



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-70-79>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.8

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ И КОМПЛЕКСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИХ РАЗРАБОТКИ, ПРИМЕНЕНИЯ И МОДЕРНИЗАЦИИ

В. В. ГОЛЕНКОВ, Н. А. ГУЛЯКИНА, В. П. ИВАШЕНКО, Д. В. ШУНКЕВИЧ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 29.01.2024

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. Рассмотрены тенденции развития технологий искусственного интеллекта в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники за последние пять лет, перечислены основные результаты, полученные за указанный период как в области развития самих технологий искусственного интеллекта, так и в области подготовки кадров по искусственному интеллекту и реализации взаимодействия между коллективами специалистов, работающих в данной области. Обоснована необходимость перехода к интеллектуальным компьютерным системам нового поколения, обладающим высоким уровнем интероперабельности, и создания соответствующей комплексной технологии их разработки, сопровождения и эксплуатации. Изучены проблемы, препятствующие активной разработке и внедрению интеллектуальных компьютерных систем нового поколения, рассмотрено понятие смыслового пространства как основы представления и интеграции знаний в таких системах. Приведены принципы реализации аппаратной платформы интерпретации информационных процессов в смысловом пространстве – ассоциативного семантического компьютера.

Ключевые слова: искусственный интеллект, технология OSTIS, интеллектуальная компьютерная система нового поколения, смысловое пространство, SC-код, онтология, ассоциативный семантический компьютер, интероперабельность, конвергенция, семантическая совместимость.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Авторы выражают благодарность коллективу кафедры интеллектуальных информационных технологий БГУИР за помощь в работе и ценные замечания.

Для цитирования. Интеллектуальные компьютерные системы нового поколения и комплексная технология их разработки, применения и модернизации / В. В. Голенков [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 2. С. 70–79. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-70-79>.

INTELLIGENT COMPUTER SYSTEMS OF NEW GENERATION AND COMPLEX TECHNOLOGY OF THEIR DEVELOPMENT, APPLICATION AND MODERNIZATION

VLADIMIR V. GOLENKOV, NATALIA A. GULYAKINA,
VALERIAN P. IVASHENKO, DANIIL V. SHUNKEVICH

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 29.01.2024

Abstract. The paper considers the trends in the development of artificial intelligence technologies in BSUIR for the last five years, lists the main results obtained during this period both in the field of development of artificial intelligence technologies themselves, and in the field of education in artificial intelligence and realization of interaction between teams of specialists working in this field. The necessity of transition to new-generation in-

telligent computer systems with a high level of interoperability and creation of an appropriate complex technology for their development, maintenance and operation is substantiated. The problems hindering the active development and implementation of new generation intelligent computer systems are considered. The concept of semantic space as a basis for representation and integration of knowledge in intelligent computer systems of new generation is considered. The principles of implementation of hardware platform for interpretation of information processes in the semantic space – associative semantic computer – are considered.

Keywords: artificial intelligence, OSTIS technology, intelligent computer system of new generation, semantic space, SC-code, ontology, associative semantic computer, interoperability, convergence, semantic compatibility.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. The authors would like to express their gratitude to the collective of the Department of Intelligent Information Technologies of BSUIR for their help in the work and valuable comments.

For citation. Golenkov V. V., Gulyakina N. A., Ivashenko V. P., Shunkevich D. V. (2024) Intelligent Computer Systems of New Generation and Complex Technology of Their Development, Application and Modernization. *Doklady BGUIR*. 22 (2), 70–79. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-70-79> (in Russian).

Развитие исследований в области искусственного интеллекта в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники

Спектр исследований в области искусственного интеллекта (ИИ), проводимых в БГУИР, достаточно широк и включает в себя обработку сигналов, изображений и речи, робототехнику, машинное обучение, анализ больших данных, искусственные нейронные сети и др. В настоящее время основное направление в разработке технологий ИИ – повышение уровня интеллекта компьютерных систем, т. е. переход от так называемого слабого ИИ к сильному. В то же время расширение областей применения интеллектуальных компьютерных систем (ИКС) предъявляет к ним принципиально новые требования. Все более актуальным является создание интеллектуальных компьютерных систем нового поколения (ИКСНП), обладающих высоким уровнем интероперабельности. В данном случае под интероперабельностью [1] понимается не просто обеспечение совместимости систем на уровне технической реализации (согласование протоколов взаимодействия, программных интерфейсов и т. д.), а обеспечение их семантической совместимости и способности к коллективному решению сложных задач. Это предполагает существенное развитие и повышение уровня формализации теории ИКС, переосмысление существующих технологий их разработки и сопровождения в контексте обеспечения конвергенции. В свою очередь, для того, чтобы обеспечить широту сфер применения такой технологии и ее жизнеспособность, необходимо учитывать дополнительное требование, предъявляемое уже к самой технологии – ее комплексность в двух разных аспектах:

- комплексность объекта разработки и сопровождения, предполагающая, что технология обеспечивает разработку и сопровождение ИКС любых классов, а также любых компонентов ИКС. Это необходимо для обеспечения совместимости всех компонентов ИКС и систем разных классов, и как следствие – для обеспечения их интероперабельности;

- комплексность с точки зрения поддержки всех этапов жизненного цикла ИКС и их компонентов. Необходимость данного аспекта обусловлена тем, что разработка технологии проектирования ИКСНП без разработки технологий их сопровождения, эволюции и эксплуатации в перспективе будет сильно затруднять трудоемкость внедрения таких систем и эффективность их применения.

С учетом комплексности технологии важной особенностью должен стать ее открытый характер, предполагающий, с одной стороны, возможность участия в ее разработке ученых из различных областей науки независимо от их территориального расположения, с другой стороны – возможность интеграции любых результатов в области ИИ, как уже полученных, так и тех, что будут получены в будущем. В противном случае достичь комплексности технологии в обоих аспектах не представляется возможным.

Важнейшая проблема в области разработки технологий ИИ – необходимость подготовки высококвалифицированных кадров. С 1995 г. в БГУИР ведется подготовка молодых специалистов по специальности «Искусственный интеллект», создана соответствующая кафедра. При содействии БГУИР в течение последних пяти лет открыта подготовка по специальности «Искусственный интеллект» в Гродненском государственном университете имени Янки Купалы и Полоцком

государственном университете имени Евфросинии Полоцкой. Таким образом, подготовка по указанной специальности уже ведется в четырех вузах республики (с учетом Брестского государственного технического университета (БрГТУ)), при этом БГУИР является головной организацией по данной специальности. Основная идея организации учебного процесса по специальности «Искусственный интеллект» заключается в реализации концепции тесной интеграции бизнеса, образования и науки при подготовке специалистов первой и второй ступеней высшего образования. Данная идея предполагает привлечение студентов и магистрантов к разработке реальных ИКС различного назначения, а также постоянную адаптацию учебного материала к современному уровню развития технологий в сфере ИИ.

При непосредственном участии БГУИР в рамках Национального детского технопарка открыта подготовка по программе «Искусственный интеллект» по направлению «Информационные и компьютерные технологии». Реализация данной программы позволяет школьникам не только приобрести навыки применения современных технологий разработки ИКС, но и получить представление о современных проблемах в этой области, о подходах к их решению, что важно при их дальнейшем обучении и развитии профессиональных качеств. В 2023 г. состоялся первый выпуск учащихся по данной программе, полученные результаты позволили выпускникам принять участие в конкурсе «100 идей для Беларуси» и подготовить материалы для научных публикаций.

Развитие открытых комплексных технологий требует консолидации усилий научных и производственных коллективов в соответствующей области как в республике, так и за рубежом. При непосредственном участии БГУИР в 2018 г. воссоздано Белорусское общественное объединение специалистов в области искусственного интеллекта (БОИИ), объединившее в себе специалистов из всех регионов Беларуси, а также России, Украины, Латвии и других стран.

В 2021 г. начата и успешно реализуется программа подготовки студентов из Узбекистана в рамках совместной образовательной программы БГУИР–ТУИТ (ТУИТ – Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада аль-Хорезми). В 2023-м состоялся первый выпуск по этой программе, по итогам которого часть иностранных студентов приняла решение продолжить обучение в БГУИР в магистратуре и участвовать в разработке и применении технологий ИИ. Параллельно с обучением студентов велась активная работа по взаимодействию с научными коллективами Узбекистана, в результате которого была проведена совместная конференция «Цифровые технологии: проблемы и решения практической реализации в отрасли» и подана заявка на совместный проект БРФФИ–МИРРУ (БРФФИ – Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований; МИРРУ – Министерство инновационного развития Республики Узбекистан).

В 2020 г. на базе БГУИР создано Учебно-научное объединение по направлению «Искусственный интеллект» (УНО-ИИ), в состав которого вошли кафедры и лаборатории вуза, подразделения других учреждений образования, общественные организации и коммерческие структуры. Цель УНО-ИИ – объединение и согласование на республиканском уровне усилий представителей различных сфер по разработке общей теории и технологии проектирования ИКСНП. Основные сферы применения результатов научной работы в рамках УНО-ИИ в настоящее время включают:

- разработку комплекса интеллектуальных обучающих систем по дисциплинам среднего и высшего образования (умные учебники (Smart Books));
- разработку систем автоматизации производства в контексте направлений Industry 4.0 и Internet of Things, в частности, разработку интеллектуальных робототехнических систем (совместно с представителями БрГТУ и передовыми белорусскими предприятиями, такими как ОАО «Савушкин продукт»);
- интеллектуализацию сферы услуг – интеллектуальные гиды по достопримечательностям, интеллектуальные рекомендательные системы различного назначения;
- разработку интеллектуальных диалоговых систем различного назначения, в том числе с речевым интерфейсом;
- разработку компьютеров нового поколения – семантических ассоциативных компьютеров.

Для обсуждения проблем создания открытой комплексной технологии компонентного проектирования семантически совместимых интероперабельных гибридных интеллектуальных систем, обеспечивающей совместимость и интеграцию частных технологий ИИ, на базе БГУИР совместно с другими образовательными и научными учреждениями с 2010 г. проводится ежегодная Международная научно-техническая конференция Open Semantic Technology for Intelligent Systems (OSTIS). Ее формат – обсуждение различных вопросов создания указанной технологии

и выставочные презентации докладов. За последние пять лет в конференциях OSTIS приняли участие представители Беларуси, России, Украины, Казахстана, Узбекистана, Таджикистана, Китая, США, Латвии. По итогам OSTIS издается сборник научных трудов, в 2021 г. включенный в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований. Кроме того, некоторые материалы конференции включаются в сборник избранных трудов, публикуемый издательством Springer и индексируемый в Scopus [2]. В 2021-м издана первая версия стандарта открытой семантической технологии проектирования ИКСНП [3], а в 2023-м – коллективная монография [4], отражающая текущее состояние данной технологии, в числе авторов которой – более 30 представителей организаций, входящих в состав УНО-ИИ, являющихся членами БОИИ и представляющих разные регионы Беларуси (Минск, Гомель, Брест, Полоцк, Гродно).

Современное состояние исследований в области ИИ в БГУИР и, в частности, появление первой версии комплексной технологии проектирования ИКСНП делают перспективной идею развития комплексной информатизации Беларуси на основе ИКСНП и соответствующей технологии. Реализация этой идеи предполагает решение таких задач, как:

- расширение научных исследований по развитию теории ИКСНП;
- разработка следующей версии комплексной технологии проектирования и модернизации ИКСНП, включающей:
 - технологию коллективного проектирования и модернизации баз знаний ИКСНП;
 - технологию проектирования и модернизации решателей задач ИКСНП;
 - технологию проектирования и модернизации интерфейсов ИКСНП;
 - программную платформу ИКСНП, обеспечивающую реализацию базовой модели представления и обработки знаний в ИКСНП;
 - компьютер нового поколения, ориентированный на реализацию (аппаратную поддержку) ИКСНП;
 - комплексную библиотеку многократно используемых компонентов ИКСНП;
- разработка архитектуры глобальной экосистемы ИКСНП, обеспечивающей комплексную автоматизацию всех видов человеческой деятельности;
 - организация подготовки кадров для разработки и внедрения ИКСНП;
 - разработка и внедрение ИКСНП (в рамках глобальной экосистемы) в различных отраслях – образовании, здравоохранении, научно-исследовательской и проектной деятельности, стандартизации, юриспруденции, налогообложении, энергетике, жилищно-коммунальном хозяйстве, транспорте, промышленном производстве, умном городе нового поколения и др.

Проблемы современного состояния работ в области искусственного интеллекта и предлагаемый подход к их решению

К основным проблемам современного состояния работ в области ИИ относятся следующие [4, 5].

- Как отмечено в [6], в современных обсуждениях об ИИ научные споры часто смещаются в сторону завышенных ожиданий от скорого его внедрения, появления «сильного» ИИ и значительного сужения самой его темы, сводя ее к машинному обучению на основе искусственных нейронных сетей. В результате на второй план отходят такие важные направления, как онтология, база знаний, методы рассуждений и принятия решений, методы синтеза и анализа сложных структур, киберфизические системы, цифровые двойники, автономные системы, системы интеллектуального анализа данных и др. В то же время расширение областей применения ИКС требует перехода к ИКСНП, обладающим высоким уровнем интероперабельности. Это, в свою очередь, предполагает обеспечение конвергенции и интеграции различных технологий ИИ, чего в настоящий момент не происходит.

- Современные технологии ИИ, как правило, ориентированы на локальную автоматизацию отдельных процессов, а не на комплексную автоматизацию разных видов человеческой деятельности, предполагающую совместное использование различных знаний и моделей решения задач. Как следствие, несмотря на локальные успехи в отдельных областях ИИ, существенного повышения уровня автоматизации человеческой деятельности не происходит – мы все еще далеки от появления действительно «умных» домов, больниц, школ, производственных предприятий, городов.

• Современные технологии ИИ не обладают свойством комплексности; они ориентированы на проектирование отдельных компонентов ИКС или отдельных их классов. При этом не рассматриваются вопросы обеспечения совместимости различных компонентов систем в единой системе и системах разных классов в рамках коллективов таких систем, способных согласованно решать сложные задачи. Кроме того, современные технологии ИИ, как правило, не ориентированы на поддержку всех этапов жизненного цикла ИКС. Следствием этого является высокий уровень трудоемкости разработки, модернизации и эксплуатации ИКС, что, в свою очередь, снижает степень их распространенности и доступности.

Решению перечисленных проблем препятствует основная методологическая проблема в области ИИ – отсутствие общей формальной теории и технологии для разработки, производства и модернизации совместимых ИКС, что, в свою очередь, связано с отсутствием стандартизации и унификации таких систем и их компонентов. Кроме того, в настоящее время не хватает квалифицированных специалистов, необходимых для создания общей теории ИКС и разработки комплексных технологий их проектирования, производства и модернизации. Существующие специалисты в этой области сами часто не обладают достаточным уровнем интероперабельности и мотивации для объединения и интеграции различных направлений ИИ.

В качестве подхода к решению перечисленных проблем предложена концепция и разработана стартовая версия комплексной технологии разработки и модернизации ИКСНП, названная технологией OSTIS. Результаты в области разработки этой технологии и детальное обоснование ее создания отражены в [3, 4, 7, 8]. ИКСНП, разрабатываемые по OSTIS, названы *ostis-системами*. Сама технология OSTIS реализуется в форме специальной *ostis-системы* – метасистемы OSTIS, база знаний которой содержит формальную теорию *ostis-систем*, стандарт *ostis-систем* и технологии OSTIS (стандарт OSTIS), ядро библиотеки многократно используемых компонентов *ostis-систем* (библиотеки OSTIS), а также методики и инструментальные средства поддержки жизненного цикла *ostis-систем* и их компонентов. В основе технологии OSTIS лежит универсальный способ смыслового представления (кодирования) информации в памяти ИКС, названный SC-кодом. Тексты SC-кода (*sc-тексты*, *sc-конструкции*) – это унифицированные семантические сети с базовой теоретико-множественной интерпретацией. Актуальный этап развития технологии OSTIS – переход от индивидуальных *ostis-систем* к сообществу интероперабельных *ostis-систем* – глобальной экосистеме OSTIS. Экосистема OSTIS – социотехническая экосистема, представляющая собой коллектив взаимодействующих семантических компьютерных систем и осуществляющая перманентную поддержку эволюции и семантической совместимости всех входящих в нее систем на протяжении всего их жизненного цикла [4, 9].

Смысловое пространство как основа представления и интеграции знаний в интеллектуальных компьютерных системах нового поколения

К основным признакам знаний в ИКС относят [10]: связность, наличие сложной структуры, интерпретируемость, активность, наличие семантической метрики, шкалируемость. Представление знаний как область ИИ имеет продолжительную историю [11]. Для представления используются различные формализмы и структуры [3, 11]. Одна из приоритетных задач – задача смыслового представления знаний [12], или задача формализации смысла. Ее решение предполагает формирование соответствующих информационных конструкций, описание их свойств и различных видов, исследование возможности их взаимосвязи в смысловом пространстве [12–14]. Изучение метрических и топологических свойств позволяет выявлять подобие или семантическую близость информационных конструкций, избавляться от избыточности представления знаний и оптимизировать их поиск, в том числе в целях повторного использования компонентов баз знаний [13, 15], сокращая трудозатраты на разработку и обеспечение качества баз знаний и соответствующих ИКСНП [4].

Вопрос смыслового представления – это вопрос соотношения синтаксиса и семантики, так как тексты конечны, а смысловое пространство потенциально бесконечное. Среди элементов информационных конструкций смыслового пространства, хранящихся в базах знаний, выделяются обозначения связей, классов и структур [4]. Каждому классу принадлежат только такие элементы, которые обладают уникальным для этого класса признаком. Подобными классами являются классы: конечных множеств, конечных ориентированных множеств, наследственно конечных ориентированных множеств [13, 16], наследственно конечных множеств [17], структур из наследственно конечных множеств, натуральных чисел. Между структурами, подобными классами

и их элементами могут быть установлены отношения подкласса, сходства и семантической близости, с помощью которых могут быть исследованы метрические или топологические свойства элементов этих классов.

Примеры классов более сложных информационных конструкций – классы конечных рефлексивных и взаимно рефлексивных (нефундированных [18]) множеств, которые за конечное количество шагов достижимы по связкам отношения принадлежности из самих себя (своих обозначений). Такие множества являются и множеством, и элементом в структуре, образованной из всех достижимых по связкам принадлежности элементов данного множества. Другие классы соответствуют обобщенным формальным языкам [13, 16], конечным классическим и неклассическим ориентированным, неориентированным и смешанным графовым, псевдографовым, гиперграфовым (включая (абстрактные) симплициальные комплексы [19]), мультиграфовым, метаграфовым, метапсевдографовым, метагиперграфовым и т. п. структурам. Все эти классы являются счетными.

Что касается интеграции знаний (информационных конструкций) в ИКСНП, выделены четыре вида интеграции в соответствии с направлениями [15]: вертикальная (реализуется через компиляцию и интерпретацию), горизонтально-фронтальная (через коммуникацию), горизонтально-профильная (через унификацию) и непрерывная (через обучение). Вертикальная – это интеграция информационных конструкций различных моделей представления или обработки информации, одна из которых реализуется на другой. Горизонтально-фронтальная – интеграция конструкций различных моделей представления или обработки информации, одна из которых параллельно взаимодействует (сообщается) с другой. Горизонтально-профильная – это интеграция конструкций в рамках одной модели унифицированного представления или обработки информации. Непрерывная – интеграция конструкций (знаний) в рамках одной модели представления или обработки информации на протяжении длительного периода времени. Полноценная ИКСНП предполагает движение по каждому из направлений.

Подходы к изучению топологических и метрических свойств смыслового подпространства рассмотрены в [4, 13, 14, 20]. На основе полученных результатов предложены средства представления пространственно-временных сущностей, событий и явлений, включая процессы обработки знаний и отношений между ними [21]. Для интеграции и представления знаний в логических моделях обработки информации [22], описывающих динамические сущности [23], предложены средства [13], являющиеся семантической основой для модели унифицированного семантического представления знаний [13, 16] и языков представления знаний технологии OSTIS [3, 4].

Платформы интерпретации информационных процессов в смысловом пространстве

Один из ключевых принципов технологии OSTIS – обеспечение платформенной независимости ostis-систем, т. е. строгое разделение логико-семантической модели системы и платформы интерпретации таких sc-моделей (ostis-платформы) [4]. В любом варианте реализации ostis-платформы всегда присутствуют как программная, так и аппаратная части. Так, любой программный вариант ostis-платформы [24] предполагает его последующую интерпретацию на какой-либо аппаратной основе, например, на персональном компьютере с традиционной архитектурой. В то же время актуальной является разработка ostis-платформы в виде специализированного ассоциативного семантического компьютера [4], ориентированного на аппаратную реализацию sc-памяти.

Возможны разные варианты реализации ассоциативного семантического компьютера, подробно рассмотренные в [4], где отмечено, что наиболее перспективный – вариант реализации с мелкозернистой архитектурой, в котором процессор-память ассоциативного семантического компьютера состоит из однотипных модулей – процессорных элементов. Каждый процессорный элемент соответствует одному sc-элементу (хранит один sc-элемент или в текущий момент времени не хранит ничего). Процессорные элементы связаны между собой двумя типами каналов связи – физическими, число которых ограничено, и логическими, соответствующих связям инцидентности между sc-элементами, их число потенциально не ограничено. Конфигурация физических каналов связи фиксируется и в общем случае не зависит от конфигурации логических каналов связи. Каждый процессорный элемент может отправлять сообщения (микропрограммы) другим и принимать сообщения от иных процессорных элементов по логическим каналам связи. В свою очередь, на физическом уровне передача сообщений осуществляется по физическим каналам связи.

Язык описания микропрограмм интерпретации команд ассоциативного семантического компьютера не может быть построен как традиционные языки программирования, поскольку они предполагают возможность непосредственного адресного или ассоциативного доступа к произвольным элементам памяти, что невозможно в рамках рассматриваемой архитектуры. В качестве основы для разработки такого языка и средств описания соответствующих информационных процессов предлагается взять волновые языки программирования и технологии пространственного захвата, развиваемые школой П. С. Сапатога [25], а также работы по инсерционному программированию и моделированию А. А. Летичевского [26]. Рассмотрим два основных подхода к организации обработки информации в рамках такой процессоро-памяти.

Первый вариант предполагает, что sc-конструкция уложена в процессоро-память произвольным образом. В этом случае инцидентные друг другу sc-элементы соединены логическим каналом связи, но при этом соответствующие им процессорные элементы могут находиться на произвольном расстоянии друг от друга в плане физического расположения в процессоро-памяти. Для обработки информации при таком варианте хранения sc-конструкций предлагается использовать следующие принципы:

- сообщения, содержащие программы обработки информации, передаются в виде глобальных волн по всем физическим каналам связи, начиная от процессорного элемента, инициирующего процесс обработки. Каждое сообщение содержит информацию о том, какие именно sc-элементы должны быть обработаны. Таким образом, решение о необходимости выполнения соответствующих команд принимает каждый процессорный элемент самостоятельно, при этом передаваемые сообщения могут быть сложными;

- независимо от того, были ли выполнены соответствующие команды в рамках конкретного процессорного элемента, каждый процессорный элемент передает сообщение дальше по физическим каналам связи. Каждое сообщение имеет уникальный идентификатор волны, который дублируется при передаче данного сообщения дальше. Это дает возможность, с одной стороны, связывать сообщения между собой, а с другой – позволяет процессорным элементам понимать, какие волны уже были ими обработаны. При этом каждый процессорный элемент хранит информацию о том, какое сообщение было получено по какому из каналов связи для того, чтобы не отправлять то же самое сообщение повторно к его источнику;

- в результате выполнения содержащейся в сообщении программы в процессорном элементе формируется ответное сообщение, содержание которого в общем случае определяется семантикой указанной программы;

- процессорный элемент, получивший некоторое сообщение и выполнивший соответствующую программу, может инициировать новую волну сообщений и таким образом продолжить обработку информации уже независимо от процессорного элемента, отправившего исходную волну.

Такой подход обладает рядом существенных недостатков, связанных со значительной нагрузкой на физические каналы связи и с зависимостью скорости работы системы от пропускной способности физических каналов связи и скорости передачи сообщений по этим каналам.

Второй вариант обработки призван устранить часть недостатков первого за счет организации укладки sc-конструкций в процессоро-память таким образом, чтобы конфигурация логических каналов связи соответствовала конфигурации физических каналов связи. Ключевые особенности такого подхода заключаются в следующем:

- предлагается часть процессорных элементов при необходимости использовать в качестве коммутаторов (коммутационный элемент). Коммутатор не хранит никакой sc-элемент, а является «виртуальной копией» соответствующего процессорного элемента, с которым связан одним из физических каналов связи (факт такой связи явно фиксируется). Остальные физические каналы данного коммутатора считаются физическими каналами указанного процессорного элемента. При необходимости может формироваться цепочка коммутаторов, соответствующих одному и тому же процессорному элементу;

- при укладке sc-конструкции в процессоро-память sc-элементы помещаются в процессорные элементы так, чтобы инцидентные sc-элементы находились в процессорных элементах, связанных физическим каналом связи, при необходимости вводятся коммутаторы. Аналогичным образом осуществляется добавление нового фрагмента к уже уложенной sc-конструкции;

- передача сообщений между процессорными элементами и интерпретация записанных в сообщениях программ осуществляются не глобальными волнами по физическим каналам связи, а по целенаправленно логическим каналам связи.

Таким образом, ключевым достоинством второго варианта является снижение нагрузки на каналы связи и зависимости от их пропускной способности. В то же время укладка sc-конструкции в процессоро-память в соответствии с изложенными принципами может занять длительное время, а при добавлении нового фрагмента к уже уложенной sc-конструкции может потребоваться повторная укладка значительной части этой sc-конструкции. Кроме того, существует ограничение, связанное с принципиальной возможностью такой укладки (граф инцидентов, соответствующий sc-конструкции, должен быть планарным).

С учетом достоинств и недостатков рассмотренных подходов к организации обработки информации в ассоциативном семантическом компьютере с мелкозернистой архитектурой можно сказать, что на практике целесообразным будет комбинирование обоих вариантов.

Заключение

1. Рассмотрены тенденции развития технологий искусственного интеллекта в БГУИР за последние пять лет, перечислены основные результаты, полученные как в области развития самих технологий искусственного интеллекта, так и подготовки кадров по искусственному интеллекту и реализации взаимодействия между коллективами специалистов, работающих в данной области.

2. Обоснована необходимость перехода к интеллектуальным компьютерным системам нового поколения, обладающим высоким уровнем интероперабельности. Рассмотрены проблемы, препятствующие активной разработке и внедрению таких систем, представлена первая версия соответствующей технологии.

3. Уделено внимание понятию смыслового пространства как основы представления и интеграции знаний в интеллектуальных компьютерных системах нового поколения. Рассмотрены принципы реализации аппаратной платформы интерпретации информационных процессов в смысловом пространстве – ассоциативного семантического компьютера, сформулированы актуальные задачи и проблемы в области развития теории смыслового пространства и разработки ассоциативных семантических компьютеров.

Список литературы

1. Михневич, С. Ю. Эволюция понятия интероперабельности открытых информационных систем / С. Ю. Михневич, А. А. Тежар // Цифровая трансформация. 2023. Т. 29, № 2. С. 60–66. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-2-60-66>.
2. International Conference on Open Semantic Technologies for Intelligent Systems [Electronic Resource] // SpringerLink. Mode of access: <https://link.springer.com/conference/ostis>. Date of access: 28.01.2024.
3. Голенков, В. В. Открытая технология онтологического проектирования, производства и эксплуатации семантически совместимых гибридных интеллектуальных компьютерных систем / В. В. Голенков, Н. А. Гулякина, Д. В. Шункевич. Минск: Бестпринт, 2021.
4. Технология комплексной поддержки жизненного цикла семантически совместимых интеллектуальных компьютерных систем нового поколения / Под общ. ред. В. В. Голенкова. Минск: Бестпринт, 2023.
5. Палагин, А. В. Проблемы трансдисциплинарности и роль информатики / А. В. Палагин // Кибернетика и системный анализ. 2013. № 5. С. 3–13.
6. Формирование стратегии развития Комитета по искусственному интеллекту в Научно-образовательном центре «Инженерия будущего» / И. И. Барин, [и др.] // Онтология проектирования. 2021. Т. 11, № 3. С. 260–293. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-3-260-293.
7. Голенков, В. В. Графодинамические ассоциативные модели и средства параллельной обработки информации в системах искусственного интеллекта / В. В. Голенков, Н. А. Гулякина // Доклады БГУИР. 2004. № 1. С. 92–101.
8. Семантические технологии проектирования интеллектуальных систем и семантические ассоциативные компьютеры / В. В. Голенков [и др.] // Доклады БГУИР. 2019. № 3. С. 42–50.
9. Zagorskiy, A. Principles for Implementing the Ecosystem of Next-Generation Intelligent Computer Systems / A. Zagorskiy // Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2022): Collection of Scientific Papers. 2022. Iss. 6. P. 347–356. Minsk: Bestprint, 2022.
10. Искусственный интеллект. Справочник. В 3-х кн. / Под ред. Д. А. Поспелова. М.: Радио и связь, 1990. Кн. 2. Модели и методы.
11. Sowa, J. F. Knowledge Representation: Logical, Philosophical, and Computational Foundations. / J. F. Sowa. New York: Brooks/Cole, 2000.
12. Мартынов, В. В. В центре сознания человека / В. В. Мартынов. Минск: Белор. гос. ун-т, 2009.
13. Ivashenko, V. General-Purpose Semantic Representation Language and Semantic Space / V. Ivashenko // Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2022): Collection of Scientific Papers. 2022. Iss. 6. P. 41–64.

14. Ivashenko, V. Semantic Space Integration of Logical Knowledge Representation and Knowledge Processing Models / V. Ivashenko // *Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS): Collection of Scientific Papers*. 2023. Iss. 7. P. 95–11.
15. Ивашенко, В. П. Семантические средства разработки программных компонентов на базе интеграционной платформы / В. П. Ивашенко // *Информационные технологии и системы – 2022 (ИТС-2022): матер. Междунар. науч. конф., г. Минск, 23 ноября 2022 г.* Минск: Белор. гос. ун-т инфор. и радиоэлек., 2022. С. 57–58.
16. Ивашенко, В. П. Модели решения задач в интеллектуальных системах. В 2 ч. / В. П. Ивашенко. Минск: Белор. гос. ун-т инфор. и радиоэлек., 2020. Ч. 1. Формальные модели обработки информации и параллельные модели решения задач.
17. Ackermann, W. Die Widerspruchsfreiheit der Allgemeinen Mengenlehre / W. Ackermann // *Mathematische Annalen*. 1937. No 114. P. 305–315.
18. Kanamori, A. Bernays and Set Theory / A. Kanamori // *Bulletin of Symbolic Logic*. 2009. No 15. P. 43–69.
19. Hatcher, A. *Algebraic Topology* / A. Hatcher. Great Britain: Cambridge University Press, 2002.
20. Ivashenko, V. Structures and Measures in Knowledge Processing Models / V. Ivashenko // *Pattern Recognition and Information Processing (PRIP'2023): Proceedings of the 16th International Conference, Minsk, October 17–19, 2023*. Minsk: United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, 2023. P. 16–21.
21. Ивашенко, В. П. Онтологическая модель пространственно-временных отношений событий и явлений в процессах обработки знаний / В. П. Ивашенко // *Вестник Брестского государственного технического университета*. 2017. Т. 107, № 5. С. 13–17.
22. Драгалин, А. Г. Конструктивная теория доказательств и нестандартный анализ / А. Г. Драгалин. М.: УРСС, 2003.
23. Conway, J. H. *On Numbers and Games*, 2 ed. / J. H. Conway. US: CRC Press, 2000.
24. Zotov, N. Design Principles, Structure, and Development Prospects of the Software Platform of Ostis-Systems / N. Zotov // *Open Semantic Technologies for Intelligent Systems: Collection of Scientific Papers*. 2023. Iss. 7. P. 67–76.
25. Sapaty, P. S. *The Spatial Grasp Model* / P. S. Sapaty. Great Britain: Emerald Publishing Limited, 2023. DOI: 10.1108/9781804555743.
26. Letichevsky, A. A. Insertion Modeling System / A. A. Letichevsky, O. A. Letychevskiy, V. S. Peschanenko // *Perspectives of Systems Informatics (PSI-2011). Lecture Notes in Computer Science*. Berlin: Heidelberg, 2012. Vol. 7162. DOI: 10.1007/978-3-642-29709-0_23.

References

1. Mikhnevich S. Yu., Tsezhar A. A. (2023) Evolution of the Concept of Interoperability of Open Information Systems. *Digital Transformation*. 29 (2), 60–66. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-29-2-60-66> (in Russian).
2. International Conference on Open Semantic Technologies for Intelligent Systems. SpringerLink. Available: <https://link.springer.com/conference/ostis> (Accessed 28 January 2024).
3. Golenkov V. V., Gulyakina N. A., Shunkevich D. V. (2021) *Open Technology of Ontological Design, Production and Operation of Semantically Compatible Hybrid Intelligent Computer Systems*. Minsk, Bestprint Publ. (in Russian).
4. Golenkov V. V. (ed.) (2023) *Technology of Complex Life Cycle Support of Semantically Compatible Intelligent Computer Systems of New Generation*. Minsk, Bestprint Publ. (in Russian).
5. Palagin A. V. (2013) Problems of Transdisciplinarity and the Role of Informatics. *Cybernetics and System Analysis*. (5), 3–13 (in Russian).
6. Barinov I. I., Borgest N. M., Borovik S. Y., Granichin O. N., Grachev S. P., Gromyko Y. V., et al. (2021) Development Strategy Formation of the Committee on Artificial Intelligence in the Scientific and Educational Center “Engineering of the Future”. *Ontology of Designing*. 11 (3), 260–293. DOI: 10.18287/2223-9537-2021-11-3-260-293 (in Russian).
7. Golenkov V. V., Gulyakina N. A. (2004) Graphodynamic Associative Models and Means of Parallel Information Processing in Artificial Intelligence Systems. *Doklady BGUIR*. (1), 92–101 (in Russian).
8. Golenkov V. V., Gulyakina N. A., Davydenko I. T., Shunkevich D. V. (2019) Semantic Technologies for Designing Intelligent Systems and Semantic Associative Computers. *Doklady BGUIR*. (3), 42–50 (in Russian).
9. Zagorskiy A. (2022) Principles for Implementing the Ecosystem of Next-Generation Intelligent Computer Systems. *Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2022): Collection of Scientific Papers*. (6), 347–356. Minsk, Bestprint Publ.
10. Pospelov D. A. (ed.) (1990) *Artificial Intelligence. Reference Book. In 3 Books. Book 2: Models and Methods*. Moscow, Radio and Sviaz Publ. (in Russian).
11. Sowa J. F. (2000) *Knowledge Representation: Logical, Philosophical, and Computational Foundations*. New York, Brooks/Cole.

12. Martynov V. V. (2009) *In the Center of Human Consciousness*. Minsk, Belarusian State University (in Russian).
13. Ivashenko V. (2022) General-Purpose Semantic Representation Language and Semantic Space. *Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2022): Collection of Scientific Papers*. (6), 41–64. Minsk, Bestprint Publ.
14. Ivashenko V. (2023) Semantic Space Integration of Logical Knowledge Representation and Knowledge Processing. *Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS): Collection of Scientific Papers*. (7), 95–114. Minsk, Bestprint Publ.
15. Ivashenko V. P. (2017) Ontological Modeling of Event-Based Causal Relationships. *Information Technologies and Systems – 2017 (ITS-2017), Proceedings of the International Scientific Conference, Minsk, Oct. 25, 2017*. 138–139. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (in Russian).
16. Ivashenko V. P. (2020) *Models of Problem Solving in Intellectual Systems. In 2 Parts. Part 1: Formal Models of Information Processing and Parallel Models of Problem Solving*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (in Russian).
17. Ackermann W. (1937) Die Widerspruchsfreiheit der Mengenlehre. *Mathematische Annalen*. (114), 305–315.
18. Kanamori A. (2009) Bernays and Set Theory. *Bulletin of Symbolic Logic*. (15), 43–69.
19. Hatcher A. (2002) *Algebraic Topology*. Great Britain, Cambridge University Press Publ.
20. Ivashenko V. (2023) Structures and Measures in Knowledge Processing Models. *Pattern Recognition and Information Processing (PRIP'2023): Proceedings of the 16th International Conference, Minsk, Oct. 17–19, 2023*. 16–21. Minsk, United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus.
21. Ivashenko V. P. (2017) Ontological Model of Space-Time Relations for Events and Phenomena in the Processing of Knowledge. *Bulletin of Brest State Technical University*. 107 (5), 13–17 (in Russian).
22. Dragalin A. G. (2003) *Constructive Theory of Evidence and Non-Standard Analysis*. Moscow, URSS Publ.
23. Conway J. H. (2000) *On Numbers and Games, 2 ed.* US, CRC Press Publ.
24. Zotov N. (2023) Design Principles, Structure, and Development Prospects of the Software Platform of Osis-Systems. *Open Semantic Technologies for Intelligent Systems: Collection of Scientific Papers*. (7), 67–76. Minsk, Bestprint Publ.
25. Sapaty P. S. (2023) *The Spatial Grasp Model*. Great Britain, Emerald Publishing Limited Publ. DOI: 10.1108/9781804555743.
26. Letichevsky A. A., Letychevskiy O. A., Peschanenko V. S. (2012) Insertion Modeling System. *Perspectives of Systems Informatics (PSI-2011). Lecture Notes in Computer Science*. 7162. Berlin, Heidelberg Publ. DOI: 10.1007/978-3-642-29709-0_23.

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Голенков В. В., д-р техн. наук, проф., проф. каф. интеллектуальных информационных технологий, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Гулякина Н. А., канд. физ.-мат. наук, доц., доц. каф. интеллектуальных информационных технологий, БГУИР

Ивашенко В. П., канд. техн. наук, доц., доц. каф. интеллектуальных информационных технологий, БГУИР

Шункевич Д. В., канд. техн. наук, доц., зав. каф. интеллектуальных информационных технологий, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-80-92
E-mail: golen@bsuir.by
Голенков Владимир Васильевич

Information about the authors

Golenkov V. V., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Professor at the Department of Intelligent Information Technologies, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Gulyakina N. A., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Intelligent Information Technologies, BSUIR

Ivashenko V. P., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Intelligent Information Technologies, BSUIR

Shunkevich D. V., Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Department of Intelligent Information Technologies, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-80-92
E-mail: golen@bsuir.by
Golenkov Vladimir Vasilievich