

**СЕТЕЦЕНТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И АРХИТЕКТУРА
ЕДИНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОСТРАНСТВА
«ПРОЕКТИРОВАНИЕ НА ЗАКАЗ» СЛОЖНЫХ
ТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ**

О.В. Дрозд

odrozd@sfu-kras.ru

СФУ, г. Красноярск, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены общая проблематика интероперабельности информационных систем и подходы к ее анализу. Приведены основные требования к обеспечению интероперабельности технических систем. Рассмотрены подходы к формированию моделей информационного взаимодействия в соответствии с концептуальной моделью уровней взаимодействия LCIM и эталонной моделью интероперабельности. Введено понятие «умное рабочее место» применительно к задаче обеспечения единого информационного пространства «Проектирование на заказ», сформулированы цель и задачи функционирования умного рабочего места. Приведена обобщенная сетецентрическая архитектура единого информационного пространства «Проектирование на заказ», обеспечивающего информационную поддержку реализации проектно-производственной цепочки. Предложенная архитектура единого информационного пространства включает в себя механизмы автоматического формирования и адаптации базовой и предметно-ориентированной моделей проектно-конструкторских данных, с учетом постоянно изменяющихся условий применения. Предложенная сетецентрическая архитектура единого информационного пространства «Проектирование на заказ» обеспечивает бесперебойное информационное взаимодействие заказчика и отдельных рабочих мест с целевыми процессами жизненного цикла изделия. Использование подобных адаптивных онтологических моделей более предпочтительно, чем внедрение статического профиля интероперабельности,

Ключевые слова

Жизненный цикл изделия, задача «Проектирование на заказ», интероперабельность, сетецентрическая система

разработка которого может быть затруднена из-за Поступила 15.09.2022
комплексного характера производимого сложного Принята 28.02.2023
технического изделия © Автор(ы), 2023

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта
Президента Российской Федерации для молодых ученых
и аспирантов СП-133.2022.5*

Введение. Информационная поддержка жизненного цикла (ЖЦ) изделия (ИПИ) предполагает внедрение методов и средств автоматизации проектно-конструкторской деятельности и управления ЖЦ в целом. Необходимость такой интеграции возникает при реализации организационной структуры «Проектирование на заказ», которая предполагает конфигурацию ЖЦ изделия под уникальное сложное техническое изделие (СТИ), производимое либо в единственном экземпляре, либо малой серией [1].

Построение систем ИПИ — это интеграция средств обеспечения ЖЦ изделия в сетецентрическую систему управления данными и формирование единого информационного пространства (ЕИП) предприятия. Информационное взаимодействие в рамках ЕИП в большинстве случаев обеспечивается наборами стандартов коммуникации и представления данных (профилями совместимости). Сетецентрические системы управления данными имеют следующие отличительные черты [2]:

- гибкую сетевую архитектуру, способную к динамической адаптации под текущую решаемую задачу;
- обмен информацией между всеми элементами системы в рамках решаемой задачи независимо от отношений подчиненности;
- самоорганизацию объектов управления с формированием собственных стратегий решения поставленной задачи.

Отметим, что СТИ имеет междисциплинарный характер [3], что предполагает использование широкого набора стандартов представления проектно-конструкторских данных, слабо совместимых друг с другом, и препятствует разработке единого профиля совместимости в рамках ЕИП предприятия.

Рассмотрены следующие вопросы:

- общая проблематика интероперабельности информационных систем, подходы к ее анализу и обеспечению;
- понятие «умное рабочее место» (УРМ) применительно к задаче информационного обеспечения ЕИП «Проектирование на заказ»;
- обобщенная методика автоматического формирования и адаптации онтологической модели проектно-конструкторских данных.

В результате предложены сетцентрическая архитектура ЕИП «Проектирование на заказ» и механизмы автоматического формирования и адаптации модели проектно-конструкторских данных с учетом постоянно меняющихся условий применения.

Интероперабельность, основные понятия и подходы к ее анализу и обеспечению. Интероперабельность технических систем — это многомерная концепция, в которой информационное взаимодействие рассматривается с различных точек зрения в зависимости от области применения обеспечиваемых систем. Под интероперабельностью понимается способность совокупности взаимодействующих систем к совместной обработке информации в соответствии с обобщенной операционной семантикой для достижения заданной цели в данном контексте с минимизацией объемов взаимодействия [4]. В целом система может считаться интероперабельной только, если она соответствует уровням интероперабельности [5]:

- техническому (стандартные аппаратные и программные интерфейсы);
- синтаксическому (единый способ представления и обмена данными);
- семантическому (единый способ обработки данных в соответствии с согласованной семантикой предметной области);
- организационному (единая форма представления организационной структуры системы и формы взаимодействия ее элементов).

Отметим, что интероперабельные системы информационно совместимы, но обратное не всегда верно [6].

Обеспечение интероперабельности при реализации концепции Индустрия 4.0 предполагает агрегацию данных из разнородных источников в условиях реального времени [7]. При этом возникают проблемы формирования инфраструктуры управления проектными данными, разработки соответствующих моделей и архитектур. В целях обеспечения ИПИ различного назначения предложен ряд стандартных моделей и архитектур представления гетерогенных данных:

- модель представления данных в системах производственного моделирования NISTIR 7719 (Национальный институт стандартов и технологий, США);
- модель архитектуры Индустрия 4.0 RAMI 4.0 (Немецкий институт по стандартизации, ФРГ);
- модель архитектуры промышленного интернета IIRA (Консорциум промышленного Интернета, США);
- протокол коммуникационной совместимости (SISO-STD-013–201) и универсальные шаблоны сообщений (SISO-STD-012–2013) (Организация стандартов интероперабельности).

В России основным разработчиком стандартов в области обеспечения информационной совместимости является Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (ИРЭ РАН) [8]. В разработанном ИРЭ РАН ГОСТ Р 55062–2012* приведены эталонная модель и основные этапы обеспечения интероперабельности систем промышленной автоматизации.

Существующие модели взаимодействия информационных систем сосредоточены на определении уровней информационного взаимодействия и способов их ранжирования. Среди подобных моделей можно упомянуть [9] модель уровней взаимодействия информационных систем (LISI), организационную модель взаимодействия (OIM), концептуальную модель уровней взаимодействия (LCIM) и модель информационного взаимодействия, предложенную в ГОСТ Р 55062–2012.

Рассмотрим два подхода к формированию моделей информационного взаимодействия: концептуальную модель уровней взаимодействия LCIM и эталонную модель интероперабельности, предложенную в ГОСТ Р 55062–2012. Взаимодействие систем по данным моделям, используемые стандарты, приложения и подходы к представлению данных и формированию инфраструктуры информационного обмена приведены на рис. 1.

Модель LCIM рассматривает следующие уровни взаимодействия:

- уровень 1 (технический) — унифицированный сетевой протокол обмена данными между системами;
- уровень 2 (синтаксический) — унифицированный формат представления данных;
- уровень 3 (семантический) — унифицированная модель интерпретации и обработки данных с учетом контекста предметной области;
- уровень 4 (прагматический) — распространение сведений о методах и процедурах обработки данных между взаимодействующими системами;
- уровень 5 (динамический) — распространение сведений о вносимых изменениях в функционирование взаимодействующих систем;
- уровень 6 (концептуальный) — общая концептуальная модель взаимодействия систем с учетом существующих ограничений.

Эталонная модель интероперабельности по ГОСТ Р 55062–2012 включает в себя следующие уровни взаимодействия:

* ГОСТ Р 55062–2012. Информационные технологии. Системы промышленной автоматизации и их интеграция. Интероперабельность. Основные положения. М., Стандартинформ, 2018.

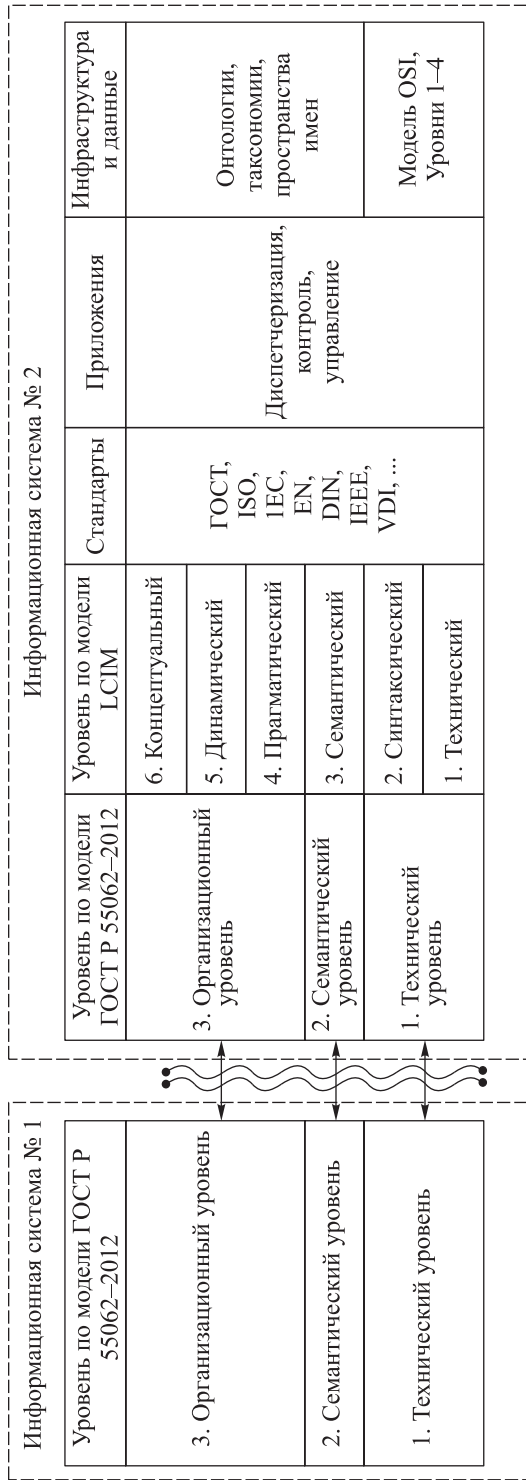


Рис. 1. Модели информационного взаимодействия систем LCIM и ГОСТ Р 55062–2012

- уровень 1 (технический) — синтаксис передаваемой информации;
- уровень 2 (семантический) — семантические аспекты взаимодействия систем;
- уровень 3 (организационный) — прагматические аспекты взаимодействия систем.

Важнейшая проблема, которая должна быть разрешена в процессе информационной интеграции, — это обеспечение информационной совместимости на уровне описания синтаксиса и семантики проектно-конструкторских данных [10]. Использование онтологического подхода позволяет решить проблемы синтаксической и семантической совместимости путем создания и поддержания в актуальном состоянии формализованной структуры данных.

Под онтологией понимается формальная спецификация, которая предполагает однозначное семантическое представление знаний в выбранной предметной области [11]. При этом для достижения информационной совместимости предлагается применять набор базовых онтологий и частных предметно-ориентированных онтологий, которые используются для управления знаниями, специфичными для данной предметной области [7].

В отличие от других технологий концептуального моделирования, онтология предоставляет формализованное представление предметной области в форме совокупности объектов, возможных отношений между ними и накладываемых на них аксиоматических ограничений [12]. Таким образом, онтологические модели описывают структурную организацию данных, терминологию рассматриваемой предметной области, процедуры обмена, преобразования данных и их повторного использования [10]. Применительно к задаче управления ЖЦ СТИ онтологические модели учитывают вертикальные и горизонтальные связи между проектными и производственными решениями, что в целом повышает качество реализации СТИ с учетом требований заказчика.

Объектом информационного обмена и предметом онтологического моделирования являются проектно-конструкторские данные в форме электронных конструкторских документов разной степени структуризации. Структура и содержимое массивов проектно-конструкторских данных могут рассматриваться как динамические системы, развивающиеся во времени. Применительно к методологии ЕИП «Проектирование на заказ» траектория развития подобной динамической системы формируется во многом случайным образом [13]. Описание подобных структур требует отказа от использования обобщенных профилей интеропера-

бельности и внедрения адаптивных онтологических моделей, способных к автоматическому формированию и актуализации под непрерывно изменяющимся контекст.

Обеспечение интероперабельности организационной структуры ЕИП «Проектирование на заказ». Информационное обеспечение ЕИП «Проектирование на заказ» имеет следующие характерные особенности [14]:

- высокая сложность сбора, анализа и контроля распространения технических изменений, вносимых в изделие;
- хранение и оперативная обработка больших объемов слабоструктурированных проектно-конструкторских данных;
- динамический характер спецификации, электронной структуры и информационной модели изделия.

Проектно-производственную цепочку ЕИП «Проектирование на заказ» можно рассмотреть как совокупность взаимосвязанных УРМ и распределенных средств управления проектно-конструкторскими данными об изделии.

Под УРМ понимается комплекс программных и аппаратных средств, обеспечивающих (кроме непосредственно задач целевого процесса [15, 16]) идентификацию изделия и формирование цифрового паспорта, контроль функционирования программных и аппаратных средств, авторизацию персонала, учет рабочего времени, операций, выработки и фактической трудоемкости, а также информационное взаимодействие между УРМ в рамках проектно-производственной цепочки.

Целевая задача функционирования УРМ состоит в обеспечении требуемых параметров реализации целевого процесса. Именно на уровне отдельных УРМ используются существующие стандарты представления проектно-конструкторских данных (IGES, STEP и PLib и др.), дальнейшее преобразование данных осуществляется с использованием онтологических моделей.

Обобщенная архитектура обеспечения ЕИП «Проектирование на заказ» приведена на рис. 2. Умные рабочие места обеспечения процессов проектирования ($УРМ_{1.1-1.3}$, структура детально не показана) и производства ($УРМ_{2.1-2.3}$) включают в себя следующие подсистемы: наблюдение за функционированием рабочего места m и его основных компонентов $S_{H\ 1, m}$, управление основными компонентами рабочего места $S_{Oy\ 1, m}$, накопление данных о целевом процессе, реализация которого обеспечивается рабочим местом $S_{и\ 1, m}$, формирование и трансляция требований к обеспечению

заданного целевого процесса на рабочем месте $S_{T 1, m}$. Взаимодействие подсистем обеспечивается информационными потоками наблюдения $I_{H 1, m}$ и управления функционированием рабочего места $I_{Y 1, m}$, а также обмена $I_{m \leftrightarrow n}$ оперативной информацией о функционировании рабочих мест m и n .

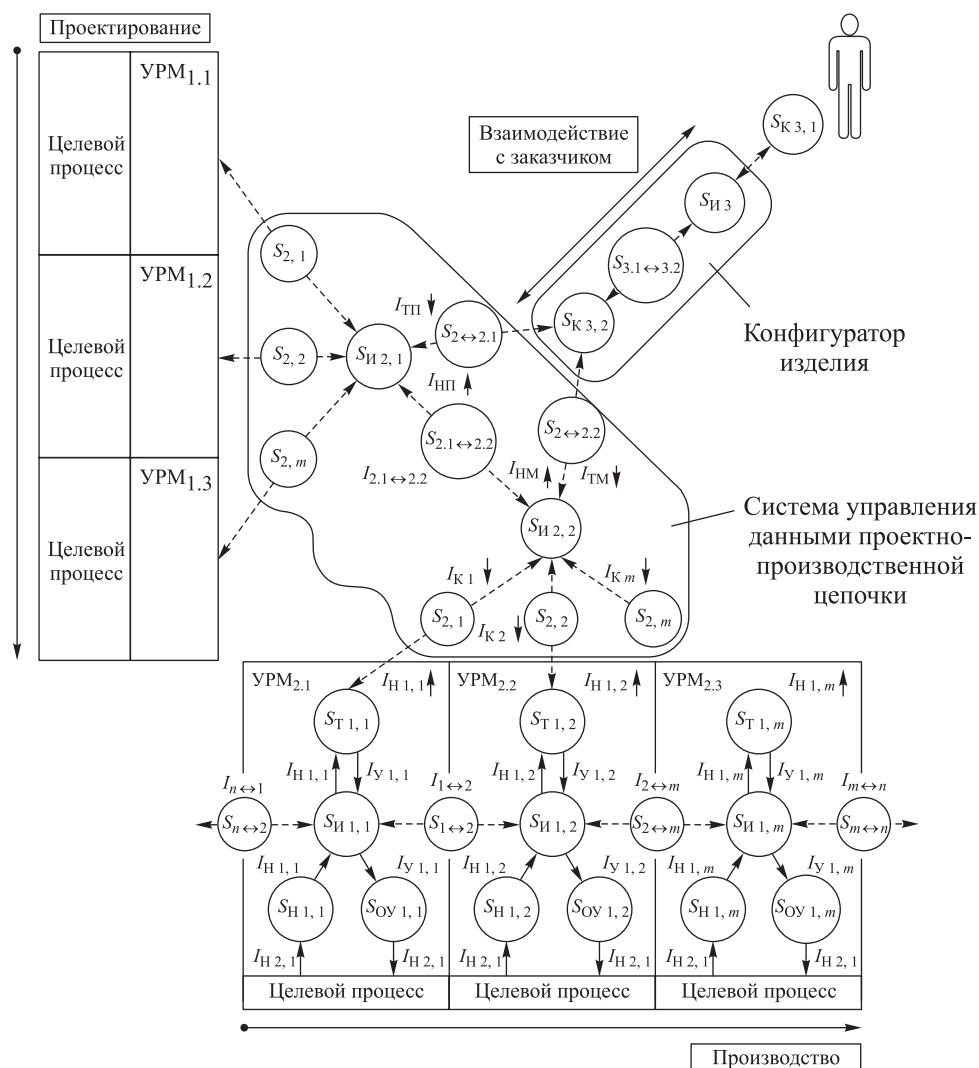


Рис. 2. Обобщенная архитектура структурной организации ЕИП «Проектирование на заказ»

Система управления проектно-конструкторскими данными об изделии включает в себя подсистемы управления проектными ($S_{И 2, 1}$) и производственными ($S_{И 2, 2}$) данными. Взаимодействие данных подсистем

обеспечивается информационными потоками трансляции требований к целевым процессам $I_{k\ m}$, обеспечению проектной ($I_{ТП}$) и производственных ($I_{ТМ}$) цепочек. Взаимодействие систем управления данными проектно-производственной цепочки с базовой онтологической моделью осуществляется информационным потоком $I_{2.1\leftrightarrow 2.2}$. Передача результатов наблюдения за реализацией проектно-производственной цепочки заказчику изделия осуществляется информационными потоками $I_{НП}$ и $I_{НМ}$. Инженерно-технический конфигуратор изделия обеспечивает сбор, систематизацию и трансляцию технических требований и включает в себя подсистемы обеспечения взаимодействия с заказчиком $S_{К\ 3,\ 1}$, хранения технических требований $S_{И\ 3}$, декомпозиции и распределения требований к разрабатываемому изделию $S_{К\ 3,\ 2}$. Архитектура ЕИП «Проектирование на заказ» состоит из базовой онтологии СТИ $S_{2.1\leftrightarrow 2.2}$ и множества предметно-ориентированных онтологий: целевых процессов $S_{2,\ 1}$ – $S_{2,\ m}$, межпроцессного взаимодействия $S_{m\leftrightarrow n}$, формальных требований к реализации проектно-производственной цепочки $S_{2\leftrightarrow 2.1}$, $S_{2\leftrightarrow 2.2}$ и технических изменений $S_{1\leftrightarrow 2}$.

Используемая иерархия онтологических моделей приведена на рис. 3.



Рис. 3. Иерархия онтологических моделей ЕИП «Проектирование на заказ»

В целом процесс автоматического формирования и адаптации онтологии межпроцессного взаимодействия двух УРМ приведен на рис. 4. Информационный обмен с использованием онтологии в таком случае состоит из четырех основных этапов: приема и регистрации данных (1), формирования онтологической модели (2), адаптации онтологической модели под изменение контекста (3), преобразования данных в совместимый формат (4.1) с последующей передачей (4.2). Управление предметно-ориен-

тированными онтологиями иерархии (см. рис. 3) осуществляется аналогичным образом. Формирование и актуализация базовой онтологии проводится системами управления проектно-производственными данными одновременно с электронной структурой и информационной моделью изделия.

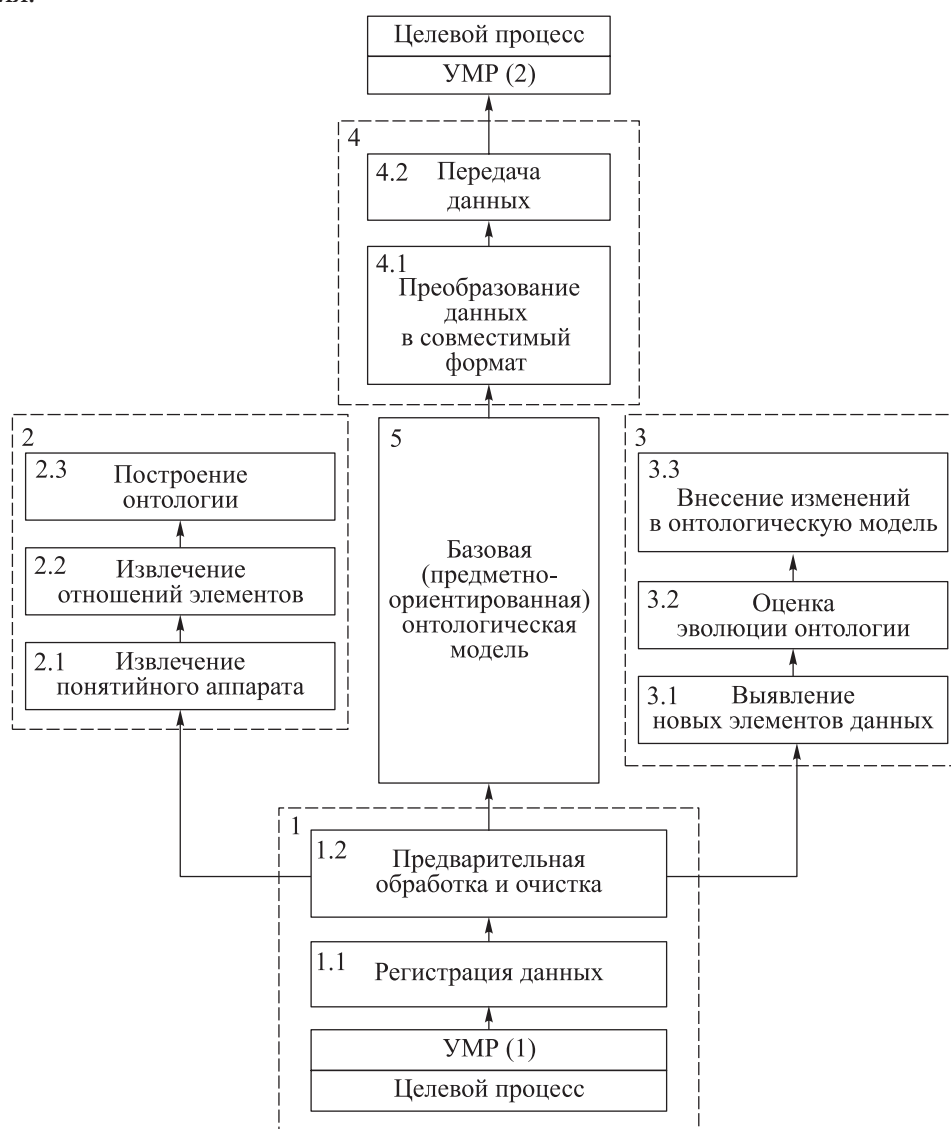


Рис. 4. Процесс управления онтологией межпроцессорного взаимодействия УРМ

Применительно к задаче автоматического формирования онтологических моделей проектно-конструкторских данных процедура формирования как базовой, так и предметно-ориентированной онтологии состоит из следующих этапов [17] (см. рис. 4):

- регистрация (1.1), предварительная обработка и очистка проектно-конструкторских данных (1.2);
- извлечение понятийного аппарата с использованием алгоритмов связывания и классификации элементов онтологии (2.1);
- извлечение отношений элементов понятийного аппарата с использованием графового метода и синтаксических шаблонов (2.2);
- построение онтологии с использованием механизма логического вывода (2.3).

Автоматически сформированная онтология проектно-конструкторских данных сохраняет свою актуальность только для заданного корпуса конструкторских данных и этапа ЖЦ изделия. В связи с этим возникает задача адаптации онтологической структуры в соответствии с вносимыми изменениями в структурную организацию проектно-конструкторских данных, вызванных естественным развитием ЖЦ изделия. Кроме того, динамическая адаптация онтологии позволяет разрешать конфликты, вызванные семантической несовместимостью проектно-конструкторских данных при решении интеграционных задач и добавлении в информационное пространство новых источников данных.

Процедура адаптации онтологической модели включает в себя следующие этапы (см. рис. 4):

- выявление новых элементов данных, отличных от содержимого эталонного корпуса данных, баз данных, онтологических моделей (3.1);
- оценка эволюции онтологической модели на соответствие модели модификации онтологической модели проектно конструкторских данных, проверка согласованности и непротиворечивости вносимых изменений (3.2);
- внесение изменений в онтологическую модель и связанные с нею онтологии нижних уровней иерархии (3.3).

Различие методов адаптации онтологической модели и методов автоматического формирования онтологии заключается в необходимости введения набора правил модификации предметно-ориентированной онтологии проектной информации. Подобные правила модификации позволяют определить, можно ли считать анализируемые данные новыми понятиями и каков характер связей данного понятия с существующими. По результатам проверки изменения можно принять или отклонить.

Заключение. Единое информационное пространство «Проектирование на заказ» — это предельный вариант адаптации проектно-производственной цепочки изготовления СТИ под требования заказчика и наиболее сложный в части информационного сопровождения. Единое инфор-

мационное пространство «Проектирование на заказ» должно соответствовать принципам интероперабельности информационных систем и обеспечивать информационное взаимодействие:

- УРМ при реализации проектно-производственной цепочки;
- систем управления проектными и производственными данными с отдельными рабочими местами и средствами конфигурации изделия под требования заказчика;
- инженерно-технического конфигуратора изделия с системами управления данными предприятия.

В целом предложенная сетецентрическая архитектура ЕИП «Проектирование на заказ» обеспечивает бесперебойное информационное взаимодействие заказчика, отдельных рабочих мест и целевых процессов ЖЦ изделия.

Предложенная архитектура ЕИП включает в себя механизмы автоматического формирования и адаптации базовой и предметно-ориентированных моделей проектно-конструкторских данных с учетом постоянно меняющихся условий применения. Использование подобных адаптивных онтологических моделей более предпочтительно, чем внедрение статического профиля интероперабельности, разработка которого может быть затруднена из-за комплексного характера производимого СТИ.

Предложенная архитектура ЕИП может быть использована как в централизованных, так и распределенных системах управления проектно-производственными данными. При этом совокупность предметно-ориентированных онтологий формирует распределенную графовую базу данных с размещением ее составных частей на узлах-источниках данных. На узлах распределенной системы управления также размещаются локальные копии базовой онтологии данных, синхронизация и контроль версий которых обеспечивается средствами системы управления данными.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Башлыкова А.А., Козлов С.В., Макаренко С.И. и др. Подход к обеспечению интероперабельности в сетецентрических системах управления. *Журнал радиоэлектроники*, 2020, № 6. DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.6.13>
- [2] Юсупов Р.М., Соколов Б.В., Птушкин А.И. и др. Анализ состояния исследований проблем управления жизненным циклом искусственно созданных объектов. *Труды СПИИРАН*, 2011, т. 16, № 1, с. 37–109. DOI: <https://doi.org/10.15622/sp.16.2>
- [3] Yahia E., Aubry A., Panetto H. Formal measures for semantic interoperability assessment in cooperative enterprise information systems. *Comput. Ind.*, 2012, vol. 63, no. 5, pp. 443–457. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2012.01.010>

- [4] Rezaei R., Chiew T.K., Lee S.P., et al. Interoperability evaluation models: a systematic review. *Comput. Ind.*, 2014, vol. 65, no. 1, pp. 1–23.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2013.09.001>
- [5] Panetto H. Towards a classification framework for interoperability of enterprise applications. *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, 2007, vol. 20, no. 8, pp. 727–740.
DOI: <https://doi.org/10.1080/09511920600996419>
- [6] Burns T., Cosgrove J., Doyle F. A review of interoperability standards for Industry 4.0. *Procedia Manuf.*, 2019, vol. 38, pp. 646–653.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.083>
- [7] Макаренко С.И., Олейников А.Я., Черницкая Т.Е. Модели интероперабельности информационных систем. *Системы управления, связи и безопасности*, 2019, № 4, с. 215–245. DOI: <https://doi.org/10.24411/2410-9916-2019-10408>
- [8] Sjarov M., Kißkalt D., Lechler T., et al. Towards “Design for Interoperability” in the context of Systems Engineering. *Procedia CIRP*, 2020, vol. 96, pp. 145–150.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.067>
- [9] El Kadiri S., Kiritsis D. Ontologies in the context of product lifecycle management: state of the art literature review. *Int. J. Prod. Res.*, 2015, vol. 53, no. 18, pp. 5657–5668.
DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1052155>
- [10] Fraga A.L., Vegetti M., Leone H.P. Ontology-based solutions for interoperability among product lifecycle management systems: a systematic literature review. *J. Ind. Inf. Integration*, 2020, vol. 20, art. 100176. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2020.100176>
- [11] He Y., Hao C., Wang Y., et al. An ontology-based method of knowledge modelling for remanufacturing process planning. *J. Clean. Prod.*, 2020, vol. 258, art. 120952.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120952>
- [12] McKendry D.A., Whitfield R.I., Duffy A.H.B. Product Lifecycle Management implementation for high value Engineering to Order programmes: an informational perspective. *J. Ind. Inf. Integration*, 2022, vol. 26, art. 100264.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100264>
- [13] Willner O., Gosling J., Schönsleben P. Establishing a maturity model for design automation in sales-delivery processes of ETO products. *Comput. Ind.*, 2016, vol. 82, pp. 57–68. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.05.003>
- [14] Dhiman H., Röcker C. Worker assistance in smart production environments using pervasive technologies. *IEEE PerCom Workshop*, 2019, pp. 95–100.
DOI: <https://doi.org/10.1109/PERCOMW.2019.8730771>
- [15] Alobaidi M., Malik K.M., Hussain M. Automated ontology generation framework powered by linked biomedical ontologies for disease-drug domain. *Comput. Methods Programs Biomed.*, 2018, vol. 165, pp. 117–128.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2018.08.010>
- [16] Malik K.M., Krishnamurthy M., Alobaidi M., et al. Automated domain-specific healthcare knowledge graph curation framework: subarachnoid hemorrhage as phenotype. *Expert Syst. Appl.*, 2020, vol. 145, art. 113120.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.113120>

[17] Mendonça M., Perozo N., Aguilar J. Ontological emergence scheme in self-organized and emerging systems. *Adv. Eng. Inform.*, 2020, vol. 44, art. 101045. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101045>

Дрозд Олег Владимирович — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры информационных технологий на радиоэлектронном производстве СФУ (Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, Свободный пр-т, д. 79).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Дрозд О.В. Сетецентрическая модель и архитектура единого информационного пространства «Проектирование на заказ» сложных технических изделий. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2023, № 2 (143), с. 74–89. DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2023-2-74-89>

**DESIGN-TO-ORDER UNIFIED INFORMATION SPACE
NETWORK-CENTRIC MODEL AND ARCHITECTURE
IN THE COMPLEX TECHNICAL PRODUCTS**

O.V. Drozd

odrozd@sfu-kras.ru

SibFU, Krasnoyarsk, Russian Federation

Abstract

The paper considers general problems of information systems interoperability, approaches to its analysis and support. Basic requirements for ensuring the technical systems interoperability are provided. Approaches are analyzed to formation of the information interaction models in accordance with the level of conceptual interoperability model and the reference interoperability model. The concept of smart workplace is introduced in relation to the Design-to-order information support, objective and tasks of the smart workplace operation are formulated. Generalized network-centric architecture of the Design-to-order unified information space is presented, which provides information support in implementation of the design and production chain. The proposed unified information space architecture includes mechanisms of automatic generation and adaptation of the design data basic and domain-specific models taking into account the constantly altering application conditions. In general, the proposed network-centric architecture of the Design-to-order unified information space

Keywords

Product life cycle, Design-to-order task, interoperability, network-centric system

ensures uninterrupted information interaction from the customer to separate workplaces and target processes of the product life cycle. Using these adaptive ontological models appears more preferable than introduction of the static interoperability profile, which development could be hampered by complex nature of the integrated technical product being manufactured

Received 15.09.2022

Accepted 28.02.2023

© Author(s), 2023

The study was carried out with the financial support of the grant of the President of the Russian Federation for young scientists and post-graduates SP-133.2022.5

REFERENCES

- [1] Bashlykova A.A., Kozlov S.V., Makarenko S.I., et al. An approach to ensuring interoperability in network-centric control systems. *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics], 2020, no. 6 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.6.13>
- [2] Yusupov R.M., Sokolov B.V., Ptushkin A.I., et al. Research problems analysis of artificial objects lifecycle management. *Trudy SPIIRAN* [SPIIRAS Proceedings], 2011, vol. 16, no. 1, pp. 37–109 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15622/sp.16.2>
- [3] Yahia E., Aubry A., Panetto H. Formal measures for semantic interoperability assessment in cooperative enterprise information systems. *Comput. Ind.*, 2012, vol. 63, no. 5, pp. 443–457. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2012.01.010>
- [4] Rezaei R., Chiew T.K., Lee S.P., et al. Interoperability evaluation models: a systematic review. *Comput. Ind.*, 2014, vol. 65, no. 1, pp. 1–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2013.09.001>
- [5] Panetto H. Towards a classification framework for interoperability of enterprise applications. *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, 2007, vol. 20, no. 8, pp. 727–740. DOI: <https://doi.org/10.1080/09511920600996419>
- [6] Burns T., Cosgrove J., Doyle F. A review of interoperability standards for Industry 4.0. *Procedia Manuf.*, 2019, vol. 38, pp. 646–653. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.083>
- [7] Makarenko S.I., Oleynikov A.Ya., Chernitskaya T.E. Models of interoperability assessment for information systems. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Systems of Control, Communication and Security], 2019, no. 4, pp. 215–245 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24411/2410-9916-2019-10408>
- [8] Sjarov M., Kißkalt D., Lechler T., et al. Towards “Design for Interoperability” in the context of Systems Engineering. *Procedia CIRP*, 2020, vol. 96, pp. 145–150. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.067>
- [9] El Kadiri S., Kiritsis D. Ontologies in the context of product lifecycle management: state of the art literature review. *Int. J. Prod. Res.*, 2015, vol. 53, no. 18, pp. 5657–5668. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2015.1052155>

- [10] Fraga A.L., Vegetti M., Leone H.P. Ontology-based solutions for interoperability among product lifecycle management systems: a systematic literature review. *J. Ind. Inf. Integration*, 2020, vol. 20, art. 100176. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2020.100176>
- [11] He Y., Hao C., Wang Y., et al. An ontology-based method of knowledge modelling for remanufacturing process planning. *J. Clean. Prod.*, 2020, vol. 258, art. 120952. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120952>
- [12] McKendry D.A., Whitfield R.I., Duffy A.H.B. Product Lifecycle Management implementation for high value Engineering to Order programmes: an informational perspective. *J. Ind. Inf. Integration*, 2022, vol. 26, art. 100264. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100264>
- [13] Willner O., Gosling J., Schönsleben P. Establishing a maturity model for design automation in sales-delivery processes of ETO products. *Comput. Ind.*, 2016, vol. 82, pp. 57–68. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.05.003>
- [14] Dhiman H., Röcker C. Worker assistance in smart production environments using pervasive technologies. *IEEE PerCom Workshop*, 2019, pp. 95–100. DOI: <https://doi.org/10.1109/PERCOMW.2019.8730771>
- [15] Alobaidi M., Malik K.M., Hussain M. Automated ontology generation framework powered by linked biomedical ontologies for disease-drug domain. *Comput. Methods Programs Biomed.*, 2018, vol. 165, pp. 117–128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2018.08.010>
- [16] Malik K.M., Krishnamurthy M., Alobaidi M., et al. Automated domain-specific healthcare knowledge graph curation framework: subarachnoid hemorrhage as phenotype. *Expert Syst. Appl.*, 2020, vol. 145, art. 113120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.113120>
- [17] Mendonça M., Perozo N., Aguilar J. Ontological emergence scheme in self-organized and emerging systems. *Adv. Eng. Inform.*, 2020, vol. 44, art. 101045. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101045>

Drozd O.V. — Cand. Sc. (Eng.), Senior Lecturer, Department of Information Technology in Radio-Electronic Industry, SibFU (Svobodnyi prospekt 79, Krasnoyarsk, 660041 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Drozd O.V. Design-to-order unified information space network-centric model and architecture in the complex technical products. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2023, no. 2 (143), pp. 74–89 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2023-2-74-89>