

ОНТОЛОГИЧЕСКИЙ ИНЖИНИРИНГ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ КИБЕР-ФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АГЕНТНО-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА И МЕТА-АССОЦИАТИВНЫХ ГРАФОВ
ONTOLOGICAL ENGINEERING OF MULTIAGENT CYBER-PHYSICAL SYSTEMS THROUGH AN AGENT-ORIENTED APPROACH WITH META-ASSOCIATIVE GRAPHS

А.Е. Мисник

Могилев, Беларусь, Белорусско-Российский университет

A.E. Misnik

Mogilev, Belarus, Belarusian-Russian University

Аннотация. *Агентно-ориентированный подход предлагает эффективную методологию для управления сложными взаимодействиями и связями между множеством агентов в кибер-физических системах. Основным инструментом моделирования таких систем являются мета-ассоциативные графы, которые обеспечивают гибкое и динамическое представление структурных связей и взаимозависимостей. Мета-ассоциативные графы позволяют интегрировать событийные и процессные элементы, что способствует адаптивности системы и её способности к оперативным изменениям. Уникальной особенностью предложенной методики является возможность динамического изменения взаимосвязей в реальном времени без необходимости полной реорганизации системы, что особенно важно в условиях постоянно меняющихся требований и условий эксплуатации. В статье также рассматриваются ключевые принципы объектно-ориентированного проектирования, такие как инкапсуляция, наследование и полиморфизм, которые способствуют созданию модульной и масштабируемой структуры онтологии. Данный подход позволяет снизить зависимость от специалистов-программистов и даёт возможность экспертам предметной области напрямую участвовать в проектировании онтологии.*

Ключевые слова: *кибер-физические системы, онтологический инжиниринг, онтология, мета-ассоциативный граф, агентно-ориентированный подход.*

Abstract. *The agent-oriented approach offers an effective methodology for managing complex interactions and relationships among multiple agents in cyber-physical systems. The primary modeling tool for such systems is meta-associative graphs, which provide a flexible and dynamic representation of structural connections and interdependencies. Meta-associative graphs enable the integration of event-driven and process-oriented elements, enhancing the system's adaptability and responsiveness to operational changes. A unique feature of the proposed methodology is the ability to dynamically modify interconnections in real time without the need for a complete system reorganization, which is particularly important in environments with constantly changing requirements and operating conditions. The article also discusses key principles of object-oriented design, such as encapsulation, inheritance, and polymorphism, which contribute to creating a modular and scalable ontological structure. This approach reduces dependency on software developers and enables domain experts to participate directly in ontology design.*

Keywords: *cyber-physical systems, ontological engineering, ontology, meta-associative graph, agent-oriented approach.*

Введение

Кибер-физические системы представляют собой интеграцию вычислительных алгоритмов с физическими компонентами, что позволяет им осуществлять мониторинг, координацию, управление и объединение различных физических

процессов через вычислительное ядро. Эти системы находят широкое применение в современных технологиях, таких как умные сети, автономные транспортные средства, медицинские приложения, образование и промышленная автоматизация [1].

Среди кибер-физических систем существует специализированный подкласс – мультиагентные кибер-физические системы. Главной особенностью таких систем является наличие множества интеллектуальных агентов, которые включают в себя датчики, приводы, контроллеры, программные модули и даже людей. Эти агенты объединены общей целью и направлены на выполнение определённых задач. В мультиагентных кибер-физических системах каждый агент выполняет свои уникальные функции и задачи. Несмотря на различия в ролях, агенты должны работать согласованно, чтобы обеспечить общую эффективность и надёжность системы. Для этого требуется чётко определённая и надёжная структура взаимодействия, коммуникации и координации между агентами [2]. Мультиагентный характер таких систем обуславливается необходимостью распределённого управления и принятия решений. В системе отсутствует единый агент, обладающий полной информацией или контролем над всей системой. Каждый агент действует, опираясь на локальные данные и цели, взаимодействуя с другими агентами для достижения глобальных задач. Агенты в данных системах обладают разной степенью автономности и интеллекта, начиная от простых датчиков, собирающих данные, и заканчивая сложными модулями принятия решений, которые обрабатывают информацию и управляют физическими процессами [3, 4]. Разнообразие возможностей агентов требует создания сложных механизмов для эффективного взаимодействия и координации между ними, что позволяет системе адаптироваться и реагировать на изменяющиеся условия.

Одной из фундаментальных задач в мультиагентных кибер-физических системах является создание единой основы для взаимодействия агентов, где особое значение приобретает онтология системы. Онтология выступает в роли общей структуры, которая позволяет агентам понимать и взаимодействовать друг с другом, обеспечивая слаженную интеграцию и целенаправленную деятельность системы в целом. Предложен новый подход к разработке мультиагентных кибер-физических систем на основе онтологического проектирования с использованием мета-ассоциативных графов. В отличие от традиционных методов, этот подход основывается на принципах объектно-ориентированного проектирования, таких как инкапсуляция, наследование и полиморфизм, что позволяет создавать модульные, гибкие и масштабируемые системы [5–7]. Уникальность этого подхода заключается в использовании мета-ассоциативных графов для динамического представления сложных межсистемных взаимосвязей, обеспечивающего обновление в реальном времени и бесшовное добавление новых элементов. Это позволяет системе принимать решения и обрабатывать данные в режиме реального времени, а также непрерывно адаптироваться к новым данным и оперативным требованиям. В отличие от аналогичных решений, предложенная методология снижает зависимость от специализированных разработчиков программного обеспечения, давая возможность экспертам предметной области вносить прямой вклад в онтологию и операционные процессы системы. Этот подход способствует улучшению модульности, динамическому взаимодействию и эффективному управлению ресурсами, что подтверждается его преимуществами в ряде практических применений.

Агентно-ориентированный подход к онтологическому инжинирингу

Агентно-ориентированный подход в онтологическом инжиниринге является методологией для управления сложными взаимосвязями и динамическими взаимодействиями между разнообразными агентами. Данный подход основывается на принципах объектно-ориентированного проектирования, широко используемого в

разработке программного обеспечения, для создания структурированной, масштабируемой и гибкой онтологии, которая облегчает коммуникацию и координацию между агентами.

Основные принципы агентно-ориентированного онтологического инжиниринга:

- инкапсуляция – включает объединение данных и методов, работающих с этими данными, в единую единицу или набор единиц, именуемых "агентом". В контексте онтологического инжиниринга для кибер-физических систем каждый агент или компонент может быть представлен как инкапсулированная сущность или набор сущностей, описывающих его структуру. Это позволяет определить свойства (атрибуты) каждого агента и функции (методы), которые он может выполнять. Инкапсуляция скрывает внутреннее состояние агента от других агентов, что повышает модульность и снижает общую сложность системы;
- наследование – позволяет создавать новые классы агентов на основе уже существующих, наследуя их атрибуты и методы с возможностью добавления новых свойств или функций;
- полиморфизм – предоставляет возможность взаимодействия с агентами как с экземплярами их родительского класса. Это значит, что различные агенты могут работать через общий интерфейс, несмотря на различия в реализации. В мультиагентной системе полиморфизм обеспечивает гибкость и масштабируемость, позволяя системе динамически управлять различными агентами;
- абстракция – упрощает работу с комплексными агентами, позволяя сосредоточиться на концепциях высокого уровня, скрывая детали реализации.

Процесс онтологического инжиниринга включает идентификацию ключевых сущностей (агентов) в системе, а также определение их свойств и поведения. Эти сущности представлены в виде классов, каждый из которых инкапсулирует соответствующие данные и методы. Затем устанавливаются связи между сущностями, такие как наследование и ассоциации, что формирует структурированную и иерархическую онтологию. Эта структура поддерживает целенаправленную деятельность системы, обеспечивая согласованность агентов с задачами системы.

При разработке и эксплуатации кибер-физических систем, включающих множество интеллектуальных агентов, критически важны специализированные инструменты, которые интегрируют онтологические структуры с соответствующими данными и методами в единый процессинговый компонент. Эти инструменты необходимы для обеспечения не только архитектуры системы с теоретической основой – онтологией, которая описывает взаимосвязи и взаимодействия, – но и для активного использования этой структуры в реальном времени для принятия решений и обработки данных.

Такие средства должны выполнять несколько функций. Во-первых, они способствуют динамической интеграции новой информации и возможностей агентов в существующую систему, что повышает её адаптивность и масштабируемость. Управляя онтологией как живым компонентом системы, данные инструменты позволяют выполнять постоянные обновления и модификации, что жизненно важно в условиях, подверженных технологическим изменениям и меняющимся операционным требованиям [8].

Кроме того, такие инструменты оптимизируют обработку данных и выполнение методов, используя структурированные знания, заложенные в онтологии. Это позволяет оптимизировать вычислительные процессы и управление ресурсами, что особенно важно для систем, где критичны производительность и оперативность.

Агентно-ориентированный подход в онтологическом инжиниринге улучшает модульность системы благодаря использованию принципов объектно-ориентированного проектирования, таких как инкапсуляция и наследование. Каждый

компонент в мультиагентной кибер-физической системе рассматривается как независимый агент, инкапсулирующий свои данные и методы. Такая модульная структура позволяет разрабатывать, тестировать и поддерживать компоненты независимо друг от друга, упрощая общую структуру системы. Использование наследования усиливает модульность, позволяя создавать новые классы агентов на основе существующих, с сохранением их атрибутов и методов, а также добавлением новых функций. Это гарантирует, что изменения или обновления одного компонента не окажут негативного влияния на другие, тем самым способствуя созданию устойчивой и легко поддерживаемой архитектуры системы [9, 10].

Мета-ассоциативные графы как инструмент агентно-ориентированного онтологического инжиниринга

Мета-ассоциативные графы, представляющие собой особый тип мета-графов, являются мощным инструментом для представления сложных взаимосвязей в системах, что делает их высокоэффективным средством агентно-ориентированного онтологического инжиниринга в кибер-физических системах. В отличие от других типов мета-графов [11], мета-ассоциативные графы обладают способностью динамически изменять связи, что повышает адаптивность и эффективность этих систем. Благодаря гибкому представлению сложных взаимосвязей и интеграции событийных и процессных элементов, мета-ассоциативные графы позволяют обновлять систему в реальном времени и без труда добавлять новые компоненты, обеспечивая надежность и масштабируемость системы в целом [12–14].

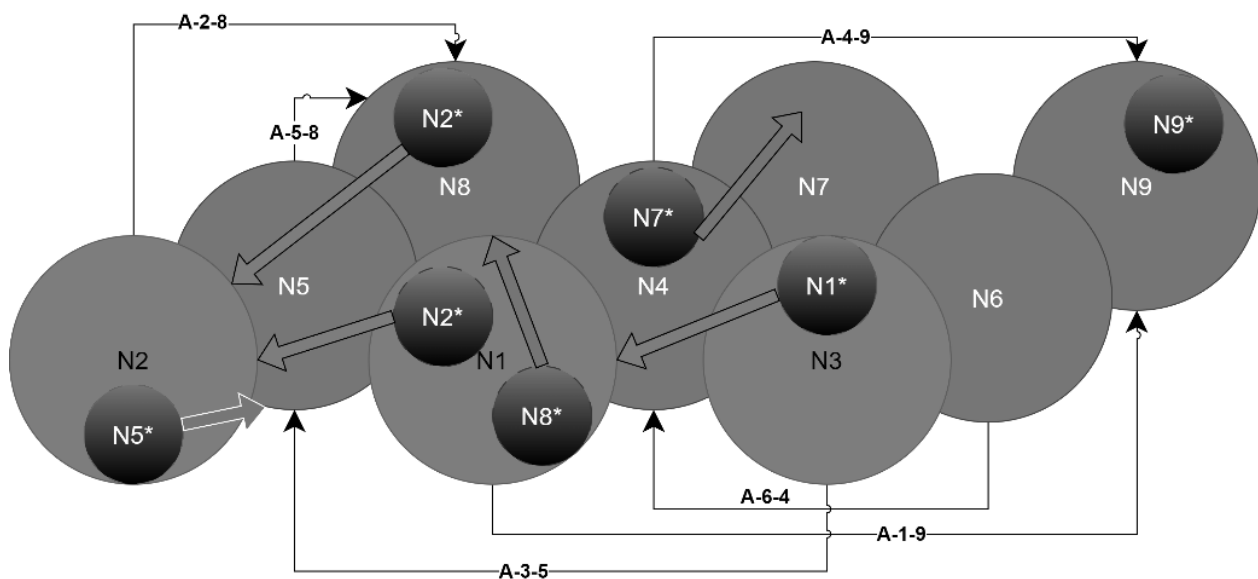


Рис. 1. Мета-ассоциативный граф

В отличие от традиционных мета-графов, мета-ассоциативные графы расширяют понятия вершин и мета-вершин, объединяя их в едином понятии узла (N) в мета-графе:

$$MAG = \{\{N\}, \{A\}\},$$

где дуги (A) в мета-ассоциативных графах не взвешены и представляют иерархические связи от родительского узла к дочернему. Понятие узла мета-ассоциативного графа можно формализовать следующим образом:

$$N = \{I, \{AS\}, \{EV\}, \{M\}\},$$

где I – это имя узла, EV – совокупность событий, связанных с узлом, а M – набор методов. AS – множество ассоциативных атрибутов, которые включают значения атрибутов (AT) и ссылки на другие узлы (N^*) в мета-ассоциативном графе:

$$AS = \{AT, N^*\}.$$

Основные преимущества мета-ассоциативных графов для онтологического моделирования кибер-физических систем:

- агентно-ориентированная поддержка – каждый узел или группа узлов в мета-ассоциативном графе функционирует как агент, что соответствует принципам агентно-ориентированного проектирования и обеспечивает модульность онтологии и возможность её повторного использования;
- гибкость и динамичность – данные графы позволяют динамически изменять связи, которые могут эволюционировать со временем. Эта особенность важна для кибер-физических систем, которые подвержены постоянным изменениям, обеспечивая возможность адаптации без значительных перенастроек;
- представление сложных связей – квазиерархическая структура, включающая рекурсивные ссылки, позволяет моделировать сложные системные взаимосвязи с высокой точностью;
- интеграция событийных и процессных компонентов – мета-ассоциативные графы включают как событийные, так и процессные элементы, в том числе позволяя с их помощью менять онтологию и адаптировать её структуру. Это необходимо для поддержания адаптивности кибер-физической системы при изменении внешних и внутрисистемных требований;
- стирание границ между атрибутами и узлами – способствует интегрированному подходу к моделированию. Компоненты таких систем часто выступают одновременно и как носители данных, и как элементы отношений, повышая согласованность и функциональность системы.

Особенности применения мета-ассоциативных графов

Мета-ассоциативные графы представляют собой сложный инструмент для отображения и управления комплексными структурами взаимосвязей в системах, состоящих из множества взаимодействующих агентов. Такие графы используют узлы, дуги и ассоциативные ссылки для представления взаимодействий и потоков данных между различными компонентами системы. Такая структура эффективна при работе с суб-онтологиями отдельных агентов, поскольку позволяет динамично и без особых усилий интегрировать эти субкомпоненты в целостную системную онтологию.

Использование дуг в этих графах позволяет создавать четкую иерархическую структуру, которая может отражать реальные отношения включения или командные цепочки в системе. Дуги важны для поддержания порядка и направления потоков информации через установленные каналы, что необходимо для реализации общих целей системы.

В отличие от дуг, ссылки в мета-ассоциативных графах обеспечивают ассоциации, которые не являются строго иерархическими. Эти ссылки необходимы для представления и управления горизонтальными связями, которые обеспечивают сотрудничество между агентами. Например, датчики и приводы могут быть связаны не через прямую командную цепочку, а через общие оперативные задачи или синхронизированные действия. Эти связи позволяют данным и командам проходить через различные части системы, поддерживая целостную работу без строгой привязки к иерархии.

Заключение

Агентно-ориентированный онтологический инжиниринг на основе мета-ассоциативных графов предоставляет возможности для создания гибких и масштабируемых кибер-физических систем. Такой подход позволяет динамически адаптировать систему к изменяющимся условиям и требованиям без значительных временных и ресурсных затрат на перенастройку. Применение принципов объектно-ориентированного проектирования, таких как инкапсуляция, наследование и

полиморфизм, способствует созданию модульной архитектуры, в которой агенты могут независимо взаимодействовать, поддерживая общую цель.

Список литературы

1. Dolia P.M. Integrating Ontologies into Multi-Agent Systems Engineering (MaSE) for University Teaching Environment // *Journal of Emerging Technologies in Web Intelligence*. 2010. Vol. 2. No. 1. P. 42–47. DOI 10.4304/jetwi.2.1.42-47.
2. Chainbi W. An ontology-based multi-agent system conceptual model // *International Journal of Computer Applications in Technology*. 2008. Vol. 31. No. 1. P. 78–86. DOI 10.1504/IJCAT.2008.017717.
3. Mathieu P., Routier J.C., Secq Y. Towards a pragmatic use of ontologies in multi-agent platforms // Palade V., Howlett R.J., Jain L., Eds. *Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems. KES 2003. Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 2773. P. 1395–1402. Berlin, Heidelberg: Springer, 2003. DOI 10.1007/978-3-540-45224-9_188.
4. Koussoubé S., Ayimdjí A., Fotso L.P. An Ontology-Based Approach for Multi-Agent Systems // *Engineering International Journal of Modern Education and Computer Science*. 2013. Vol. 5. No. 1. P. 42–47. DOI 10.5815/IJMECS.2013.01.06.
5. Gribova V., Shalfeeva E. Ontological infrastructures for intelligent problem solving // *Russian Advances in Fuzzy Systems and Soft Computing: Selected Contributions to the 10th International Conference on «Integrated Models and Soft Computing in Artificial Intelligence»*. IMSC 2021. CEUR Workshop Proceedings. 2021. Vol. 2965. P. 64–70. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2965/paper09.pdf> (дата обращения 12.12.2024).
6. Lee I.K., Kwon S.H. Design of Ontology-based Intelligent Agents // *Journal of KIISE*. 2008. Vol. 18. No. 3. P. 347–356. DOI 10.5391/JKIIS.2008.18.3.347.
7. Gomez-Perez A., Fernández-López M., Corcho O. *Ontological engineering: with examples from the areas of knowledge management, e-commerce and the semantic web*. London: Springer, 2004. DOI 10.1007/b97353.
8. Guizzardi G, Wagner G. Towards ontological foundations for agent modelling concepts using the unified foundational ontology (UFO) // Bresciani P., Giorgini P., Henderson-Sellers B., Low G., Winikoff M., Eds. *Agent-Oriented Information Systems II. AOIS 2004. Lecture Notes in Computer Science*. 2004. Vol. 2683. P. 67–82. DOI 10.1007/11426714_8.
9. Ottens K., Hernandez N., Gleizes M.-P., Aussenac-Gilles N. A Multi-Agent System for Dynamic Ontologies // *Journal of Logic and Computation*. 2009. Vol. 19, No. 5, October. P. 831–858. DOI 10.1093/logcom/exn050.
10. Amrani N.E.A., Youssfi M., Abra O.E.K. Semantic interoperability between heterogeneous multi-agent systems based on Deep Learning // *2018 6th International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS)*, Rabat, Morocco, 2018. P. 1–6. DOI 10.1109/ICMCS.2018.8525921.
11. Misnik A.E. Ontological engineering on metagraphs basis // *2022 VI International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino)*. 2022. P. 1–6. DOI 10.1109/Inforino53888.2022.9782909.
12. Gapanyuk Y.E. Metagraph approach to the information-analytical systems development // *Proceedings of the 6th International Conference Actual Problems of System and Software Engineering, Moscow, Russia, 2019. CEUR Workshop Proceedings*. 2019. Vol. 2514. P. 428–439. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2514/paper110.pdf> (дата обращения 12.12.2024).
13. Bobryakov A., Misnik A., Prakapenka S. Management of industrial and technological processes of complex systems based on modified neuro-fuzzy Petri nets // *Russian Advances in Fuzzy Systems and Soft Computing: Selected Contributions to the 10th International Conference on «Integrated Models and Soft Computing in Artificial Intelligence»*, IMSC 2021. CEUR Workshop Proceedings. 2021. Vol. 2965. P. 276–283. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2965/paper37.pdf> (дата обращения 12.12.2024).
14. Borisov V.V., Zakharichenkov K.V., Kutuzov V.V., Misnik A.E., Prokopenko S.A. Modeling educational processes based on neuro-fuzzy temporal Petri nets // *Applied Informatics*. 2021. Vol. 16. No. 4. P. 35–47. DOI 10.37791/2687-0649-2021-16-4-35-47.