

ПОДХОД К ФОРМИРОВАНИЮ ВИРТУАЛЬНОЙ МЕТАСТРУКТУРЫ ЦИФРОВОГО ПРОЕКТНОГО ДВОЙНИКА КОРПОРАТИВНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

А.Ю. Сапожников¹, А.А. Кузнецов¹, А.С. Маврина¹, Г.Г. Куликов²

¹ Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа, Россия,

² АО «Уфимское научно-производственное предприятие «Молния», г. Уфа, Россия

В настоящее время формируется методология системной инженерии, продуктом которой является, как правило, создание информационных моделей реальных объектов, дополненных виртуальными составляющими, и наоборот, виртуальных объектов, дополненных реальными составляющими. Например, информационная модель технологического объекта – спецификация реального оборудования, дополненная спецификацией приобретаемого оборудования какого-либо технологического процесса и наоборот. По аналогии с общей инженерией в области технической деятельности метаструктуры таких информационных моделей должны удовлетворять V-образной структуре процессов валидации и верификации. То есть модели в течение их жизненного цикла должны регулярно проверяться путем оценки степени соответствия её структуры и параметров реальным и виртуальным объектам. Сегодня существуют условия совместного решения задачи системного информационного моделирования технологических объектов с учетом их внутренней (физической) структуры и внешней структуры цифровой среды. В общетеоретическом плане в основе построения системных моделей лежит проблема формального непротиворечивого описания (грамматического исчисления) структуры и функциональных закономерностей множества объектов и их связей в исследуемой предметной области. В основу излагаемого подхода системного моделирования рассматриваемой предметной области положена классическая модель учебно-производственной деятельности машиностроительного предприятия (МП) и вуза. **Цель исследования.** Применить принципы проектного подхода для формирования метаструктуры цифрового двойника корпоративной информационной системы (КИС) машиностроительного предприятия, исследовать перспективы его применения, определить ключевые информационные компоненты в управлении предметно-ориентированными знаниями и данными, а также возможность масштабирования технологий при формировании цифровой среды для архитектуры современного МП, повышения эффективности взаимодействия участников бизнес-процессов. **Методы исследования, использованные в работе:** принципы методологии системной инженерии (процессного подхода, жизненного цикла и др.); комплексный подход и структурный анализ процесса проектирования по методологии SADT (Structured Analyze and Design Technology); методология TOGAF (The Open Group Architecture Framework). **Результаты.** Предложенный подход системного моделирования рассматриваемой предметной области является развитием работ коллектива авторов; демонстрируется возможность его масштабирования на примере взаимодействия участников НОЦ с использованием в составе вуза цифрового двойника КИС предприятия реального сектора экономики. Показана необходимость разработки модели управления знаниями, возрастающая роль информационно-поисковых систем. **Заключение.** Предложенный подход расширяет применение метаструктуры цифрового двойника, позволяет скорректировать архитектуру предприятия для повышения эффективности бизнес-процессов.

Ключевые слова: архитектура предприятия, TOGAF, системное моделирование бизнес-процессов, информационная платформа, PLM-система, базовая кафедра, информационно-поисковая система.

Введение

В настоящее время в литературе информационные модели, создаваемые методами системной инженерии, принято называть цифровыми двойниками (ЦД), которые реализованы с применением CALS технологий [1]. Очевидно, составляющими архитектуры информационной системы для

Информатика и вычислительная техника

их реализации является прежде всего реестр, определяющий множество предметно-ориентированных организационно-функциональных объектов, например, в соответствии с методологией ISO 15288 систем множество бизнес-процессов, а на следующем уровне специализированных инженерных систем типа ERP/PLM/CAD/CAM/CAE/MES/SCADA и др. [2–8].

Построенная при таком подходе комплексная системная атрибутивная модель платформы КИС (СМ_{кис(a)}) как композиция системной модели ЦД исследуемого объекта (СМ_{цд,ио(b)}) и информационной инженерной среды (СМ_{ис(c)}) как расширение свойств их декартового произведения функционально связаны через 4-е измерение этапов жизненного цикла Т. То есть комплексная системная модель КИС обратима до её цифрового двойника. На теоретико-множественном языке это соответствует структуре формальной функциональной модели вида:

$$\text{КИС (СМ}_{\text{кис(a)}(T)) = \text{СМ}_{\text{цд,ио(b)}(T) \circ \text{СМ}_{\text{ис(c)}(T). \quad (1)$$

Следующим шагом метаструктурной композиции системных моделей типа (1) является интеграция их в бизнес-архитектуру предприятия (АП).

В настоящее время для формального описания АП находит широкое применение формализм, предложенный Дж. Захманом [9, 10]. Формализм представляет собой обобщённый словарь и структуры для описания современных сложных корпоративных систем в декартовом пространстве общепринятых классификаторов (спецификаций) в форме OLAP-кубов. Логическая концепция этой формализации преследует цель представить системное внутреннее описание объектов и их внешнее взаимодействие с выделенных точек зрения и соответствующих уровней аспектов (абстракции).

Классическая модель представляется в виде матрицы (рис. 1).

		Объекты ЧТО	Функции КАК	Дислокация, сеть ГДЕ	Люди КТО	Время КОГДА	Мотивация ПОЧЕМУ	
Бизнес-руководители	Планировщик	Список важных понятий и объектов	Список основных бизнес-процессов	Территориальное расположение	Ключевые организации	Важнейшие события	Бизнес-цели и стратегии	Сфера действия (контекст)
	Владелец, менеджер	Концептуальная модель данных	Модель бизнес-процессов	Схема логистики	Модель потока работ (workflow)	Мастер-план реализации	Бизнес-план	Модель предприятия
	Конструктор, архитектор	Логические модели данных	Архитектура приложений	Модель распределенной архитектуры	Архитектура интерфейса пользователя	Структура процессов	Роли и модели бизнес-правил	Модель системы
IT-менеджеры и разработчики	Проектировщик	Физическая модель данных	Системный проект	Технологическая архитектура	Архитектура презентации	Структуры управления	Описания бизнес-правил	Технологическая (физическая) модель
	Разработчик	Описание структуры данных	Программный код	Сетевая архитектура	Архитектура безопасности	Определение временных привязок	Реализация бизнес-логики	Детали реализации
		Данные	Работающие программы	Сеть	Реальные люди, организации	Бизнес-события	Работающие бизнес-стратегии	Работающее предприятие
		Данные	Функции, процессы	Сеть, расположение систем	Люди, организации	Время, расписания	Мотивация	

Рис. 1. Модель Захмана
Fig. 1. The Zachman's model

Существуют специализированные продукты, такие как Popkin Software Architect [11], основанные на модели Захмана и позволяющие достаточно эффективно управлять созданием моделей и артефактов описания АП.

Соответствующее обобщение подхода Захмана было предложено в работах Е.Б. Зиндера [12]. Основная идея заключается в обеспечении возможностей отражения постоянного развития предприятия и его информационных систем как непрерывной последовательности трансформаций в жизненном цикле.

Вместо традиционной двумерной таблицы было предложено ввести трехмерную схему, добавив к плоским схемам ось стратегического времени. На этой оси располагаются отрезки времени осуществления различных проектов и стадий развития информационных систем и всего предприятия. На рис. 2 приведен пример трехмерной схемы.

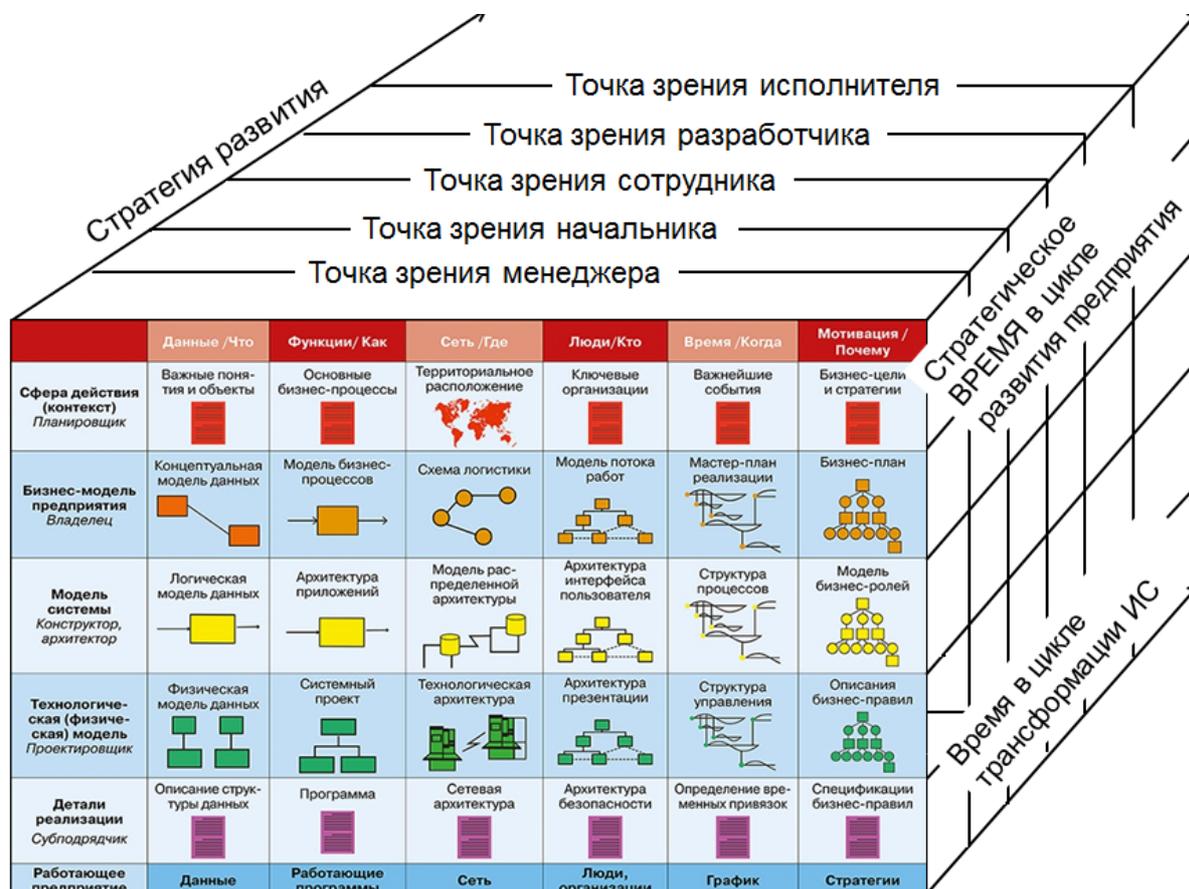


Рис. 2. Трехмерная схема архитектуры предприятия
Fig. 2. Three-dimensional diagram of the enterprise architecture

Таким образом, «объемная» схема АП или модель «4D-предприятие» строится в трёх измерениях с учётом временного пространства.

Пример формирования виртуальной метаструктуры цифрового проектного двойника КИС МП для образовательного процесса технического вуза

Вопросы взаимодействия вузов и производственных предприятий с использованием механизма базовых кафедр освещены в работах ряда авторов [13–16]. Ориентация программ базовых кафедр на использование передовых технологий конкретного предприятия приводит к актуальной задаче по организации инновационной обучающей площадки в виде цифрового двойника (ЦД) корпоративной информационной системы (КИС) предприятия в университете.

КИС предприятия (со своим внешним и внутренним содержанием) – это множество интегрированных между собой систем различных классов, предназначенных для применения в реализации решений. В этом смысле КИС воспринимается как инфраструктура архитектуры решений. Специалисты по информационным технологиям постоянно имеют дело с ее основными компонентами: приложениями (Application), данными (Data), технологиями (Technology) и другими архитектурными формами (безопасность (Security), тестированием (Testing)) при разработке информационных систем и обслуживания проектов.

В 1990-е годы появилась отдельная предметная область – *архитектура бизнеса*. Принято считать, что ее значимыми аспектами являются процесс (Process) и информация (Information),

организация (Organization) и производительность (Performance). Первые два классифицируют бизнес-процессы и опорные структуры, которые составляют бизнес-модель организации. Появление этой предметной области связано с желанием предприятий оптимизировать свои бизнес-процессы.

Институт разработки архитектуры предприятий (Institute for Enterprise Architecture Development, IFEAD) обобщает основные руководящие принципы дисциплины архитектуры предприятия [17]: «Нет стратегических прогнозов – нет архитектуры предприятия». Важный аспект этого утверждения заключается в том, что архитектура предприятия – это целостная дисциплина, которая объединяет элементы бизнеса и технологии, исходя из общего стратегического прогноза предприятия.

Если есть архитектура, то развитие ИТ на предприятии происходит не спонтанно (по мнению руководителей или по рекомендациям вендоров), а вся деятельность подчинена бизнесу и его стратегическим интересам. Драйвером проработки архитектуры могут служить такие решения, как радикальная модернизация, например, её перевод в «облако».

Когда приходит время выбрать методологию/инфраструктуру АП, большинство из доступных параметров принимают форму частично построенных «решений», которые могут быть адаптированы к потребностям конкретной организации.

В действительности большинство из них либо невозможно повторно использовать на практике, либо они требуют существенной адаптации. Кроме серьезной проблемы адаптации сложным является то, что мало количество имеющихся руководств, несмотря на высокий уровень понимания деталей, который требуется для их воплощения.

Большинство существующих инфраструктур либо расширяют другие архитектуры, либо повторяют их для конкретных задач. Например, инфраструктура EUP является расширением RUP, она имитирует его подход к описанию рабочих потоков процесса и деятельности, тогда как FEAF и Спивак (Spewak EA Planning Methodology) наследуют инфраструктуру Захмана.

TOGAF – это инфраструктура АП, которая появилась в последние два десятилетия, происходит от ранних, специализированных технических инфраструктур архитектуры предприятия, таких как Technical Architecture Framework for Information Management (TAFIM), и создана в соответствии с рекомендациями ANSI для архитектуры предприятий (IEEE 1471-2000). Главной целью TOGAF было создать стандарт разработки архитектуры предприятия. Сформулированная членами консорциума Open Group TOGAF не всегда воплощает целостную концепцию архитектуры предприятия. Сначала TOGAF включала только технические аспекты архитектуры (версии с 1-й по 7-ю), однако недавно в эту инфраструктуру была добавлена предметная область архитектуры бизнеса (версия 8, Enterprise Edition), в результате TOGAF быстро переместилась на передний план современных вариантов инфраструктур архитектуры предприятий.

Сегодня TOGAF – это высокоуровневый подход к проектированию, методологии описания архитектуры предприятия, предполагающий разработку, планирование, внедрение ИТ-архитектуры.

Основные термины в стандарте TOGAF приведены в стандарте ISO 42010 «Программная инженерия – Описание архитектуры». TOGAF рассматривает организацию как систему, является руководящей основой (Framework) для разработки и поддержания архитектуры. Согласно TOGAF архитектуру предприятия можно представить в виде 4 основных доменов:

- 1) бизнес-архитектура – определяет стратегию предприятия, структуру управления и ключевые бизнес-процессы;
- 2) архитектура данных – описывает логическую и физическую структуру данных организации, а также структуру корпоративных ресурсов для управления данными;
- 3) архитектура приложений – служит своеобразной картой всех корпоративных приложений и определяет, во-первых, участие каждого из приложений в бизнес-процессах компании и, во-вторых, взаимодействие приложений друг с другом и внешними сервисами;
- 4) технологическая архитектура (инфраструктура) – определяет структуру и логику программного обеспечения и аппаратной среды, необходимых для работы бизнес-приложений и доступа к нужным данным. Этот уровень включает всю ИТ-инфраструктуру (сети, сервера и т. д.).

На рис. 3 представлена архитектура компании на примере предприятия машиностроительной отрасли.

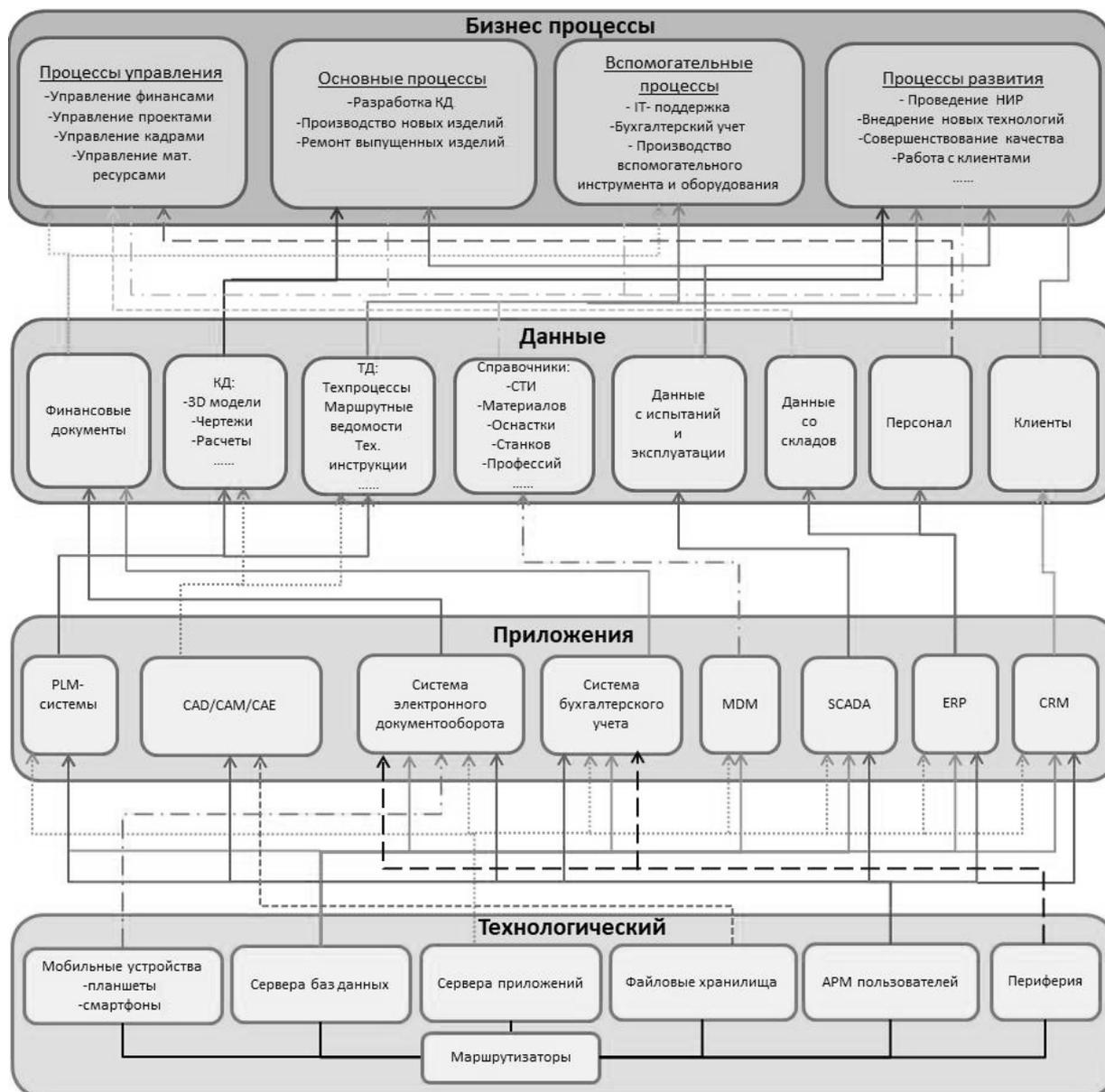


Рис. 3. Архитектура компании (на примере предприятия машиностроительной отрасли)
Fig. 3. The company architecture (on the example of an enterprise in the machine-building industry)

Цифровой (информационный) двойник КИС как адекватное отображение объектов и их связей в исследуемой предметно-ориентированной области в соответствии с принципом двойственности параллельно отображается структурой внешней среды и структурой внутреннего содержания.

С точки зрения внутреннего содержания с использованием цифровых двойников КИС в университете могут отрабатываться новые подходы к архитектуре предприятий и организации бизнес-процессов, которые затем будут внедрены. Цифровой двойник КИС становится «песочницей», содержащей конкретные технологии, в которой с привлечением научного потенциала появляются новые решения.

Создание архитектуры предприятия характеризуется цикличностью, итерации следует планировать в соответствии с крупными фазами в разработке бизнеса. Как известно [18], выделяют 4 категории процессов: основные, вспомогательные, управления, совершенствования. В этом смысле проявляется влияние внешней среды, формирующей требования к цифровому двойнику, порядок его создания и развития. Изначально построение ЦД КИС базируется на одном из основных бизнес-процессов.

Продemonстрируем влияние внешней среды на примере создания цифрового двойника КИС конструкторского бюро машиностроительной отрасли, где одним из основных процессов является разработка конструкторской документации. В этом случае на первой итерации при реализации цифрового двойника КИС должны быть реализованы приложения, технологические ресурсы, обеспечивающие данный бизнес-процесс (на рис. 4 область, выделенная пунктиром).

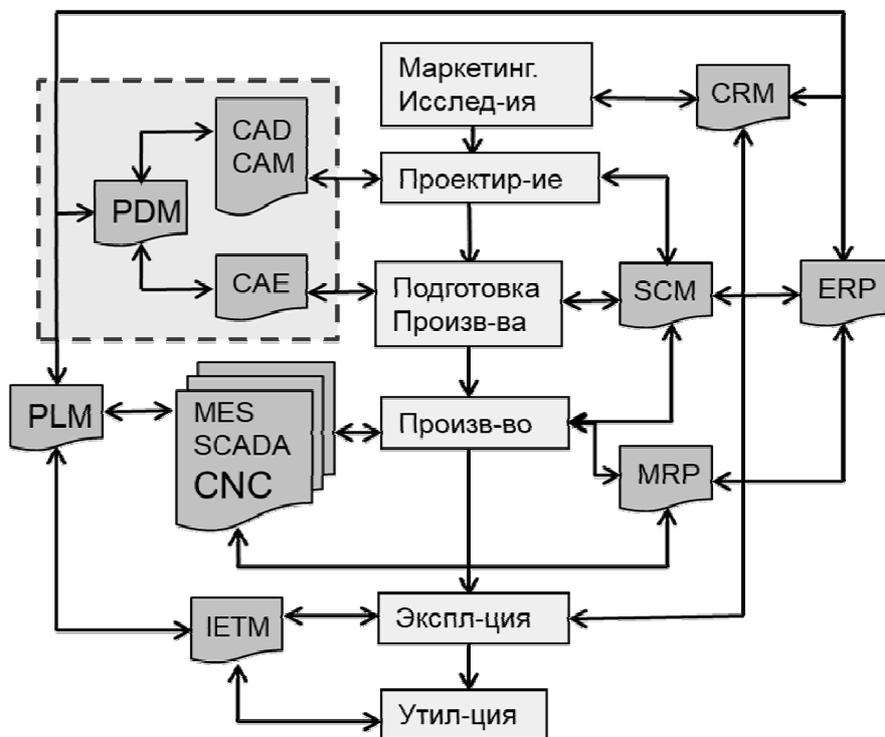


Рис. 4. Двойник отраслевой цифровой платформы
Fig. 4. The twin of an industry-specific digital platform

Дальнейшее масштабирование происходит в порядке проработки бизнес-процессов, указанном в [18]. Как видно из рис. 4, все стадии ЖЦ связаны PLM-системой. Расширение ее функциональных возможностей для процесса разработки конструкторской документации подробно рассмотрено в [19, 20].

В рамках национального проекта «Наука» в России появилось 10 научно-образовательных центров (НОЦ) мирового уровня. Их целью является рост науки, образования, технологий в социально-экономическое развитие региона и страны, выраженное в увеличении вклада участников Центра в достижение национальных целей развития РФ, определенных Указом Президента РФ № 474 от 21 июля 2020 г. В составе НОЦ объединяются усилия ведущих университетов, научных организаций, компаний реального сектора экономики для решения актуальных научно-технических задач.

Цифровая поддержка НОЦ может обеспечиваться взаимодействием информационных платформ, являющихся цифровыми двойниками КИС в IT-инфраструктуре университетов, информационных систем малых инновационных предприятий (ИС МИП), а также КИС научных организаций и организаций реального сектора экономики. Поскольку НОЦ организуются по региональному принципу, поддерживая, в первую очередь, «сильные предприятия» различных направлений и отраслей, то в опорных вузах может существовать ряд базовых кафедр одного индустриального партнера или нескольких (рис. 5), связанных со своим ЦД КИС каждая.

Организация работы над проектами в кооперации нескольких участников означает появление и накопление новых видов структурированной или неструктурированной информации, распределенной по многочисленным узлам вычислительной сети, что приводит к появлению задачи большой размерности. Наличие баз данных и баз знаний, а также инициация запросов к ним с использованием интерфейса указывает на необходимость разработки модели управления знаниями.

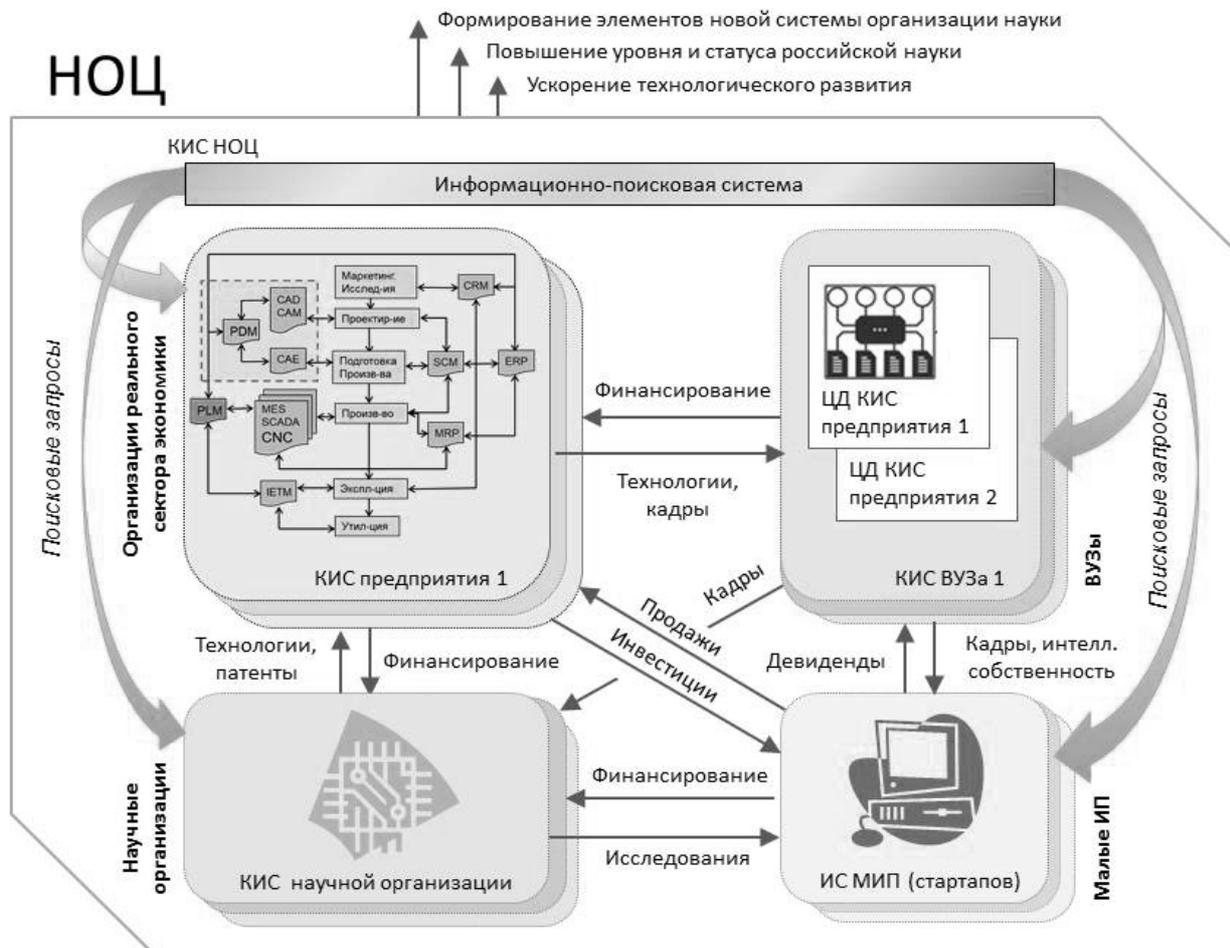


Рис. 5. Схема взаимодействия участников НОЦ
Fig. 5. The scheme of REC participants interaction

В качестве подхода в области управления и интеграции данных предлагается платформа поддержки пространств данных – DSSP (dataspace support platform) [21].

Использование систем поддержки информационных пространств позволяет обеспечить оперативный доступ к информации, находящейся в различных источниках с различными моделями данных и способами хранения.

Предложенная в работе [22, 23] модель аннотирования и идентификации может быть реализована с использованием информационно-поисковых систем. Поиск документов из коллекции, которые являются наиболее релевантными по отношению к произвольным информационным потребностям, сообщаемым системе при помощи однократных, инициированных пользователем запросов, продемонстрирован на примере кафедры университета.

Актуальность информационно-поисковой системы возрастает при коллективной работе в сложных структурах, одной из которых является НОЦ.

Выводы

1. Рассмотрен прикладной аспект создания и развития цифровых двойников КИС предприятий с учетом требований к архитектуре решений, архитектуре бизнеса и архитектуре предприятий (TOGAF).

2. Рассмотрены перспективы использования цифровых двойников КИС предприятий в составе университета для их эффективной интеграции в состав внешних структур.

3. Использование информационно-поисковых систем позволяет в автоматизированном режиме производить идентификацию объектов информационного пространства, выполнять их поиск и навигацию.

4. Предложена концептуальная модель для организации взаимодействия участников НОЦ, обеспечивающая формирование элементов новой системы организации науки, повышение уровня и статуса российской науки, ускорение технологического развития.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-37-90061.

Литература

1. Международная энциклопедия CALS. *Авиационно-космическое машиностроение* / под ред. А.Г. Братухина. – М.: ОАО «НИЦ АСК», 2015. – 608 с.
2. Фролов, Д. Обзор возможностей ANSYS Mechanical для решения инженерных задач // САПР и графика. – 2010. – № 11. – С. 46–49.
3. Решения Siemens PLM Software модернизируют производство российских авиадвигателей // САПР и графика. – 2010. – № 3. – С. 54–57.
4. Григорьев, А.А. Характеристика, структура, организация систем управления ERP, ERP II и ERP III / А.А. Григорьев, В.А. Титов // *Фундаментальные исследования*. – 2017. – № 2. – С. 48–51.
5. Кизина, И.Д. Математическое моделирование и прикладные информационные технологии для MES-уровня управления / И.Д. Кизина // *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности*. – 2008. – № 4. – С. 37–44.
6. Киселев, А.Г. Концепция структуры КИС промышленного предприятия (ERP&MES&SCADA+PDM) и проблема подготовки специалистов / А.Г. Киселев // *Инновации в условиях развития информационно-коммуникационных технологий*. – 2008. – № 1. – С. 220–223.
7. Хисамутдинов, М.Р. Аспекты интеграции ERP с информационными системами PLM и MES при импортозамещении ИТ продуктов / М.Р. Хисамутдинов // *Научно-технический вестник Поволжья*, 2015. – № 6. – С. 208–212.
8. *Cimatronit – компьютерное проектирование и производство* / Л.И. Зильбербург, С.М. Марьяновский, В.И. Молочник, Е.И. Яблочников. – СПб.: КИЦ «Мир», 1998. – 166 с.
9. Ризванов, К.А. Информационная система поддержки процессов испытаний ГТД на основе организационно-функциональной модели: автореф. дис. ... канд. техн. наук / К.А. Ризванов. – Уфа, 2008. – 16 с.
10. Sowa, J.F. *Extending and Formalizing the Framework for Information System Architecture* / J.F. Sowa, J.A. Zachman // *IBM Systems Journal*. – 1992. – Vol. 31, no. 3. – P. 17–25.
11. Harmon, P. *Software: System Architect 9.0* / P. Harmon // *Business Process Trends*. – 2002. – P. 1–8.
12. Зиндер, Е.З. «Информационно-технологическая модель прикладной» – модель трансформирующейся системы / Е.З. Зиндер // *Директор ИС*. – 2000. – № 4. – С. 12–15.
13. Куликов, Г.Г. Информационно-технологическая модель прикладной цифровой платформы базовой кафедры в наукоемких отраслях промышленности / Г.Г. Куликов, А.Ю. Сапожников, А.А. Кузнецов // *Управление экономикой: методы, модели, технологии: материалы XIX Междунар. науч. конф.* – Уфа: РИК УГАТУ, 2019. – С. 282–285.
14. Подход к применению концепции цифровых двойников для трансформации корпоративной информационной системы под требования INDUSTRY 4.0 (на примере создания единого информационного пространства «вуз – предприятие») / Г.Г. Куликов, А.Ю. Сапожников, А.А. Кузнецов и др. // *Вестник УГАТУ*. – 2019. – Т. 23, № 4 (86). – С. 154–160.
15. Радионов, А.А. Условия эффективности деятельности базовых кафедр вузов / А.А. Радионов, А.Д. Рулевский // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Образование. Педагогические науки»*. – 2016. – Т. 8, № 1. – С. 87–93. DOI: 10.14529/ped160112
16. Фахруллина, А.Р. Модели и методы проектирования программных систем для обработки разнородных данных (на примере программного обеспечения образовательно-производственной среды): автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.Р. Фахруллина. – Уфа, 2016 – 16 с.
17. Темненко, В. Быть или не быть TOGAF: распространение архитектуры предприятия за границы RUP / В. Темненко. – <http://ibm.com/developerworks/ru/library/r-temnenko> (дата обращения: 20.01.2021).

18. Рыбаков, М.Ю. Бизнес-процессы: как их описать, отладить и внедрить. Практикум / М.Ю. Рыбаков. – М.: Изд-во Михаила Рыбакова, 2016. – 392 с.

19. Разработка алгоритма экспертной системы для контроля КД в ЕИП предприятий машиностроения / А.Г. Лютов, В.А. Огородов, А.Ю. Сапожников, А.С. Маврина // Всероссийская научно-практическая конференция «Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста»: материалы. – Уфа: РИК УГАТУ, 2019. – С. 152–159.

20. Разработка технологии автоматизированного контроля КД с использованием PLM-системы / А.С. Маврина, Д.И. Загидуллин, В.А. Огородов, А.Ю. Сапожников // XIII Всероссийская молодёжная научная конференция «Мавлютовские чтения». – Уфа, 2019. – Т. 4, ч. 1. – С. 29–35.

21. Franclin, M. From databases to datespaces: a new abstraction or information monedement / M. Franclin, A. Halevy, D. Maier. – http://www.citforum.ru//databe/articles/from_ab_to_ds/ (дата обращения: 20.01.2021).

22. Бармин, А.А. Структурирование контента информационного пространства под решаемые в предметной области задачи / А.А. Бармин // Труды второй международной конференции «Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений», 18–21 мая 2014, Уфа, Россия. – Уфа, 2014. – С. 148–154.

23. Структурирование контента информационного пространства технического университета с использованием процессного подхода и семантической идентификации / С.Ф. Бабак, Г.Г. Куликов, А.А. Бармин, Г.В. Старцев // Вестник УГАТУ. – 2014. – Т. 18, № 4 (65). – С. 105–114.

Сапожников Алексей Юрьевич, канд. техн. наук, доцент кафедры ИТ в машиностроении, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; axl_mail_box@mail.ru.

Кузнецов Александр Андреевич, аспирант, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; kuznecovopkr@gmail.com.

Маврина Анна Сергеевна, аспирант, Уфимский государственный авиационный технический университет, г. Уфа; nytka_008@mail.ru.

Куликов Григорий Геннадьевич, технический директор, АО «Уфимское научно-производственное предприятие «Молния», г. Уфа; grisha@molniya-ufa.ru.

Поступила в редакцию 1 февраля 2021 г.

DOI: 10.14529/ctcr210201

AN APPROACH TO THE TRANSFORMATION OF A VIRTUAL METASTRUCTURE OF A DIGITAL DESIGN TWIN OF A MACHINE-BUILDING ENTERPRISE CORPORATE INFORMATION SYSTEM

A.Yu. Sapozhnikov¹, axl_mail_box@mail.ru,
A.A. Kuznetsov¹, kuznecovopkr@gmail.com,
A.S. Mavrina¹, nytka_008@mail.ru,
G.G. Kulikov², grisha@molniya-ufa.ru

¹ Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation,

² JSC “Ufa Scientific and Production Enterprise “Molniya”, Ufa, Russian Federation

Currently, the methodology of system engineering is being formed, the product of which is, as usual, the creation of real objects information models, supplemented by virtual components, and on the contrary, virtual objects, supplemented by real components. For example, an information model of a technological object is a specification of real equipment, supplemented by a specification of

the purchased equipment of a technological process and on the contrary. By analogy with general engineering in the field of technical activity, the metastructures of such information models must meet the V-shaped structure of the validation and verification processes. Therefore, models should be regularly checked during their life cycle to ensure that their structure and parameters correspond to real and virtual objects. At the present, there are conditions for a coordinated decision of technological objects system information modeling, taking into account their internal (physical) structure and of the digital environment the external structure. In general theoretical terms, the construction of system models is based on the problem of formal consistent description (grammatical calculus) of the structure and functional regularities of a set of objects and their connections in the subject area under study. The presented approach of the subject area system modeling under consideration is based on the classical model of a machine-building enterprise (MP) educational and production activities and a university. **Aim.** To apply the principles of the design approach for the formation of a corporate information system (CIS) engineering company metastructure digital twin, to explore the prospects of its application, to show the key information components in the management of subject-oriented knowledge and data, as well as the ability to scale technology in the formation of a digital environment for architecture and modern MP, improving the efficiency of business processes participants interaction. **Materials and methods.** The principles of the system engineering methodology (process approach, life cycle, etc.), an integrated approach and structural analysis of the design process according to the SADT (Structured Analysis and Design Technology) methodology, and the TOGAF (The Open Group Architecture Framework) methodology are used. **Results.** The proposed approach for system modeling the subject area is the development of works of the authors, demonstrates the possibility of scaling on the example of interaction of participants of the REC using part of the University's digital twin KIS enterprises of the real sector of the economy. The requisite of developing a knowledge management model and the increasing role of information search engines are shown. **Conclusion.** The proposed approach expands the application of the digital twin metastructure, allows correcting the enterprise architecture to improve the efficiency of business processes.

Keywords: architecture framework, TOGAF, system modeling of business processes, information platform, PLM-system, basic chair, information and search engine.

The reported study was funded by RFBR, project No. 20-37-90061.

References

1. Bratukhin A.G. (Ed.) *Mezhdunarodnaya entsiklopediya CALS* [International Encyclopedia of CALS. Aviation and space engineering]. Moscow, JSC "SIC ASK", 2015. 608 p.
2. Frolov D. [Review of the capabilities of ANSYS Mechanical for solving engineering problems]. *CAD and Graphics*, 2010, no. 11, pp. 46–49. (in Russ.)
3. [Siemens PLM Software solutions modernize the production of Russian aircraft engines]. *CAD and Graphics*, 2010, no. 3, pp. 54–57. (in Russ.)
4. Grigoriev A.A., Titov V.A. [Characteristic, structure, organization of ERP, ERPII and ERP III management systems]. *Fundamental Research*, 2017, no. 2, pp. 48–51. (in Russ.)
5. Kizina I.D. [Mathematical modeling and applied information technologies for MES-level management]. *Automation, telemechanization and communication in the oil industry*, 2008, no. 4, pp. 37–44. (in Russ.)
6. Kiselev A.G. [The concept of the structure of the CIS of an industrial enterprise (ERP&MES&SCADA+BPM) and the problem of training specialists]. *Innovations in the development of information and communication technologies*, 2008, no. 1, pp. 220–223. (in Russ.)
7. Khisamutdinov M.R. [Aspects of ERP integration with PLM and MES information systems at import substitution of IT products]. *Scientific and Technical Vestnik of the Volga Region*, 2015, no. 6, pp. 208–212. (in Russ.)
8. Zilberburg L.I., Maryanovsky S.M., Molochnik V.I., Yablochnikov E.I. *Cimatronit – komp'yuternoye proyektirovaniye i proizvodstvo* [Cimatronit – computer design and production]. St. Petersburg, KPC "Mir", 1998. 166 p.
9. Rizvanov K.A. *Informatsionnaya sistema podderzhki protsessov ispytaniy GTD na osnove organizatsionno-funktsional'noy modeli. Dis. kand. tekhn. nauk* [Information system for supporting the GTD test processes based on the organizational and functional model. Cand. sci. diss.]. Ufa, 2008. 16 p.

10. Sowa J.F., Zachman J.A. Extending and Formalizing the Framework for Information System Architecture. *IBM Systems Journal*, 1992, vol. 31, no. 3, pp. 17–25.
11. Harmon P. Software: System Architect 9.0. *Business Process Trends*, 2002, pp. 1–8.
12. Zinder E.Z. [“3D-enterprise” – a model of a transforming system]. *Director of IS*, 2000, no. 4, pp. 12–15. (in Russ.)
13. Kulikov G.G., Sapozhnikov A.Yu., Kuznetsov A.A. [Information technology model of the applied digital platform of the basic Department in science-intensive industries]. *Economic management: methods, models, technologies: materials of the XIX International scientific conference*. Ufa, RIK UGATU, 2019, pp. 282–285. (in Russ.)
14. Kulikov G.G., Sapozhnikov A.Yu., Kuznetsov A. A., Mavrina A. S., Zagidullin D. I. [Approach to the application of the concept of digital doubles for the transformation of the corporate information system under the requirements of INDUSTRY 4.0 (on the example of creating a single information space “university – enterprise”)]. *Vestnik USATU*, 2019, vol. 23, no. 4 (86), pp. 154–160. (in Russ.)
15. Radionov A.A., Rulevskiy A.D. Conditions of Effectiveness of University Basic Departments. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Education. Educational Sciences*. 2016, vol. 8, no. 1, pp. 87–93. (in Russ.) DOI: 10.14529/ped160112
16. Fakhruullina A.R. *Modeli i metody proyektirovaniya programmnykh sistem dlya obrabotki raznorodnykh dannykh (na primere programmnoho obespecheniya obrazovatel'no-proizvodstvennoy sredy)*. Dis. kand. tekhn. nauk [Models and methods of designing software systems for processing heterogeneous data (on the example of software for the educational and production environment). Cand. sci. diss.]. Ufa, 2016. 16 p.
17. Temnenko V. [To be or not to be TOGAF: Extending enterprise architecture beyond the boundaries of RUP]. Available at: <http://ibm.com/developerworks/ru/library/r-temnenko> (accessed 20.01.2021). (in Russ.)
18. Rybakov M.Yu. *Biznes-protsessy: kak ikh opisyat', otladit' i vnedrit'*. *Praktikum* [Business processes: how to describe them set them up and implement them]. Moscow, Mikhail Rybakov Publ., 2016. 392 p.
19. Lyutov A.G., Ogorodov V.A., Sapozhnikov A.Yu., Mavrina A.S. [Development of an algorithm of expert system for control of design documentation in uis of engineering enterprises]. *All-Russian Scientific and practical conference “Machine tool construction and innovative mechanical engineering. Problems and points of growth”*. Ufa, 2019, pp. 152–159. (in Russ.)
20. Mavrina A.S., Zagidullin D.I., Ogorodov V.A., Sapozhnikov A.Yu. [Development of the algorithm of the expert system for the control of the CD in the IIP of machine-building enterprises]. *XIII All-Russian Youth Scientific Conference “Mavlyutov readings”*. Ufa, 2019, vol. 4, part 1, pp. 29–35. (in Russ.)
21. Franclin M., Halevy A., Maier D. From databases to datespaces: a new abstraction for information monedement. Available at: http://www.citforum.ru/databe/articles/from_ab_to_ds/ (accessed 20.01.2021).
22. Barmin A.A. [Structuring the content of the information space for the tasks solved in the subject area]. Proceedings of the Second International Conference “Information Technologies of Intellectual Decision Support”, May 18–21, 2014, Ufa, Russia, pp. 148–154. (in Russ.)
23. Babak S.F., Kulikov G.G., Barmin A.A., Startsev G.V. [Structuring the content of the information space of the technical university using the process approach and semantic identification]. *Vestnik USATU*, 2014, vol. 18, no. 4 (65), pp. 105–114. (in Russ.)

Received 1 February 2021

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Подход к формированию виртуальной метаструктуры цифрового проектного двойника корпоративной информационной системы машиностроительного предприятия / А.Ю. Сапожников, А.А. Кузнецов, А.С. Маврина, Г.Г. Куликов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2021. – Т. 21, № 2. – С. 5–15. DOI: 10.14529/ctcr210201

FOR CITATION

Sapozhnikov A.Yu., Kuznetsov A.A., Mavrina A.S., Kulikov G.G. An Approach to the Transformation of a Virtual Metastructure of a Digital Design Twin of a Machine-building Enterprise Corporate Information System. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 5–15. (in Russ.) DOI: 10.14529/ctcr210201