведением отдельных элементов системы;
- диссипация – рассеивание энергии в неустойчивых состояниях в случае отсутствия внешних возмущений. Это вызывает переходы системы в определенные стабильные состояния, где и могут наблюдаться эмерджентные свойства;

¹ Городецкий В. И. Самоорганизация и многоагентные системы. I. Модели многоагентной самоорганизации // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2012. – № 2. – С. 92–120.

² Городецкий В. И. Самоорганизация и многоагентные системы. II. Приложения и технология разработки // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2012. – № 3. – С. 102–123.

³ Bernon C., Chevrier V., Hilaire V., Marrow P. Applications of Self-Organising Multi-Agent Systems: An Initial Framework for Comparison // Informatica. – 2006. – № 30. – P. 73–82.

⁴ Там же.

- нелинейная динамика, неустойчивость, чувствительность к начальным состояниям и к незначительным изменениям параметров (если параметры претерпевают даже небольшие изменения в определенных точках, функционирование системы может существенно меняться). Следует отметить, что данное свойство нельзя получить путем изучения свойств отдельных элементов системы и их взаимодействий;
- множественность устойчивых состояний (точки притяжения, аттракторы);
- избыточность компонентов и их взаимодействий, приводящая к незначительной чувствительности самоорганизующейся системы к местным отказам ее элементов (отказоустойчивость);
- адаптивность – способность менять поведение и переходить в другие состояния при изменениях системы и внешней среды;
- сложность – система обычно состоит из значительного числа отдельных элементов, при этом ее поведение и свойства не сводятся лишь к объединению отдельных свойств элементов;
- иерархичность – самоорганизующаяся система рассматривается как минимум на двух уровнях: на уровне локальных взаимодействий системных элементов и на метауровне (где описываются эмерджентные свойства).

В настоящее время известен ряд способов применения методов самоорганизации в ИТС; достаточно подробно изучены протоколы маршрутизации на базе самоорганизации мультиагентных систем в сетях MANET (Mobile Ad hoc Networks). В связи с динамическим изменением набора сетевых узлов и топологии традиционные методы маршрутизации применимы плохо, так как меняющаяся топология требует постоянного изменения данных в таблицах маршрутизации. Чтобы это учитывать, необходимо каким-то образом информировать все узлы об изменениях в сети. Это влечет за собой лишний расход ресурсов, особенно когда обновление таблиц нужно выполнять достаточно часто.

Схожая проблема наблюдается в оверлейных (виртуальных) сетях, которые строятся на базе взаимодействий «точка-точка» (P2P-сети), где каждый узел способен непосредственно связываться лишь с ограниченным количеством соседей, при этом у него нет информации о маршрутах к более дальним узлам. Такого рода сети также часто обладают динамической топологией и набором узлов. Для сетей большого размера проблема увеличения сложности алгоритмов маршрутизации может стать весьма серьезной. Это приводит к необходимости нахождения новых принципов маршрутизации.

На сегодняшний день известны несколько протоколов маршрутизации, которые используют в своей работе идеи самоорганизации в мультиагентных системах. Базовая идея, лежащая в их основе, заключается в выполнении периодической рассылки так называемых «пакетов-муравьев» (ant-пакетов) для того, чтобы в онлайн-режиме поддерживать текущее множество возможных путей и изменять таблицы маршрутизации на сетевых устройствах в режиме реального времени. «Пакеты-муравьи» перемещаются по сети и оставляют на пути движения информацию, похожую на ту, что переносят феромоны у насекомых.

Вероятность выбора некоторого маршрута другими пакетами определяется величиной, которая пропорциональна концентрации феромона на нем. Таким образом, происходит распределенное изучение среды на базе парадигмы накопления–испарения феромонов, что позволяет реализовать динамическое создание эмерджентных структур, за счет чего формируются таблицы маршрутизации.

Из протоколов такого вида можно отметить Ant_Net, ABC и AntHocNet¹. Все перечисленные протоколы обеспечивают высокую устойчивость к ошибкам отдельных сетевых устройств, обладают способностью к балансировке нагрузки каналов, имеют хорошую адаптацию к динамическому изменению топологии сети, добавлению и удалению узлов.

Оверлейной сетью называется виртуальная сеть со структурой, не совпадающей со структурой коммуникационной сети, на базе которой она работает. В оверлейных сетях, как правило, каждая автономная сущность имеет некий набор соседей и может связываться с ними по имени («напрямую»). Для реализации взаимодействия с другими сущностями необходимо использовать определенный метод распределенного поиска.

О наличии коммуникационной сети и о ее структуре рассмотренная оверлейная сеть информации не имеет. Кроме того, ей неизвестно, как реализуется ее непосредственное взаимодействие с соседями и как производится распределенный поиск ответов на запросы. В настоящее время архитектура проектирования информационных систем с применением концепции оверлейной сети рассматривается как перспективная архитектура, которая имеет ряд практических реализаций и хорошо себя зарекомендовала.

В статье M. Jelasity, A. Montresor, O. Babaoglu “T-MAN: Gossip-based fast overlay topology construction”² разработан и исследован протокол T_man. Он представляет собой самоорганизующийся протокол для управления топологией оверлейной сети. Если сказать точнее, он выполняет оптимизацию топологии для целей решения в сети некоторой прикладной или инфраструктурной задачи. В постановке проблемы рассматривается крупномасштабная сеть, имеющая динамическую архитектуру, где каждому узлу известно о существовании лишь сравнительно небольшого числа других узлов в сети.

Протокол основывается на применении так называемой ранжирующей функции, согласно которой каждый узел сети сортирует соседей по степени их полезности относительно показателя качества текущей топологии. В работе рассматривается ранжирующая функция простого вида – функция для вычисления расстояния в некотором пространстве атрибутов. Атрибуты определяются согласно критериям оптимальности для топологии сети. Узел использует данную функцию для обновления

¹ Boztepe I. S., Erdur R. C. Linked Data Aware Agent Development Framework for Mobile Devices // Applied Sciences. – 2018. – 8, 1831, doi:10.3390/app8101831. – URL: https://www.researchgate.net/publication/328154371_Linked_Data_Aware_Agent_Development_Framework_for_Mobile_Devices (дата обращения: 10.08.2020).

² Jelasity M., Montresor A., Babaoglu O. T-MAN: Gossip-based fast overlay topology construction // Computer Networks. – 2009. – № 53 (13). – P. 2321–2339.

списка соседей с помощью удаления наименее полезных из них и пополнения списка с помощью подмножеств соседей своих соседей, которые считаются лучшими согласно ранжирующей функции. Реализация такого алгоритма выполняется с применением протокола Gossip.

Результаты проведенного выше анализа существующих подходов и методов построения АОИТС позволяют обосновать принципы формализации структур и процессов самоорганизации и саморазвития ИТС в нейро-нечеткой агентно-ориентированной парадигме. Для того чтобы определить принципы формализации структур и процессов самоорганизации и саморазвития ИТС в нейро-нечеткой агентно-ориентированной парадигме, перечислим основные задачи, которые должны быть решены:

- оценивание текущих ситуаций, возникающих на различных уровнях управления на основе нечеткой логики;
- прогнозирование изменения текущей ситуации на разных уровнях АОИТС;
- прогнозирование изменения текущих значений контролируемых характеристик QoS;
- выработка управляющих действий на всех уровнях АОИТС;
- оценка событий и текущего значения ресурсов на объектном уровне;
- передача управляющих и информационных сигналов между агентами одного и разных уровней;
- имитационное, ситуационное моделирование функционирования корпоративной сети на структурном уровне.

Для решения перечисленных задач необходим математический аппарат, который совмещает в себе возможности нечеткой логики и нейронных сетей, а также имеет развитые методы верификации построенных на данном аппарате моделей. Такими возможностями обладает разработанный авторами математический аппарат интегрированных атрибутных сетей Петри (далее – ИАСП)¹.

Основные принципы разработки математического аппарата ИАСП:

- конвергенция предикатно-переходных, нечетких сетей Петри (далее – СП) и нечеткой логики, что позволяет построить новый подкласс нечетких СП;
- конвергенция предикатно-переходных СП, нечетких СП и искусственных нейронных сетей, что позволяет построить новый подкласс нейронных СП;
- конвергенция нового подкласса нечетких СП и других расширений СП, благодаря чему можно построить новый подкласс атрибутных СП;
- модульность построения отдельных агентов на соответствующем для данного агента по функциональным возможностям подклассе расширения СП;
- интеграция всех модулей на основе общих свойств предлагаемых подклассов СП.

¹ Суконщиков А. А., Кочкин Д. В., Швецов А. Н. Нечеткие и нейронные сети Петри. – Курск: Университетская книга, 2019. – 209 с.

Модульность предлагаемого аппарата заключается в разработке следующих модулей ИАСП:

- модулей на основе введенного подкласса нечетких СП для оценки текущих ситуаций, событий и значения ресурсов, а также выработки управляющих действий на всех уровнях системы автоматизированного моделирования и параметрической оптимизации (далее – СИАМ);
- модулей на основе введенного подкласса нейронных СП для прогнозирования изменения текущей ситуации на разных уровнях модели СИАМ и прогнозирования изменения текущих значений контролируемых характеристик QoS;
- модулей имитационного моделирования агентов функционирования в устройствах корпоративной сети на структурном уровне на основе введенного подкласса нечетких атрибутивных СП;
- модулей взаимосвязи между перечисленными выше модулями на основе введенного подкласса нечетких СП.

Общее свойство всех разрабатываемых коллективом модулей ИАСП – возможность обрабатывать нечеткие данные. Следовательно, для интеграции всех модулей обязательным является атрибут метки ИАСП – степень (функция) принадлежности μ_i .

Для всех разработанных подклассов ИАСП можно применить такие методы верификации, как матричный метод и метод дерева достижимости.

Выводы

Для построения АОИТС сформированы новые принципы, которым должны соответствовать указанные системы: принцип структуризации целей; принцип агентной ориентации; принцип иерархической интеллектуальной организации; принцип модульности ИА; принцип структурно-функциональной гибкости ИА; принцип единого математического аппарата; принцип саморазвития и эволюции системы.

Реализация предложенных принципов предполагает развитие направления ситуационного моделирования ИТС посредством добавления к каждому ситуационному уровню дополнительно событийного и структурного уровней¹. Событийный уровень отражает все происходящие события в модели АОИТС, а структурный уровень – внутреннюю структуру ИТС и, кроме того, позволяет провести имитационное моделирование и получить результаты возможного функционирования АОИТС при различных вариантах поведения инфокоммуникационной среды. При построении АОИТС с поддержкой качества обслуживания предполагается дальнейшее исследование поведения ИТС на следующих уровнях системного представления: уровне имитационного моделирования (уровне структурной схемы сети); уровне локальных систем управления (уровне объекта); уровне управления подсетью на основе анализа ситуаций, сложившихся на объектах подсети; уровне управления корпоративной сетью.

¹ Sukonschikov A., Kochkin D., Shvetsov A., Andrianov I., Sorokin A., Rzheutskaya S. Modeling the Elements of an Enterprise Infocommunication System Using Colored Petri Nets // Conference of Open Innovations Association, FRUCT. – 2020. – № 26. – P. 660–666.

Для последующей самоорганизации АОИТС авторы статьи разрабатывают метод синтеза прогностических моделей, обеспечивающих поддержку принятия решений по управлению сложными ИТС на основе двух типов прикладных онтологий: информационной системы и агентно-ориентированной модели¹. Применение предложенного подхода даст возможность разрабатывать программные интерфейсы для интеграции агент-ориентированных моделей и информационных систем, которые могут облегчить решение задач по идентификации элементов одной системы в другой для получения возможности интерпретации результатов выполняемых ими специализированных функций, а также выполнять синтез наборов экземпляров объектов одной системы на основе сведений, содержащихся в другой системе. На стадии синтеза агент-ориентированной модели наличие метаонтологии позволит объединить модули моделей поведения одних и тех же компонентов, определенных в различных предметных онтологиях.

Список литературы

Городецкий В. И. Самоорганизация и многоагентные системы. I. Модели многоагентной самоорганизации // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2012. – № 2. – С. 92–120.

Городецкий В. И. Самоорганизация и многоагентные системы. II. Приложения и технология разработки // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2012. – № 3. – С. 102–123.

Князева Е. Н., Курдюмов С. П. Синергетика: нелинейность времени и ландшафты коэволюции. – Москва: КомКнига, 2007. – 272 с.

Суконщиков А. А., Кочкин Д. В., Швецов А. Н. Нечеткие и нейронные сети Петри. – Курск: Университетская книга, 2019. – 209 с.

Хакен Г. Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам. – Москва: КомКнига, 2005. – 248 с.

Швецов А. Н., Дианов С. В. Использование онтологий в процессах синтеза агент-ориентированных моделей сложных систем // Перспективное развитие науки, техники и технологий: сборник научных статей IX Международной научно-практической конференции (01 ноября 2019 года) / под редакцией А. А. Горохова. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2019. – С. 344–347.

Ashby W. R. Principles of the Self-Organizing Dynamic System // The Journal of General Psychology. – 1947. – № 37. – P. 125–128.

Ashby W. R. Principles of the Self-Organizing System // Principles of Self-Organization: Transactions of the University of Illinois Symposium / edited by H. Von Foerster and G. W. Zopf, Jr. – London: Pergamon Press, 1962. – P. 255–278.

Bernon C., Chevrier V., Hilaire V., Marrow P. Applications of Self-Organising Multi-Agent Systems: An Initial Framework for Comparison // Informatica. – 2006. – № 30. – P. 73–82.

¹ Швецов А. Н., Дианов С. В. Использование онтологий в процессах синтеза агент-ориентированных моделей сложных систем // Перспективное развитие науки, техники и технологий: сборник научных статей IX Международной научно-практической конференции (01 ноября 2019 года) / под редакцией А. А. Горохова. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2019. – С. 344–347.

Boztepe I. S., Erdur R. C. Linked Data Aware Agent Development Framework for Mobile Devices // *Applied Sciences*. – 2018. – 8, 1831, doi:10.3390/app8101831. – URL: https://www.researchgate.net/publication/328154371_Linked_Data_Aware_Agent_Development_Framework_for_Mobile_Devices (дата обращения: 10.08.2020).

Jelasy M., Montresor A., Babaoglu O. T-MAN: Gossip-based fast overlay topology construction // *Computer Networks*. – 2009. – № 53 (13). – P. 2321–2339.

Sukonschikov A., Kochkin D., Shvetsov A., Andrianov I., Sorokin A., Rzhetskaya S. Modeling the Elements of an Enterprise Infocommunication System Using Colored Petri Nets // Conference of Open Innovations Association, FRUCT. – 2020. – № 26. – P. 660–666.

References

Gorodetskii V. I. Samoorganizatsiia i mnogoagentnye sistemy. I. Modeli mnogoagentnoi samoorganizatsii [Self-organization and multiagent systems: I. Models of multiagent self-organization]. *Izvestiia RAN. Teoriia i sistemy upravleniia* [Journal of computer and systems sciences international], 2012, no. 2, pp. 92–120.

Gorodetskii V. I. Samoorganizatsiia i mnogoagentnye sistemy. II. Prilozheniia i tekhnologiia razrabotki [Self-organization and multiagent systems: II. Applications and the development technology]. *Izvestiia RAN. Teoriia i sistemy upravleniia* [Journal of computer and systems sciences international], 2012, no. 3, pp. 55–75.

Kniazeva E. N., Kurdiymov S. P. *Sinergetika: nelineinost' vremeni i landshafty koevoliutsii* [Synergetics: Time nonlinearity and coevolution landscapes]. Moscow: KomKniga, 2007. 272 p.

Sukonshchikov A. A., Kochkin D. V., Shvetsov A. N. *Nechetkie i neironnyie seti Petri* [Fuzzy and neural Petri networks]. Kursk: Universitetskaia kniga, 2019. 209 p.

Khaken G. *Informatsiia i samoorganizatsiia. Makroskopicheski podkhod k slozhnym sistemam* [Information and self-organization. Macroscopic approach to complex systems]. Moscow: KomKniga, 2005. 248 p.

Shvetsov A. N., Dianov S. V. Ispol'zovanie ontologii v protsessakh sinteza agent-orientirovannykh modelei slozhnykh sistem [Applying ontologies in the synthesis processes of agent-oriented models of complex systems]. *Perspektivnoe razvitie nauki, tekhniki i tekhnologii: sbornik nauchnykh statei IX Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii (Kursk, 01 noiabria 2019 g.)* [Forward-looking development of science: Proceedings of the IX International research and practice conference (Kursk, November 1, 2019); ed. by A. A. Gorokhov]. Kursk: Iugo-Zapadnyi gosudarstvennyi universitet, 2019, pp. 344–347.

Ashby W. R. Principles of the Self-Organizing Dynamic System. *The Journal of General Psychology*, 1947, vol. 37, iss. 2, pp. 125–128.

Ashby W. R. Principles of the Self-Organizing System. *Principles of Self-Organization: Transactions of the University of Illinois Symposium*; ed. by H. Von Foerster, G. W. Zopf, Jr. London: Pergamon Press, 1962, pp. 255–278.

Bernon C., Chevrier V., Hilaire V., Marrow P. Applications of Self-Organising Multi-Agent Systems: An Initial Framework for Comparison. *Informatica*, 2006, no. 30, pp. 73–82.

Boztepe I. S., Erdur R. C. Linked Data Aware Agent Development Framework for Mobile Devices. *Applied Sciences*, 2018, vol. 8, iss. 10, doi:10.3390/app8101831. Available at: https://www.researchgate.net/publication/328154371_Linked_Data_Aware_Agent_Development_Framework_for_Mobile_Devices (accessed: 10.08.2020).

Jelasy M., Montresor A., Babaoglu O. T-Man: Gossip-based fast overlay topology construction. *Computer Networks*, 2009, no. 53 (13), pp. 2321–2339.

Sukonschikov A., Kochkin D., Shvetsov A., Andrianov I., Sorokin A., Rzheutskaya S. Modeling the Elements of an Enterprise Infocommunication System Using Colored Petri Nets. *Proceedings of the 26th Conference of the Open Innovations Association FRUCT (Yaroslavl, Russia, 23–25 April 2020)*, 2020, no. 26, pp. 660–666.

Для цитирования: Суконщиков А. А., Швецов А. Н., Андрианов И. А., Кочкин Д. В. Принципы построения самоорганизующихся информационно-телекоммуникационных систем // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2021. – № 1 (100). – С. 56–67. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2021-1-100-4>

For citation: Sukonschikov A. A., Shvetsov A. N., Andrianov I. A., Kochkin D. V. Principles of building self-organizing information and telecommunication systems. *Cherepovets State University Bulletin*, 2021, no. 1 (100), pp. 56–67. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2021-1-100-4>

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Сведения об авторах

Алексей Александрович
Суконщиков /
Alexey A. Sukonschikov

Кандидат технических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-8673-3314>, aas313@mail.ru, Вологодский государственный университет (д. 15, ул. Ленина, 160000 г. Вологда, Российская Федерация) / Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-8673-3314>, aas313@mail.ru, Vologda State University (15, ul. Lenina, 160000 Vologda, Russian Federation).

Анатолий Николаевич
Швецов /
Anatoly N. Shvetsov

Доктор технических наук, профессор, <https://orcid.org/0000-0002-7021-5184>, smithv@mail.ru, Вологодский государственный университет (д. 15, ул. Ленина, 160000 г. Вологда, Российская Федерация) / Doctor of Technical Sciences, Professor, <https://orcid.org/0000-0002-7021-5184>, smithv@mail.ru, Vologda State University (15, ul. Lenina, 160000 Vologda, Russian Federation).

Игорь Александрович
Андрианов /
Igor A. Andrianov

Кандидат технических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-2177-7084>, igand@mail.ru, Вологодский государственный университет (д. 15, ул. Ленина, 160000 г. Вологда, Российская Федерация) / Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-2177-7084>, igand@mail.ru, Vologda State University (15, ul. Lenina, 160000 Vologda, Russian Federation).

Дмитрий Валерьевич
Кочкин /
Dmitriy V. Kochkin

Кандидат технических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-2822-1038>, kochkindv@bk.ru, Вологодский государственный университет (д. 15, ул. Ленина, 160000 г. Вологда, Российская Федерация) / Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-2822-1038>, kochkindv@bk.ru, Vologda State University (15, ul. Lenina, 160000 Vologda, Russian Federation).

Статья поступила в редакцию: 05.11.2020

Одобрена после рецензирования: 02.12.2020

Принята к публикации: 14.12.2020

The article was submitted: 05.11.2020

Approved after reviewing: 02.12.2020

Accepted for publication: 14.12.2020