

Концепция инженерии знаний в задачах обеспечения интероперабельности АСУ и информационных систем на основе интеллектуальных технологий

д.т.н. М. Ю. Охтилев, к.т.н. В. Н. Коромысличенко,
к.т.н. П. А. Охтилев, А. Э. Зянчурин
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения
Санкт-Петербург, Россия
oxt@mail.ru, v.koromyslichenko@yandex.ru,
pavel.oxt@mail.ru, zwilas@gmail.ru

В. И. Васильев
Санкт-Петербургский государственный
университет телекоммуникаций
Санкт-Петербург, Россия
vasiljev.valentin2014@yandex.ru

Аннотация. Рассматривается специфика инженерии знаний при обеспечении интероперабельности действующих и модернизируемых АСУ и информационных систем. Показывается, что интероперабельность может быть достигнута за счет обеспечения декларативного характера проектирования, основанного на применении концептуального подхода к моделированию и онтологическому описанию стадий жизненного цикла. Декларативное проектирование может быть описано в рамках логико-лингвистической модели, при этом экспертами разрабатываются графы знаний, на базе которых составляются частные онтологии различных стадий жизненного цикла.

Ключевые слова: интероперабельность, модель предметной области, онтология, данные, знания, графы, прикладное программное обеспечение, искусственный интеллект.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение интероперабельности предполагает объединение источников данных и структурно-функциональных моделей АСУ и информационных систем (ИС), при этом требуемая функциональность АСУ и ИС может быть достигнута путем реализации исполнительных систем, осуществляющих вычисления с опорой на заложенные в систему знания при использовании принципов декларативного проектирования прикладного программного обеспечения (ПО) [1–3]. В этом случае реализованные в АСУ и ИС любые алгоритмы и модели данных должны быть представимы декларативными спецификациями в виде интерпретируемых наборов данных. Реализация указанного подхода предполагает применение унифицированных онтологических полимодельных комплексов, обеспечивающих всю систему едино интерпретируемой терминологией. Задание исполнимых спецификаций в этом случае должно осуществляться экспертами в процессе анализа и разработки модели предметной области (ПрО) в виде базы знаний, на проблемно-ориентированных языках желательно с визуальной (графической) нотацией (с учетом положения, что у экспертов-технологов навыки программирования отсутствуют) [4–6].

ОНТОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

В ДЕКЛАРАТИВНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПРИКЛАДНОГО ПО

Применение интеллектуальных систем обеспечивает решение сложных задач интероперабельности, при этом основная трудность решения связана с использованием слабо формализованных знаний специалистов-практиков, в которых логическая (или смысловая) обработка информации превалирует над вычислительной. Изучение методов проектирования таких систем, как показано в работе [7], находится в поле теории искусственного интеллекта (ИИ, или инженерии знаний) и предполагает разработку моделей и методов извлечения, структурирования, формализации (представления) знаний для их обработки в интеллектуальных АСУ и ИС.

Имеющая место в этом случае цепочка «данные — информация — знания», предполагает, во-первых, целесообразность определения семантики (смысла) данных на основе интерпретации синтаксических выражений, а во-вторых, позволяет говорить о гносеологической цепочке представления знаний при выборе языков моделирования: факт, обобщенный факт, эмпирический закон, теоретический закон [8–10]. Так, например, такой авторитет в области ИИ как Э. Х. Тыгу рассматривал программирование как метод доказательства теорем в предположении, что синтаксис языка программирования ограничивает возможности описания решений математических задач, а корректный и конечный процесс вычислений — собственно доказательство (вывод) теоремы [11].

В процессе разработки модели ПрО и наполнения базы знаний (БЗ) возникают задачи, связанные с извлечением эмпирического знания экспертов, которое характеризуется [7, 9]:

- определением знаний в различных категориях, или модальностью;
- диалектичностью знаний, или противоречивостью;
- невозможностью полного описания ПрО, или неполнотой.

С 80-х годов 20-го века и по настоящее время в попытках формализации проблемно-ориентированных языков пред-

ставления знаний и преодоления проблем извлечения эмпирического опыта экспертов высокими темпами развивается направление, связанное с использованием онтологического моделирования как основы организации БЗ в АСУ и ИС.

Онтологию представляют в виде спецификации концептуализации, где концептуализация — структура реальности, рассматриваемая независимо от словаря предметной области конкретной ситуации (определение Т. Груббера) [7, 9, 12].

Онтологии позволяют формализовать описания предметных сущностей и их взаимосвязей при проектировании АСУ и ИС [7]. Это обстоятельство определяет их важную роль в теории ИИ. С другой стороны, онтологическое моделирование обеспечивает сохранение семантики и возможность последующего использования знаний о ПрО. Таким образом, в рамках концептуального определения терминологического словаря той ПрО, для которой создаются АСУ и ИС, онтологическое моделирование должно предварять разработку любой АСУ и ИС [7, 12]. Следует отметить, что в зависимости от практического приложения онтологии могут применяться в гораздо более широком спектре задач, связанных с обеспечением сквозного взаимодействия разнородных систем с сохранением семантики передаваемой информации.

Сложные ПрО, в том числе для критических приложений, характеризуются структурированными и слабоструктурированными данными, хранимыми, как правило, в разнотипных БД/БЗ. При этом в условиях территориально распределенных существующих и унаследованных АСУ и ИС требуется их совместная обработка. Реализация такой совместной обработки, по существу, и является основной целью обеспечения семантической интероперабельности систем.

В результате проведенного к настоящему времени анализа различных технологий интеграции данных [7, 13–25] выявлено, что перспективным методом семантической интеграции автоматизированных систем является применение программных медиаторов, основанных на онтологиях и выступающих как семантические посредники в обработке данных. Такие семантические медиаторы являются носителями онтологических БД, что обеспечивает унификацию их языковых систем и позволяет обеспечивать семантически целостный диалог между взаимодействующими АСУ и ИС, куда такие программные медиаторы внедрены.

Следует отметить, что онтология определяет понятийную систему ПрО, то есть совокупность ее понятий (концептов) и отношений между ними, в то время как концептуальная модель описывает структуру и поведенческие аспекты ПрО. Концептуальная модель ПрО включает сущности, релевантные целям системы, их определения и связи между ними, в то время как онтология — это понятия ПрО и семантические отношения между ними. Онтология, следовательно, логически дополняет модель ПрО, представленную ее концептуальной схемой. В технологиях БЗ использование онтологии в качестве концептуальных схем ПрО и в качестве основы интерфейсов разнородных систем БЗ позволяет формулировать запросы данных в терминах онтологий и осуществлять рассуждения (Reasoning) на онтологиях. Понятия и отношения базирующегося на онтологии интерфейса в этом случае ста-

новятся посредниками между пользователем с его информационными потребностями. Информационные потребности пользователя выражаются в терминах онтологий и традиционной модели данных. Такие системы называют системами доступа к данным, основанными на онтологиях, или OBDA-системами (Ontology-Based Data Access Systems, OBDA-systems) [41].

Онтологический подход используется в OBDA-системах для онтологического аннотирования концептуальных схем БД/БЗ. Это делается с целью достижения независимости от технических аспектов СУБД и формулирования запросов в терминах ПрО [11, 19, 20, 26–29]. Так как концептуальное моделирование обычно используется для описания поведенческих и функциональных аспектов, онтологический подход может быть использован и в этом случае. Следует отметить, что на текущий момент такой подход еще не получил широкого распространения [9, 29]. Например, в работе [30] определяется понятие «онтологической чистоты» — показателя корректности и полноты концептуальной модели относительно ее онтологии и отмечается, что онтолого-управляемое проектирование становится легче для понимания при использовании онтологий в силу оперирования естественными для пользователя понятиями.

Таким образом, при разработке интеллектуальных технических систем онтологии целесообразно использовать для [9]:

- формирования и фиксации общего разделяемого всеми экспертами блока знаний о ПрО;
 - описания семантики данных с целью явной концептуализации ПрО;
 - обеспечения возможности повторного использования знаний;
 - описания функциональности АСУ и ИС (типов решаемых задач).
- Онтология может использоваться в процессе функционирования АСУ и ИС с целью:
- обеспечения совместного использования разнородных данных и знаний;
 - реализации процессов, составляющих функциональность системы;
 - лучшего понимания ПрО пользователями системы;
 - достижения интеграции и миграции разнородных данных и знаний между территориально распределенными АСУ и ИС;
 - обеспечения функциональной совместимости существующих неинтеллектуальных систем путем надстройки поверх них семантически аннотирующих модельно-алгоритмических комплексов, основанных на онтологиях.

Для формализации онтологий в качестве теоретического аппарата зачастую используются дескрипционные логики [7, 29, 31–37]: по существу — семейство формализмов для структурированного представления знаний, которое создано для применения формальной семантики в структурированных, не основанных на логике языках представления знаний — семантических сетях и языках фреймов. Дескрипционные логики реализуют компромисс между выразительными возможностями и вычислительной сложностью рассуждений, обеспечивая сочетание возможностей разрешимых фрагментов логики пер-

вого порядка и модальных логик с некоторыми расширениями, так как не все аспекты реального мира представимы в этих логиках [38].

Почти все обобщения имеют исключения или соблюдают только до определенной степени, что составляет основную сложность (принцип естественных разновидностей) [39]. В этой связи целесообразно разделять типовые сущности и исключительные (индивиды). Следующий важный аспект — использование категорий для суждений о конкретных объектах, которые проводятся с заданием на них отношений (таксономии, партономии, тезаурусы и пр.). Декрипционная логика позволяет сравнительно легко разрешить эти задачи и в ряде случаев имеет более низкую вычислительную сложность, чем, например, выражения в логике с двухместными предикатами. Рассмотренные положения подтверждают перспективность применения онтологий для вычислительно сложных задач, обусловленных совместным манипулированием разнородной информацией, передаваемой из различных источников данных существующих АСУ и ИС.

Такие принципы обобщения и категоричное описание позволяют задавать поверх разнородных моделей данных существующих и унаследованных АСУ и ИС унифицированные модели представления знаний, основанные на онтологиях. Эта особенность позволяет интегрировать разнородную информацию АСУ и ИС, выполненных на различных платформах, и обеспечить создание едино интерпретируемой системы БЗ, которая может стать основой реализации интероперабельности АСУ и ИС.

Кроме того, необходимо отметить, что использование отдельно взятых онтологий или их линейной совокупности (например, в виде множества предметных онтологий БД) характерно для многих существующих интеллектуальных технических систем [7, 12, 16, 40–42]. Иногда используется иерархия онтологий для интеграции гетерогенных источников данных. Онтологии, как формализм представления знаний, могут быть использованы не только для описания статичной модели ПрО, но также и для описания процессных аспектов, иерархий целей и задач [39, 43–45]. При переходе от одной онтологии к другой могут задаваться ограничения, либо допущения для задаваемой системы фактов о ПрО, что обеспечивается определением некоторой совокупности взаимосвязанных онтологий так, что это позволяет более гибко проектировать модели. Подобную совокупность онтологий принято называть онтологической системой. В литературных источниках приводятся различные определения этого понятия, однако на практике соответствующей формальной и реализующей системы найдено не было [7, 21, 28].

ПРАКТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ

ДЕКЛАРАТИВНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРИКЛАДНОГО ПО

Декларативное проектирование прикладного ПО базируется на системном анализе ПрО (анализе исходных данных и разработке модели ПрО), разработке спецификаций требований, разработке кода, тестировании и сопровождении в соответствии с концепцией управления жизненным циклом программных систем [40]. Анализ исходных данных и разработка спецификаций требований — это важнейший этап проектирования, опирающийся на экспертные знания. Экспертные знания о ПрО существенно сложнее

современных логических, формальных или иных представлений таких моделей. Существует значительный разрыв между абстрактным, экспертным представлением модели ПрО и ее практическим выражением в виде БД или БЗ. Экспертные знания логически не полностью упорядочены, постоянно дополняются и изменяются. В таких условиях использование традиционных БД/БЗ затруднено, в этом случае рассмотрение возможности применения нетрадиционных подходов к построению модели ПрО — графовых, документарных, ключ-значение и других (NoSQL) — представляется достаточно обоснованным.

В рамках логико-лингвистической парадигмы [10] создание модели ПрО можно представить в виде следующей модели разработки, схема которой представлена на рисунке 1.

Логико-лингвистическая модель разработки предполагает преобразование данных, представленных в графической или лингвистической форме, в логическую форму (по аналогии с логико-лингвистической системой управления Д. А. Поспелова [10]). Представленная модель относится к семиотическим системам и на ее основе может быть разработана модель любой ПрО в виде онтологий с использованием дескрипционных логик или других языковых формализмов.

Выбор модели представления знаний на различных этапах трансформации экспертных знаний в онтологию имеет существенное значение и не может быть произвольным. На первой стадии осуществляется извлечение требований (Requirements Elicitation), которое проводится на основании анализа замысла заказчика, исходных данных, модели предметной области и потребностей заинтересованных в виде интервьюирования, сценарного анализа, моделирования и прототипирования. При этом экспертные знания должны быть представлены в лингвистическом и графическом виде, для того чтобы избежать когнитивных потерь знаний при их передаче на следующую стадию трансформации в соответствии с этапом жизненного цикла программы [46].

Извлечение требований, при онтологическом подходе, предполагает составление перечня терминов, понятий и их определений. Термины и понятия должны располагаться в перечне с учетом отношений и зависимостей, существующих между ними. Таким образом, создается структурированная онтологическая модель — глоссарий/тезаурус, которая естественным образом может быть представлена в виде графа помеченных свойств (Labeled Property Graph, LPG) [47]. Далее, на основании графа глоссария и исследования ПрО, разрабатываются LPG-графы информационных процессов и релевантных им метаданных, соответствующие целям и задачам программной системы, определяются выявленные вычислительные задачи и их взаимосвязи. На базе анализа полученных LPG-графов формируется концептуальная архитектура и спецификация требований. Полученная система изоморфных графов используется как верхний уровень описания требований и архитектуры программной системы, как графы знаний предметной области, на базе которых могут быть разработаны различные частные онтологии: требований заказчика, спецификаций требований, описания архитектуры и прочие.



Рис. 1. Логико-лингвистическая модель формирования схемы предметной области

Следует отметить, что LPG-графы могут быть разработаны экспертами, не имеющими навыков программирования, а формализованное описание онтологий — специалистами инженерии знаний. При этом графы знаний обеспечивают валидацию и верификацию онтологий, легкое добавление и изменение знаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Онтологическое моделирование и концептуализация лежат в основе декларативного проектирования, которым обеспечивается достижение интероперабельности. При этом на начальных стадиях жизненного цикла с помощью экспертных знаний моделируются структурные отношения и связи между информационными понятиями, релевантными терминам и понятиям ПрО, создается граф знаний ПрО. Полученный экспертами граф лежит в основе частных онтологий различных стадий жизненного цикла программных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макаренко, С. И. Интероперабельность человеко-машинных интерфейсов: Монография. — Санкт-Петербург: Научные технологии, 2023. — 185 с.
2. UK Ministry of Defence Architecture Framework. URL: <http://www.modaf.com> (дата обращения 21.10.2018).

3. Giachetti, R. Interoperability Analysis Method for Mission-Oriented System of Systems Engineering / R. Giachetti, S. Wangert, R. Eldred // Proceedings of the 2019 IEEE International Systems Conference (SysCon) (Orlando, FL, USA, 08–11 April 2019). — Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019. — 6 p. DOI: 10.1109/SYSCON.2019.8836808.

4. Олейников, А. Интероперабельность — ключевая технология повышения эффективности систем вооружения, управления и связи / А. Олейников, С. Макаренко, С. Козлов // Радиоэлектронные технологии. 2022. № 1. С. 66–73.

5. Макаренко, С. И. Сетевая война — принципы, технологии, примеры и перспективы: Монография / С. И. Макаренко, М. С. Иванов. — Санкт-Петербург: Научные технологии, 2018. — 898 с.

6. NCOIC Interoperability Framework (NIF v2.1) and NIF™ Solution Description Reference Manual (NSD-RM v1.2) / G. Osvalds, M. Bowler, A. Jones, [et al.] — Network Centric Operations Industry Consortium, 2010. — 125 p. URL: <http://documents.tips/documents/nif-solution-description-reference-manual-nsd-rm-reference-manual-nsd-rm.html> (дата обращения 21.10.2018).

7. Охтилев, П. А. Алгоритмы и онтологические модели информационно-аналитической поддержки процессов создания и применения космических средств: дис. на соиск.

учен. степ. канд. техн. наук: 05.13.01 / Охтилев Павел Алексеевич; Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук (СПИИРАН). — Санкт-Петербург, 2019. — 408 с.

8. Гаазе-Рапопорт, М. Г. Структура исследований в области искусственного интеллекта / М. Г. Гаазе-Рапопорт, Д. А. Поспелов // Толковый словарь по искусственному интеллекту / Авт.-сост.: А. Н. Аверкин, М. Г. Гаазе-Рапопорт, Д. А. Поспелов. — Москва: Радио и связь. Редакция литературы по информатике и вычислительной технике, 1992. — С. 5–20.

9. Гаврилова, Т. А. Инженерия знаний. Модели и методы: Учебник / Т. А. Гаврилова, Д. В. Кудрявцев, Д. И. Муромцев. — Санкт-Петербург: Лань, 2016. — 324 с. — (Учебники для вузов. Специальная литература).

10. Искусственный интеллект: Справочник: в 3 кн. Кн. 2. Модели и методы / под ред. Д. А. Поспелова. — Москва: Радио и связь. Редакция литературы по информатике и вычислительной технике, 1990. — 304 с.

11. Тыгу, Э. Х. Концептуальное программирование. — Москва: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. — 256 с. — (Проблемы искусственного интеллекта).

12. Боргест, Н. М. Онтология проектирования. Теоретические основы: Учебное пособие. Часть 1. Понятия и принципы. — Самара: Самарский гос. аэрокосмический ун-т, 2010. — 91 с.

13. Атаева, О. М. Основные понятия формальной модели семантических библиотек и формализация процессов интеграции в ней / О. М. Атаева, В. А. Серебряков // Программные продукты и системы. 2015. № 4 (112). С. 180–187. DOI: 10.15827/0236-235X.112.180-187.

14. Ахметов, Р. Н. Концепция создания и применения перспективной АСУ подготовки и пуска ракеты космического назначения «Союз-2»: новые подходы к интеграции, интеллектуализации, управлению / Р. Н. Ахметов, И. Е. Васильев, В. А. Капитонов, [и др.] // Авиакосмическое приборостроение. 2015. № 4. С. 3–54.

15. Бахмут, А. Д. Модель интеграции информационных ресурсов производственного цикла РН «Союз-2» на основе онтологического доступа к данным / А. Д. Бахмут, М. Ю. Охтилев, П. А. Охтилев // Научная сессия ГУАП: Сборник докладов научной сессии, посвященной Всемирному дню авиации и космонавтики (Санкт-Петербург, Россия, 08–12 апреля 2019 г.): в 3 ч. Часть 2. Технические науки. — Санкт-Петербург: ГУАП, 2019. — С. 295–300.

16. Биряльцев, Е. В. Интеграция реляционных баз данных на основе онтологий / Е. В. Биряльцев, А. М. Гусенков // Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки. 2007. Т. 149, Кн. 2. С. 13–34.

17. Божинский, И. А. Методы и технологии интеграции информационных систем и распределенных баз данных // Радиоэлектроника и информатика. 2015. № 2. С. 30–36.

18. Бова, В. В. Онтологическая модель интеграции данных и знаний в интеллектуальных информационных системах // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2015. С. 225–237.

19. Вовченко, А. Е. Анализ и сравнение систем интеграции неоднородных информационных ресурсов / А. Е. Вовченко, Л. А. Калинин // Электронные библиотеки: пер-

спективные методы и технологии, электронные коллекции (RCDL-2008): Труды 10-й Всероссийской научной конференции (Дубна, Россия, 07–11 октября 2008 г.). — Дубна: Объединенный институт ядерных исследований, 2008. — С. 115–121.

20. Когаловский, М. Р. Методы интеграции данных в информационных системах. 2010. 9 с. URL: http://www.ipgras.ru/old_site/articles/kogalov10-05.pdf (дата обращения 05.09.2022).

21. Левашова, Т. В. Принципы управления онтологиями, используемые в среде интеграции знаний // Труды СПИИРАН. 2002. Т. 2, Вып. 1. С. 51–68.

22. Маслобоев, А. В. Мультиагентная система интеграции распределенных информационных ресурсов инноваций / А. В. Маслобоев, М. Г. Шишаев // Программные продукты и системы. 2007. № 4. С. 30–32.

23. Серебряков, В. А. Семантическая интеграция данных // Просеминар кафедры системного программирования МГУ (Москва, Россия, весна 2012 г.). — Москва, 2012. — 119 с. URL: <http://sp.cmc.msu.ru/proseminar/2012/serebryakov.2012.04.20.pdf> (дата обращения 22.03.2018).

24. Ткаченко, Н. И. Применение сервис-ориентированной архитектуры при интеграции систем управления технологическими процессами / Н. И. Ткаченко, Н. А. Спирин // Известия Томского политехнического университета. Уpravление, вычислительная техника и информатика. 2010. Т. 317, № 5. С. 61–67.

25. Черняк, Л. Интеграция данных: синтаксис и семантика // Открытые системы. СУБД. 2009. № 10. С. 24–29.

26. Когаловский, М. Р. Метаданные в компьютерных системах // Программирование. 2013. Т. 39, № 4. С. 28–46.

27. Когаловский, М. Р. Перспективные технологии информационных систем. — Москва: ДМК Пресс, 2003. — 288 с. — (ИТ-Экономика) (Лекции МГУ).

28. Евгеньев, Г. Б. Интеллектуальные системы проектирования: Учебное пособие для студентов вузов. — Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. — 335 с. — (Информатика в техническом университете).

29. Когаловский, М. Р. Системы доступа к данным, основанные на онтологиях // Программирование. 2012. Т. 38, № 4. С. 55–77.

30. Montiel-Sanchez, C. The BWV-Model as Method Engineering Theory / C. Montiel-Sanchez, D. Pfeiffer, J. Becker // Proceedings of the 13th Americas Conference on Information Systems (AMCIS) (Keystone, CO, USA, 09–12 August, 2007). — Association for Information Systems, 2007. — Art. No. 83, 10 p.

31. Цуканова, Н. И. Онтологическая модель представления и организации знаний: Учебное пособие для вузов. — Москва: Горячая линия — Телеком, 2016. — 272 с.

32. The Description Logic Handbook: Theory, Implementation, and Applications. Second Edition / F. Baader, [et al.] (eds.). — New York: Cambridge University Press, 2007. — 621 p. DOI: 10.1017/CBO9780511711787.

33. Murthy, S. K. Automatic Construction of Decision Trees from Data: A Multidisciplinary Survey // Data Mining and Knowledge Discovery. 1998. Vol. 2, Is. 4. Pp. 345–389. DOI: 10.1023/A:1009744630224.

34. Application of Decision-Making Support Technology for Management of Space Vehicle Life Cycle / P. A. Okhtilev, A. D. Bakhmut, A. V. Krylov, [et al.] // Proceedings of the II International Conference on Control in Technical Systems (CTS-2017)

(Saint Petersburg, Russia, 25–27 October 2017). — Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017. — Pp. 41–44.
DOI: 10.1109/CTSYS.2017.8109483.

35. Pan, J. Z. Description Logics: Reasoning Support for the Semantic Web: A Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy. — University of Manchester, 2004. — 215 p.

36. Linking Data to Ontologies / A. Poggi, D. Lembo, D. Calvanese, [et al.] // Journal on Data Semantics X / S. Spaccapietra (ed.). — Heidelberg: Springer, 2008. — Pp. 133–173. — (Lecture Notes in Computer Science, Volume 4900).
DOI: 10.1007/978-3-540-77688-8_5.

37. Progressions and Innovations in Model-Driven Software Engineering / V. G. Díaz, [et al.] (eds.). — Hershey (PA): IGI Global, 2013. — 388 p. — (Premier Reference Source).
DOI: 10.4018/978-1-4666-4217-1.

38. Вахитов, А. Р. Преимущества дескриптивной логики при обработке знаний / А. Р. Вахитов, В. Б. Новосельцев // Известия Томского политехнического университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2008. Т. 313, № 5. С. 73–76.

39. Рассел, С. Искусственный интеллект: современный подход. Второе издание = Artificial Intelligence: A Modern Approach. Second Edition / пер. с англ. и редакция К. А. Птицына. — Москва: ИД Вильямс, 2006. — 1408 с.

40. Охтилев, М. Ю. Программная инженерия. Инженерный подход: Учебное пособие / М. Ю. Охтилев, В. Н. Коромысличенко, П. А. Охтилев. — Санкт-Петербург: ГУАП, 2021. — 163 с.

41. Гаранина, Н. О. Онтология процессов, ориентированная на верификацию / Н. О. Гаранина, И. С. Ануреев, О. И. Боровикова // Моделирование и анализ информационных систем. 2018. Т. 25, № 6. С. 607–622.
DOI: 10.18255/1818-1015-2018-6-607-622.

42. Горшков, С. В. Введение в онтологическое моделирование. Ревизия 2.4: Методическое пособие. — [Екатеринбург]: ТриниДата, 2018. — 150 с. URL: <http://trinidata.ru/files/SemanticIntro.pdf> (дата обращения 01.10.2018).

43. Фёдоров, И. Г. Адаптация онтологии Бунге — Ванда — Вебера к описанию исполняемых моделей бизнес-процессов // Прикладная информатика. 2015. Т. 10, № 4 (58). С. 82–92.

44. Фёдоров, И. Г. Анализ концептуальной модели бизнес-процесса с использованием онтологии Бунге — Ванда — Вебера // Экономика, статистика и информатика. Вестник УМО. 2014. № 6. С. 216–221.
DOI: 10.21686/2500-3925-2014-6-216-221.

45. Фёдоров, И. Г. Моделирование бизнес-процессов в нотации BPMN2.0: Монография. — Москва: Московский гос. ун-т экономики, статистики и информатики, 2013. — 255 с.

46. Куликова, А. А. Методы и средства формирования и использования онтологий проектов в процессе проектирования автоматизированных систем: дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: 05.13.12 / Куликова Анна Александровна; Ульяновский государственный технический университет. — Ульяновск, 2022. — 207 с.

47. Фаулер, М. NoSQL: новая методология разработки нереляционных баз данных = NoSQL Distilled: A Brief Guide to the Emerging World of Polyglot Persistence / М. Фаулер, П. Дж. Салададж; Пер. с англ. Д. А. Ключина. — Москва: ИД «Вильямс», 2013. — 192 с.

Problems of Ensuring Interoperability in the Integration of Existing Automated Control Systems and Information Systems Based on Intelligent Technologies

Grand PhD M. Yu. Okhtilev, PhD V. N. Koromyslichenko,
PhD P. A. Okhtilev, A. E. Zianchurin
St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
Saint Petersburg, Russia
oxt@mail.ru, v.koromyslichenko@yandex.ru,
pavel.oxt@mail.ru, zwilas@gmail.ru

V. I. Vasiljev
St. Petersburg State University
of Telecommunications
Saint Petersburg, Russia
vasiljev.valentin2014@yandex.ru

Abstract. The article discusses the specifics of knowledge engineering in ensuring the interoperability of existing and modernized automated control systems and information systems. It is shown that interoperability can be ensured by declarative design based on conceptual modeling and ontological description of the stages of the life cycle. Declarative design can be described within the framework of a logical-linguistic model, while experts develop knowledge graphs on the basis of which private ontologies of various stages of the life cycle are compiled.

Keywords: interoperability, domain model, ontology, data, knowledge, graphs, application software, artificial intelligence.

REFERENCES

1. Makarenko S. I. Interoperability of human-machine interfaces: Monograph [Interoperabelnost cheloveko-mashinnykh interfeysov: Monografiya]. Saint Petersburg, Naukoemkie Tekhnologii Publishing House, 2023, 185 p.
2. UK Ministry of Defence Architecture Framework. Available at: <http://www.modaf.com> (accessed 21 Oct 2018).
3. Giachetti R., Wangert S., Eldred R. Interoperability Analysis Method for Mission-Oriented System of Systems Engineering, *Proceedings of the 2019 IEEE International Systems Conference (SysCon), Orlando, FL, USA, April 08–11, 2019*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019, 6 p. DOI: 10.1109/SYSCON.2019.8836808.
4. Oleynikov A., Makarenko S., Kozlov S. Interoperability — A Key Technology for Improving the Efficiency of Weapons Systems, Control and Communications [Interoperabelnost — klyuchevaya tekhnologiya povysheniya effektivnosti sistem vooruzheniya, upravleniya i svyazi], *Radio Electronic Technologies [Radioelektronnye tekhnologii]*, 2022, No. 1, Pp. 66–73.
5. Makarenko S. I., Ivanov M. S. Network-centric warfare — principles, technologies, examples and prospects: Monograph [Setentsricheskaya voyna — printsipy, tekhnologii, primery i perspektivy: Monografiya]. Saint Petersburg, Naukoemkie Tekhnologii Publishing House, 2018, 898 p.
6. Osvalds G., Bowler M., Jones A., et al. NCOIC Interoperability Framework (NIF v2.1) and NIF™ Solution Description Reference Manual (NSD-RM v1.2). Network Centric Operations Industry Consortium, 2010, 125 p. Available at: <http://dokumen.tips/documents/nif-solution-description-reference-manual-nsd-rm-reference-manual-nsd-rm.html> (accessed 21 Oct 2018).
7. Okhtilev P. A. Algorithms and Ontological Models of Information and Analytical Support for the Creation and Application of Space Facilities [Algoritmy i ontologicheskie modeli informatsionno-analiticheskoy podderzhki protsessov sozdaniya i primeniya kosmicheskikh sredstv]: diss. on competition of a scientific degree PhD (Engin.). Saint-Petersburg, 2019, 408 p.
8. Gaaze-Rapoport M. G., Pospelov D. A. The structure of research in the field of artificial intelligence [Struktura issledovaniy v oblasti iskusstvennogo intellekta]. In: *Averkin A. N., Gaaze-Rapoport M. G., Pospelov D. A. (eds.) Explanatory dictionary on artificial intelligence [Tolkovyy slovar po iskusstvennomu intellektu]*. Moscow, Radio and Communications Publishing House, 1992, Pp. 5–20.
9. Gavrillova T. A., Kudryavtsev D. V., Muromtsev D. I. Engineering of knowledge. Models and methods: Textbook [Inzheneriya znaniy. Modeli i metody: Uchebnik]. Saint Petersburg, LAN Publishing House, 2016, 324 p.
10. Pospelov D. A. (ed.) Artificial intelligence: Reference book. Book 2. Models and methods [Iskusstvennyy intellekt: Spravochnik. Kniga 2. Modeli i metody]. Moscow, Radio and Communications Publishing House, 1990, 304 p.
11. Tyugu E. Kh. Conceptual programming [Kontseptualnoe programmirovaniye]. Moscow, Nauka Publishers, 1984, 256 p.
12. Borgest N. M. Ontology of design. Theoretical foundations: Study guide. Part 1. Concepts and principles [Ontologiya proektirovaniya. Teoreticheskie osnovy: Uchebnoe posobie. Chast 1. Ponyatiya i printsipy]. Samara, Samara State Aerospace University, 2010, 91 p.
13. Ataeva O. M., Serebryakov V. A. The Basic Concepts of a Semantic Libraries Formal Model and Its Integration Process Formalization [Osnovnye ponyatiya formalnoy modeli semanticheskikh bibliotek i formalizatsiya protsessov integratsii v ney], *Software and Systems [Programmnyye produkty i sistemy]*, 2015, No. 4 (112), Pp. 180–187. DOI: 10.15827/0236-235X.112.180-187.
14. Akhmetov R. N., Vasiliev I. E., Kapitonov V. A., et al. Concept of Creation and Applying Perspective ACS Prepara-

tion and Launch of a Space Rocket «Soyuz-2»: New Approaches to Integration, Intellectualization and Management [Kontseptsiya sozdaniya i primeneniya perspektivnoy ASU podgotovki i puska rakety kosmicheskogo naznacheniya «Soyuz-2»: novye podkhody k integratsii, intellektualizatsii, upravleniyu], *Aerospace Instrument-Making [Aviakosmicheskoe priborostroenie]*, 2015, No. 4, Pp. 3–54.

15. Bakhmut A. D., Okhtilev M. Y., Okhtilev P. A. Information Resources Integration Model of the Launch Vehicle «Soyuz-2» Production Cycle on the Basis of Ontological Access to Data [Model integratsii informatsionnykh resursov proizvodstvennogo tsikla RN «Soyuz-2» na osnove ontologicheskogo dostupa k dannym], *Scientific session of GUAP: Collection of Reports. Part 2. Technical sciences [Nauchnaya sessiya GUAP: Sbornik dokladov nauchnoy sessii. Chast 2. Tekhnicheskie nauki]*. Saint Petersburg, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 2019, Pp. 295–300.

16. Birialtsev E. V., Gusenkov A. M. Based on Ontology Approach to Integration of Relation Databases [Integratsiya relyatsionnykh baz dannykh na osnove ontologiy], *Proceedings of Kazan University. Physics and Mathematics Series [Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya Fiziko-matematicheskoe nauki]*, 2007, Vol. 149, Book 2, Pp. 13–34.

17. Bozhinsky I. A. Methods and Technologies of Integration of Information Systems and Distributed Databases [Metody i tekhnologii integratsii informatsionnykh sistem i raspredelennykh baz dannykh], *Radioelectronics and Informatics Journal [Radioelektronika i informatika]*, 2015, No. 2, Pp. 30–36.

18. Bova V. V. Ontological Model of Data Integration and Knowledge in Intelligent Information Systems [Ontologicheskaya model integratsii dannykh i znaniy v intellektualnykh informatsionnykh sistemakh], *Izvestiya Southern Federal University. Engineering Sciences [Izvestiya Yuzhnogo federalnogo universiteta. Tekhnicheskie nauki]*, 2015, Pp. 225–237.

19. Vovchenko A. E., Kalinichenko L. A. Analysis and Comparison of Systems for Heterogeneous Information Resources Integration [Analiz i sravnenie sistem integratsii neodnorodnykh informatsionnykh resursov], *Digital Libraries: Advanced Methods and Technologies, Digital Collections (RCDL-2008): Proceedings of the Tenth Anniversary of All-Russian Research Conference [Elektronnye biblioteki: perspektivnye metody i tekhnologii, elektronnye kolleksii (RCDL-2008): Trudy 10-y Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii]*, Dubna, Russia, October 07–11, 2008. Dubna, Joint Institute for Nuclear Research, Pp. 115–121.

20. Kogalovsky M. R. Methods of data integration in information systems [Metody integratsii dannykh v informatsionnykh sistemakh], 2010, 9 p. Available at: http://www.ipr-ras.ru/old_site/articles/kogalov10-05.pdf (accessed 05 Sep 2022).

21. Levashova T. V. Principles of Ontology Management Used in the Knowledge Integration Environment [Printsipy upravleniya ontologiyami, ispolzuemye v srede integratsii znaniy], *SPIIRAS Proceedings [Trudy SPIIRAN]*, 2002, Vol. 2, Is. 1, Pp. 51–68.

22. Masloboev A. V., Shishaev M. G. Multi-Agent System of Integration of Distributed Information Resources of Innovations [Multiagentnaya sistema integratsii raspredelennykh informatsionnykh resursov innovatsiy], *Software and Systems [Programmnye produkty i sistemy]*, 2007, No. 4, Pp. 30–32.

23. Serebryakov V. A. Semantic Data Integration [Semanticheskaya integratsiya dannykh], *Proseminar of the Department of System Programming of Moscow State University [Proseminar kafedry sistemnogo programmirovaniya MGU]*, Moscow, Russia, Spring 2012. Moscow, 2012, 119 p. Available at: <http://sp.cmc.msu.ru/proseminar/2012/serebryakov.2012.04.20.pdf> (accessed 22 Mar 2018).

24. Tkachenko N. I., Spirin N. A. Application of Service-Oriented Architecture in the Integration of Process Control Systems [Primenenie servis-orientirovannoy arkhitektury pri integratsii sistem upravleniya tekhnologicheskimi protsessami], *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Management, Computing and Information Science [Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika]*, 2010, Vol. 317, No. 5, Pp. 61–67.

25. Chernyak L. Data Integration: Syntax and Semantics [Integratsiya dannykh: sintaksis i semantika], *Open systems. DBMS [Otkrytye sistemy. SUBD]*, 2009, No. 10, Pp. 24–29.

26. Kogalovsky M. R. Metadata in Computer Systems [Metadannye v kompyuternykh sistemakh], *Programming and Computer Software [Programmirovaniye]*, 2013, Vol. 39, No. 4, Pp. 28–46.

27. Kogalovsky M. R. Promising technologies of information systems [Perspektivnye tekhnologii informatsionnykh sistem]. Moscow, DMK Press Publishing House, 2003, 288 p.

28. Evgenov G. B. Intelligent design systems: Study guide for universities [Intellektualnye sistemy proektirovaniya: Uchebnoe posobie dlya studentov vuzov]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 2009, 335 p.

29. Kogalovsky M. R. Ontology-Based Data Access Systems [Sistemy dostupa k dannym, osnovannye na ontologiyakh], *Programming and Computer Software [Programmirovaniye]*, 2012, Vol. 38, No. 4, Pp. 55–77.

30. Montiel-Sanchez C., Pfeiffer D., Becker J. The BWV-Model as Method Engineering Theory, *Proceedings of the 13th Americas Conference on Information Systems (AMCIS), Keystone, CO, USA, August 09–12, 2007*. Association for Information Systems, 2007, Art. No. 83, 10 p.

31. Tsukanova N. I. Ontological model of knowledge representation and organization: Study guide for universities [Ontologicheskaya model predstavleniya i organizatsii znaniy: Uchebnoe posobie dlya vuzov]. Moscow, Goryachaya Liniya — Telekom Publishing House, 2016, 272 p.

32. F. Baader, et al. (eds.) *The Description Logic Handbook: Theory, Implementation, and Applications*. Second Edition. New York, Cambridge University Press, 2007, 621 p. DOI: 10.1017/CBO9780511711787.

33. Murthy S. K. Automatic Construction of Decision Trees from Data: A Multidisciplinary Survey, *Data Mining and Knowledge Discovery*, 1998, Vol. 2, Is. 4, Pp. 345–389. DOI: 10.1023/A:1009744630224.

34. Okhtilev P. A., Bakhmut A. D., Krylov A. V., et al. Application of Decision-Making Support Technology for Management of Space Vehicle Life Cycle, *Proceedings of the II International Conference on Control in Technical Systems (CTS-2017), Saint Petersburg, Russia, October 25–27, 2017*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2017, Pp. 41–44. DOI: 10.1109/CTS-2017.8109483.

35. Pan J. Z. *Description Logics: Reasoning Support for the Semantic Web: A Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy*. University of Manchester, 2004, 215 p.

36. Poggi A., Lembo D., Calvanese D., et al. Linking Data to Ontologies. In: S. Spaccapietra (ed.) *Journal on Data Semantics X. Lecture Notes in Computer Science. Volume 4900*. Heidelberg, Springer, 2008, Pp. 133–173. DOI: 10.1007/978-3-540-77688-8_5.

37. Díaz V. G., et al. (eds.) *Progressions and Innovations in Model-Driven Software Engineering*. Hershey (PA), IGI Global, 2013, 388 p. DOI: 10.4018/978-1-4666-4217-1.

38. Vakhitov A. R., Novoseltsev V. B. Advantages of Descriptive Logic in Knowledge Processing [Preimushchestva deskriptivnoy logiki pri obrabotke znaniy], *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Management, Computing and Information Science [Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika]*, 2008, Vol. 313, No. 5, Pp. 73–76.

39. Russell S., Norvig P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Second Edition [Iskusstvennyy intellekt: sovremennyy podkhod. Vtoroe izdanie]. Moscow, Williams Publishing House, 2006, 1408 p.

40. Okhtilev M. Yu., Koromyslichenko V. N., Okhtilev P. A. *Software engineering. Engineering approach: Study guide [Programmnaya inzheneriya. Inzhenernyy podkhod: Uchebnoe posobie]*. Saint Petersburg, St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 2021, 163 p.

41. Garanina N. O., Anureev I. S., Borovikova O. I. Verification Oriented Process Ontology [Ontologiya protsessov, orientirovannaya na verifikatsiyu], *Modeling and Analysis of Information Systems [Modelirovanie i analiz informatsionnykh sistem]*, 2018, Vol. 25, No. 6, Pp. 607–622. DOI: 10.18255/1818-1015-2018-6-607-622.

42. Gorshkov S. V. *Introduction to ontological modeling. Revision 2.4: Methodological guide [Vvedenie v ontologicheskoe modelirovanie. Reviziya 2.4: Metodicheskoe posobie]*. Yekaterinburg, TriniData, 2018, 150 p. Available at: <http://trinidata.ru/files/SemanticIntro.pdf> (accessed 01 Oct 2018).

43. Fedorov I. G. Adaptation of Bunge — Wand — Weber Ontology for Business Process Modeling [Adaptatsiya ontologii Bunge — Vanda — Vebera k opisaniyu ispolnyaemykh modeley biznes-protsessov], *Applied Informatics [Prikladnaya informatika]*, 2015, Vol. 10, No. 4 (58), Pp. 82–92.

44. Fedorov I. G. The Analyses of Business Process Conceptual Model Based on Bunge — Wand — Weber Ontology [Analiz kontseptualnoy modeli biznes-protsessa s ispolzovaniem ontologii Bunge — Vanda — Vebera], *Economics, Statistics and Informatics. Bulletin of Educational Methodical Association [Ekonomika, statistika i informatika. Vestnik UMO]*, 2014, No. 6, Pp. 216–221. DOI: 10.21686/2500-3925-2014-6-216-221.

45. Fedorov I. G. *Modeling of business processes in BPMN2.0 notation: Monograph [Modelirovanie biznes-protsessov v notatsii BPMN2.0: Monografiya]*. Moscow, Moscow State University of Economics, Statistics and Informatics, 2013, 255 p.

46. Kulikova A.A. *Methods and Means of Forming and Using Project Ontologies in the Process of Designing Automated Systems [Metody i sredstva formirovaniya i ispolzovaniya ontologii proektov v protsesse proektirovaniya avtomatizirovannykh sistem]: diss. on competition of a scientific degree PhD (Engin.)*. Ulyanovsk, 2021, 207 p.

47. Fowler M., Sadalage P. J. *NoSQL Distilled: A Brief Guide to the Emerging World of Polyglot Persistence [NoSQL: novaya metodologiya razrabotki nerelyatsionnykh baz dannykh]*. Moscow, Williams Publishing House, 2013, 192 p.