

УДК 004.822

ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ОНТОЛОГИЧЕСКИЙ ИНЖИНИРИНГ НА ОСНОВЕ МЕТА-АССОЦИАТИВНЫХ ГРАФОВ*

А.Е. Мисник (*anton@misnik.by*)

Белорусско-Российский университет, Могилев

В.В. Борисов (*vbor67@mail.ru*)

Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ»
в г. Смоленске, Смоленск

Объектно-ориентированный подход является одним из наиболее распространенных подходов к разработке сложных кибер-физических систем. Он основан на представлении системы в виде набора взаимодействующих объектов, которые работают вместе для достижения целей системы. В контексте онтологического инжиниринга этот подход может быть особенно полезен, так как он упрощает описание и моделирование сложных кибер-физических систем, включающих множество взаимосвязанных объектов и понятий. Также объектно-ориентированный подход упрощает разработку и поддержку онтологий, которые могут использоваться для описания сложных кибер-физических систем. Онтология кибер-физической системы должна быть удобной и гибкой основой для моделирования процессов и обеспечения функционирования информационно-аналитических и системных процессов. Для построения онтологий системы и извлечения онтологий процессов может использоваться метаграф. Предлагается модификация метаграфа (мета-ассоциативный граф) для включения в онтологию событий и системных методов. Такой подход к построению метаграфа позволяет включать процессную составляющую в онтологическую модель системы как неотъемлемую ее часть. Это позволяет гибко и с меньшими временными затратами проектировать, актуализировать и поддерживать процессные модели на основе сегментов общей онтологической модели.

Ключевые слова: объектно-ориентированный подход, онтологический инжиниринг, метаграфы, мета-ассоциативные графы.

* Работа выполнена в рамках государственного задания, проект № FSWF-2023-0012.

Введение

Онтология – это формализованное описание понятий и их отношений в определенной области знаний, которое играет ключевую роль в обеспечении эффективной работы сложных кибер-физических систем. Онтология кибер-физической системы должна быть удобной и гибкой основой для моделирования процессов и обеспечения функционирования информационно-аналитических и системных процессов, что позволяет системе эффективно функционировать и адаптироваться к изменяющимся условиям.

Одной из основных проблем, возникающих при онтологическом инжиниринге и дальнейшей поддержке сложных кибер-физических систем, является необходимость быстрой реструктуризации и рекомбинации онтологии в зависимости от меняющихся условий. Это связано с тем, что сложные кибер-физические системы работают в реальном или квазиреальном времени, и задержки в перестройке онтологии могут привести к негативным последствиям для системы в целом.

Реструктуризация и рекомбинация онтологии необходимы при изменениях в области знаний, которую она описывает. Причиной могут быть появление новых сущностей или существенные изменения существующих, а также необходимость адаптации к новым условиям, не предусмотренным в исходной онтологии. Возможность таких изменений позволяет онтологиям более точно описывать систему и среду, обеспечивая надежную основу для функционирования процессов и принятия решений [Argpirez et al., 1998].

Использование объектно-ориентированного подхода для онтологического инжиниринга сложных кибер-физических систем является эффективным и гибким способом описания и управления данными и знаниями в системе. Он позволяет создавать модульную и легко повторно используемую онтологию, обеспечивает простую интеграцию с другими системами и, при необходимости, легко добавлять новые сущности, свойства и методы в существующую онтологию. Это особенно полезно, если онтология системы развивается и изменяется во времени.

Таким образом, использование объектно-ориентированного подхода при создании онтологии кибер-физической системы позволяет достичь гибкости и эффективности в описании и управлении данными и знаниями. Это также обеспечивает надежную основу для адаптации к изменяющимся условиям и эффективного функционирования процессов и принятия решений в реальном или квази-реальном времени.

1. Онтология кибер-физической системы как иерархическая структура

При работе со сложными кибер-физическими системами наблюдается тенденция к объединению разномодальных подсистем в единую систему. Для интеграции разномодальных систем необходимо использовать единый концептуальный интерфейс, который может быть представлен в виде онтологии.

Онтология кибер-физической системы представляет собой упорядоченные знания о её сущностях, их свойствах и отношениях между ними. Онтология может быть представлена в виде иерархической структуры, где каждый узел представляет сущность, а связи между узлами представляют отношения между сущностями. В такой иерархии все узлы имеют свою семантику и некоторые свойства, а также могут иметь отношения с другими узлами.

Иерархическая структура онтологии может быть древовидной или графовой. Однако, в древовидной структуре каждый узел имеет только одного родителя, в то время как в графовой структуре узлы могут иметь несколько родителей. Графовая структура более гибкая и позволяет представлять сложные отношения между сущностями, что предпочтительнее для формирования онтологий кибер-физических систем.

Иерархическую структуру можно расширять, добавляя новые узлы и связи между ними. Это позволяет уточнять понимание системы и углублять знания о ней. Однако также возможен пересмотр иерархической структуры, если новые данные или открытия противоречат ее текущей структуре. Все эти действия требуют наличия соответствующего модельного, алгоритмического и программного обеспечения.

Граф, отображающий онтологию сложной кибер-физической системы, может быть огромным и содержать множество узлов и связей. Поиск информации в такой онтологии может быть сложным и затратным по времени. Одной из проблем, связанных с поиском по онтологии сложной кибер-физической системы, представленной в виде графа, является необходимость понимания ее структуры и взаимосвязей между сущностями. Если структура онтологии неизвестна, то поиск информации и формирование представлений для просмотра может занимать весьма продолжительное время. Кроме того, онтология может содержать множество отношений между сущностями, что может затруднить понимание того, какие сущности связаны и как именно они связаны.

Таким образом, использование онтологии в качестве концептуального интерфейса для интеграции разномодальных систем в единую кибер-физическую систему может быть полезным. Однако, для эффективного использования онтологии необходимо понимание ее структуры и взаимо-

связей между сущностями. Расширение иерархической структуры и постоянное уточнение знаний о системе могут помочь углубить понимание системы и улучшить ее работу.

2. Объектно-ориентированный подход к онтологическому инжинирингу

Онтологический инжиниринг является процессом проектирования и разработки онтологий для объединения двух основных технологий проектирования сложных кибер-физических систем - объектно-ориентированного и структурного анализа. Он включает в себя выделение основных классов сущностей, описывающих реальные взаимодействующие процессы, отношения между этими классами и их свойства.

Целью онтологического инжиниринга является повышение уровня интеграции информации для принятия управленческих решений, эффективности информационного поиска и возможности совместной обработки знаний на основе единого семантического описания пространства знаний [Gomez-Perez et al., 2004].

Онтологический инжиниринг сложной кибер-физической системы как объектно-ориентированный подход следует разделить на три основные части: организация структуры данных и знаний в онтологическую структуру системы (классы), Онтологическая структуризация данных системы на основе онтологической структуры (объекты), и организация данных пользовательских интерфейсов, пригодных для реализации бизнес-процессов сложных кибер-физических систем, на основе как онтологической структуры системы, так и ее данных (представления) (рис. 1).

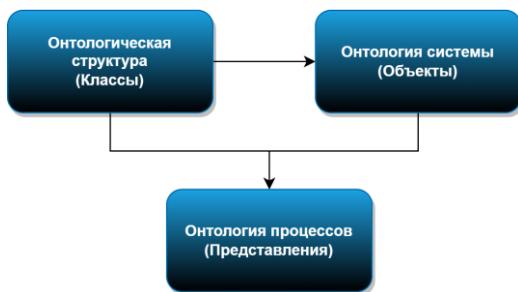


Рис. 1. Компоненты объектно-ориентированного подхода к онтологическому инжинирингу кибер-физической системы

Пользовательские интерфейсы бизнес-процессов сложной кибер-физической системы, обычно, также являются сложными, но каждый низкоуровневый узел такого интерфейса представляет собой достаточно про-

простое "плоское" представление данных – форму или таблицу. Такая простая структура может состоять из нескольких объектов разных классов, поэтому проблема надежного функционирования пользовательских интерфейсов является нетривиальной [Bobryakov et al., 2020], [Bobryakov et al., 2021], [Borisov et al., 2021].

3. Метаграфы как инструмент онтологического инжиниринга

Метаграфы являются обобщением представлений о структурах графов, используемых в различных областях. Они содержат элементы как орграфов, так и гиперграфов, и строятся на основе иерархического графа.

Метаграф представляет собой набор направленных отображений множества в множество, и его многообещающими приложениями являются моделирование отношений данных, где каждое отображение рассматривается как отображение набора ключевых элементов на набор элементов контента, а также моделирование задач рабочего процесса, где каждое отображение можно рассматривать как отображение набора элементов входных документов на набор выходных документов [Basu et al., 2007].

Метаграф определяется тремя множествами:

$$S = \{V, MV, E\},$$

где V – множество вершин метаграфа, MV – множество мета-вершин, E – множество ребер. Мета-вершина метаграфа представляет собой вершину, которая включает в себя множество вершин v , где $v \in V$ (рис. 2).

Каждая вершина метаграфа может быть атрибутивной, то есть с ней может быть связано произвольное количество атрибутов. Обозначим вершину метаграфа как v_i , и она будет содержать набор атрибутов A :

$$v_i = \{A\},$$

где $v_i \in V$ (рис. 2).

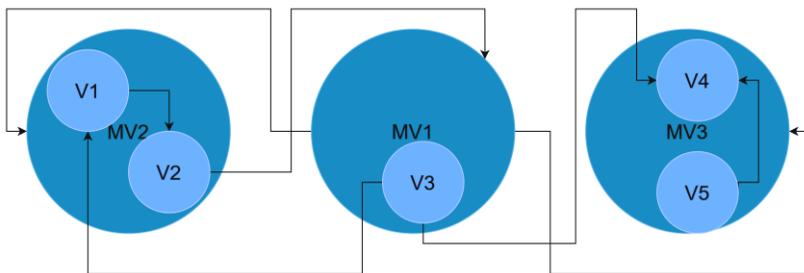


Рис. 2. Пример метаграфа

Таким образом, метаграфы представляют собой удобный инструмент для моделирования отношений данных и задач рабочего процесса. Они могут содержать как оргграфы, так и гиперграфы, и строятся на основе иерархического графа. Каждая вершина метаграфа может быть атрибутивной и содержать произвольное количество атрибутов [Chernenkiy et al., 2018], [Garanuyuk, 2019].

При описании онтологии сложной системы, метаграф с атрибутивными вершинами не всегда является идеальным инструментом. Требования к динамичности изменения структуры и параметров системы, с точки зрения онтологического инжиниринга процессов в сложной системе, могут сделать отличия между атрибутами и вершинами внутри мета-вершины достаточно неясными. В некоторых случаях вершина метаграфа может, фактически, являться вырожденным случаем рассмотрения мета-вершины без включенных в нее вершин.

Кроме того, классический метаграф не имеет естественных механизмов для идентификации событий и реакции на них, что может затруднять моделирование динамических процессов в сложных системах.

Предлагается обобщить понятия вершины и метавершины до понятия узла метаграфа (N) и дополнить определение узла именем, наборами событий и методов, принадлежащих узлу:

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

где I – имя узла, EV – набор событий, связанных с узлом метаграфа, M – набор методов, связанных с узлом метаграфа. AS , трансформируется из множества атрибутов A в множество ассоциативных атрибутов, являющихся либо обычными атрибутами, либо ссылками на узлы метаграфа:

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

Такая разновидность метаграфа позволяет увеличить гибкость онтологического инжиниринга, особенно при моделировании процессов в сложных системах. Ссылки на узлы метаграфа, на практике, мало чем отличаются от ребер метаграфа, что обеспечивает ассоциативные связи между узлами. Любая вершина может стать мета-вершиной, поскольку ссылка на другой узел метаграфа предоставляет все возможности для взаимодействия с ним [Misnik, 2022].

С другой стороны, если не требуется установка ассоциативной связи, ссылка может быть представлена в виде обычного атрибута с именем узла в качестве значения. Такой подход позволяет более гибко описывать онтологию и использовать метаграфы для моделирования сложных киберфизических систем (рис. 3).

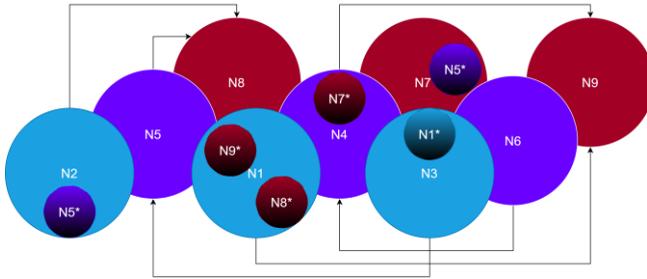


Рис. 3. Мета-ассоциативный граф

Такой подход к построению метаграфа дает возможность включать процессную составляющую в онтологическую модель системы как её неотъемлемую часть, что позволяет гибко и экономично формировать процессные модели на основе сегментов общей онтологической модели.

4. Специализированная программно-инструментальная среда для объектно-ориентированного онтологического инжиниринга

Перспективный подход к проектированию сложных кибер-физических систем направлен на уменьшение роли разработчиков программного обеспечения. Вместо программной реализации бизнес-процессов разработчики создают программно-инструментальную среду, которая позволяет экспертам проектировать онтологию и бизнес-процессы предметной области [Bobryakov et al., 2019], [Bobryakov et al., 2022], [Rasheed et al., 2019] (рис. 4).



Рис. 4. Структура программно-инструментальной среды

Такой подход позволяет преодолеть семантический разрыв между экспертами, архитекторами и разработчиками программного обеспечения. Разработчики могут привлекаться только в случаях, когда требуется создание новых или доработка существующих инструментов среды.

Специалистам предметной области достаточно базовых навыков автоматизированного проектирования для создания онтологии предметной области или реализации бизнес-процессов сложной кибер-физической системы.

Для онтологического инжиниринга предметной области кибер-физической системы необходим модуль онтологической структуры, который позволяет спроектировать онтологию в виде мета-ассоциативного графа, включая процессную составляющую в виде методов (рис. 5).

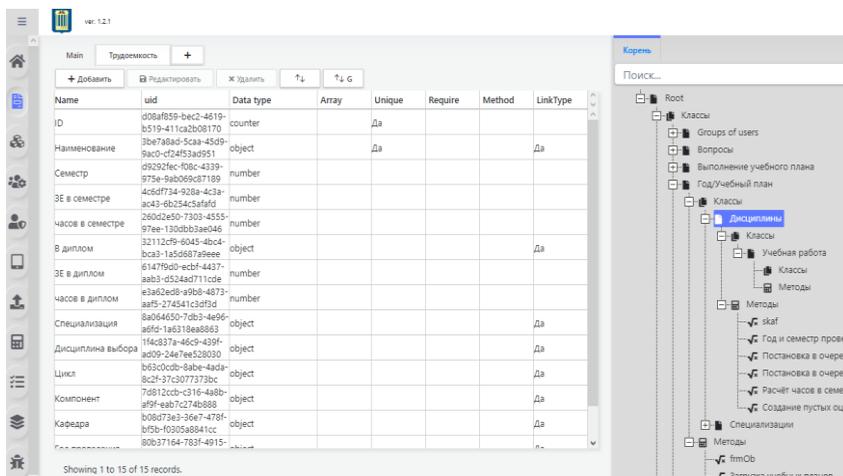


Рис. 5. Модуль онтологической структуры

Для реализации методов разработан язык программирования, который интегрируется с онтологией и позволяет использовать как классы онтологии так и её объекты (рис. 6).

Модуль системной онтологии служит контейнером данных и административным инструментом.

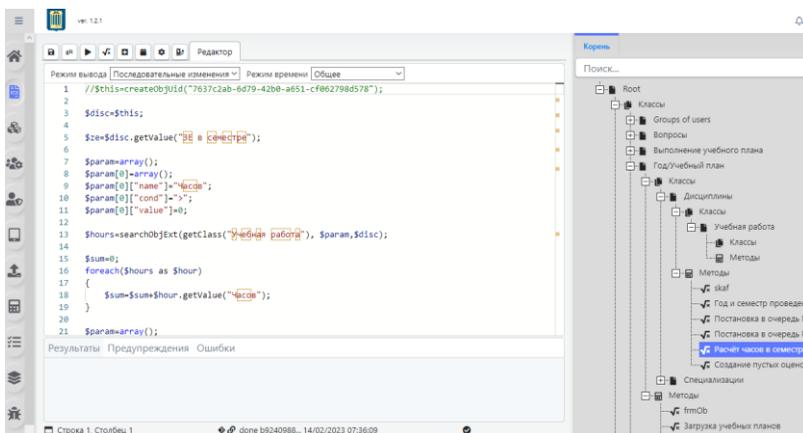


Рис. 6. Проектирование методов онтологии на основе разработанного языка программирования

Для разработки и реализации бизнес-логики сложной кибер-физической системы необходим модуль разработки пользовательского интерфейса, в который интегрированы возможности вызова методов онтологии. Одни и те же онтологические сущности могут быть организованы разными способами, что обеспечивает гибкость построения бизнес-процессов кибер-физической системы (рис. 7).

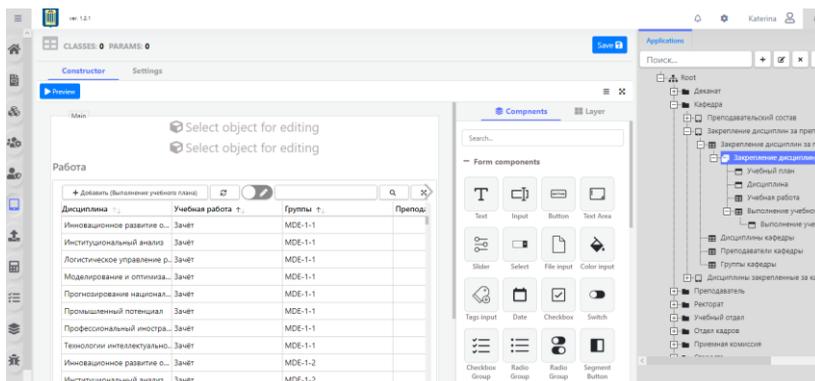


Рис. 7. Модуль разработки пользовательского интерфейса

Модуль пользовательского интерфейса необходим для взаимодействия пользователей с бизнес-процессами кибер-физической системы (рис. 8).

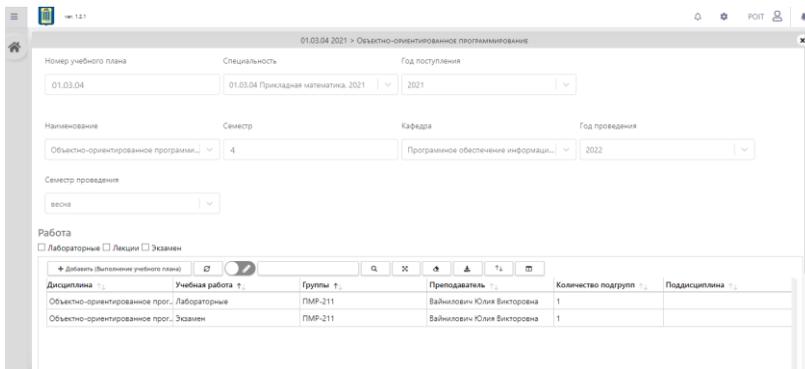


Рис. 8. Модуль пользовательского интерфейса

Заключение

Онтологический инжиниринг сложных кибер-физических систем является сложным и многогранным процессом, который требует использования различных методов и инструментов.

Рассмотрена комбинация объектно-ориентированного подхода и предложенной разновидности метаграфов – мета-ассоциативных графов, важной обладающих универсальной структурой и отличающихся возможностями интеграции процессной составляющей.

Использование мета-ассоциативных графов позволяет сократить время и усилия, затрачиваемые на создание и модификацию онтологий, а также обеспечить более наглядное и понятное представление сложных онтологических структур.

Для создания и разработки бизнес-процессов в сложных кибер-физических системах необходимы специальные программные инструменты. Описана разработанная программно-инструментальная среда для онтологического проектирования и разработки бизнес-процессов в сложных кибер-физических системах.

В настоящее время эффективность данного подхода и программно-инструментальной среды подтверждена более чем десятью успешными внедрениями в различных областях от медицины и образования до применений в промышленности.

Список литературы

[Arpirez et al., 1998] Arpirez J., Gomez- Perez A., Lozano A., Pinto S. (ONTO) 2Agent: An ontology- based WWW broker to select Ontologies // Workshop on Applications of ontologies and Problem Solving Methods. ECAI'98.

[Basu et al., 2007] Basu A., Blanning R. Metagraphs and their applications. – Springer, 2007. – 174 p.

- [**Bobryakov et al., 2020**] Bobryakov A.V., Yanukovich S.P., Zakharchenkov K.V., Borisov V.V. A Method for Managing Engineers Training Processes using Swarm Intelligence Algorithms // 2020 5th International Conference on Information Technologies in Engineering Education, Inforino 2020 – Moscow, Russia. – 2020. – DOI: 10.1109/Inforino48376.2020.9111788.
- [**Bobryakov et al., 2021**] Bobryakov A., Misnik A. and Prakapenka S. Management of industrial and technological processes of complex systems based on modified neuro-fuzzy Petri nets // CEUR Workshop Proceedings: 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. – 2021. – Vol. 2965. – P. 276-283.
- [**Bobryakov et al., 2022**] Bobryakov A.V., Borisov V.V., Misnik A.E. and Prokopenko S.A. Design and Implementation of Information-Analytical and Industrial and Technological Processes in Production Based on Neuro-Fuzzy Petri Nets // 2022 VI International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino). – 2022. – P. 1-6. – DOI: 10.1109/Inforino53888.2022.9782997.
- [**Bobryakov et al., 2019**] Bobryakov A.V., Borisov V.V., Gavrilov A.I., Tikhonova E.A. Compositional Fuzzy Modeling of Energy- and Resource Saving in Socio-Technical Systems // EAI Endorsed Transactions on Energy Web and Information Technologies. – DOI: 10.4108/eai.12-9-2018.155863.
- [**Borisov et al., 2021**] Borisov V.V., Zakharchenkov K.V., Kutuzov V.V., Misnik A.E. and 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.
- [**Chernenkiy et al., 2018**] Chernenkiy V.M., Gapanyuk Yu.E., Revunkov G.I., Andreev A.M., Kaganov Yu.T., Dunin I.V. The Principles and the Conceptual Architecture of the Metagraph Storage System / In: Manolopoulos, Ya., Stupnikov, S. (eds.) // 20th International Conference, DAMDID/RCDL 2018, Revised Selected Papers, CCIS. – Vol. 1003. – P. 73-87.
- [**Gapanyuk, 2019**] Gapanyuk Yu.E. Metagraph Approach to the Information-Analytical Systems Development // In: Proceedings of the 6th International Conference Actual Problems of System and Software Engineering, Moscow, Russia, 2019. – P. 428-439.
- [**Gomez-Perez et al., 2004**] Gomez-Perez A., Fernández-López M., Corcho O. Ontological Engineering: With Examples from the Areas of Knowledge Management, E-Commerce and the Semantic Web. – 2004.
- [**Soshnikov, 2000**] Soshnikov D. Software Toolkit for Building Embedded and Distributed Knowledge-Based Systems // In: Proceedings of the 2nd International Workshop on Computer Science and Information Technologies CSIT' 2000. – Ufa, 2000. – P. 103-111.
- [**Misnik, 2022**] 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.
- [**Rasheed et al., 2019**] Rasheed B., Popov A.Yu. Network graph datastore using DiSc processor // In: Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019. – 2019. – P. 1582-1587.