

УДК 004.853

DOI 10.54708/2658-5014-SIIT-2024-no3-p83

EDN GQHPZ

## МОДЕЛИ МНОГОАГЕНТНОГО ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА КОРПОРАТИВНОЙ ПРИКЛАДНОЙ ИТ-ПЛАТФОРМЫ

А. А. Кузнецов • А. Ю. Сапожников

**Аннотация.** Представлен обзор результатов исследования процессов взаимодействия «вуз – корпорация» при выполнении актуальных задач отрасли с применением цифрового двойника корпоративной прикладной ИТ-платформы. Цель работы – повышение эффективности процессов комплексного территориально-распределенного взаимодействия предприятий и вузов за счёт применения цифрового двойника корпоративной прикладной ИТ-платформы в составе корпоративной информационной системы университета. Указанная цель достигается за счёт разработки: 1) функциональной модели организации и применения единого информационного пространства для комплексного территориально-распределенного взаимодействия вуза и производственного предприятия; 2) теоретико-множественной модели многоагентного ЦД корпоративной прикладной ИТ-платформы для сложных наукоёмких объектов; 3) метода создания и модернизации архитектуры ЦД КИС предприятия, реализующего согласованное развитие ЦД КИС и КИС предприятия; 4) архитектуры программного комплекса, реализующего методику управления знаниями на основе модельной гипотезы знаний. Поставленные задачи решались методами комплексного подхода и структурного анализа процесса проектирования по методологии Structured Analyze and Design Technology (SADT), функционального моделирования (в нотации IDEF0), информационного моделирования (в нотации IDEF1X), методологии TOGAF при разработке и изменении архитектуры ЦД корпоративной прикладной ИТ-платформы, методологии Business Process Model and Notation (BPMN) для моделирования бизнес-процессов образовательно-производственной среды при разработке новых изделий машиностроения, теории множеств и теории категорий.

**Ключевые слова:** цифровые двойники; ИТ-платформы; архитектура предприятия; методология TOGAF; корпоративные информационные системы; единое информационное пространство; теория категорий; теория множеств; система управления знаниями.

### ВВЕДЕНИЕ

Разработка высокотехнологичных изделий в области машиностроения осуществляется в условиях жесткой конкуренции на внутреннем и внешнем рынках. Создание отраслевых корпораций нацелено на консолидацию усилий отдельных предприятий. Как следствие, в отраслях промышленности взят курс на интеграцию и унификацию бизнес-процессов, организационных структур, технологий и используемых программных продуктов, что позволяет объединять географически удаленные конструкторские бюро, серийные заводы, технопарки, подрядчиков и другие предприятия, участвующие в реализации масштабных наукоёмких проектов на различных этапах жизненного цикла (ЖЦ). Реализация современных проектов, таких как разработка двигателей происходит в кооперации нескольких опытно-конструкторских бюро (ОКБ) и производственных площадок с применением предметно-ориентированных информационных систем различных классов, интегрированных в единое информационное пространство (ЕИП) [1, 2].

Отдельные проекты решает проблему объединения ЕИП по разным изделиям, интегрируя их в прикладную корпоративную ИТ-платформу.

В то же время производство инновационной конкурентоспособной продукции и обеспечение условий, необходимых для ее изготовления, требуют от отечественных предприятий перехода к комплексу технологий INDUSTRY 4.0. Их внедрение сопряжено с решением множества актуальных исследовательских задач. В условиях ограниченности ресурсов предприя-

тий требуется привлечение научно-исследовательского потенциала технических вузов при выполнении научно-исследовательских работ (НИР) и опытно-конструкторских работ (ОКР) в области создания инновационных технологий.

В настоящий момент существуют множество форм взаимодействия вузов и предприятий: научно-образовательные центры, технопарки, инжиниринговые центры, базовые кафедры, технополисы и др. Наибольшее распространение получили базовые кафедры, которые используются только как механизм подготовки специалистов без привлечения к решению актуальных отраслевых задач при взаимодействии вуза с предприятием [3, 4].

Организация данного взаимодействия требует применения цифровой платформы, обеспечивающей коллективную работу специалистов вуза и предприятия, управление и обмен информацией на всех этапах жизненного цикла изделия, внедрение современных технологий по направлениям INDUSTRY 4.0, а также непрерывность повышения интеллектуального капитала путем создания, накопления и применения знаний.

Такие платформы логично создавать с использованием опыта отраслевых корпораций, которые, с одной стороны, научились работать в ЕИП и управлять знаниями, с другой стороны, выступают поставщиками актуальных задач и потребителями результатов НИР и ОКР.

Таким образом, актуальной становится проблема создания цифрового двойника (ЦД) корпоративной прикладной IT-платформы в составе корпоративной информационной системы (КИС) университета с целью оптимизации процессов комплексного взаимодействия и управления знаниями предприятий и вузов для всех этапов ЖЦ изделия [5, 6].

### **АНАЛИЗ ИЗВЕСТНЫХ ПОДХОДОВ В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ ЦД**

Анализируются понятия ЦД, приводимые в различных источниках, принято определение из Предварительного национального стандарта, где ЦД определяется как «программно-аппаратный комплекс, реализующий комплексную динамическую модель для исследования и управления деятельностью социотехнической системы». Отмечается, что в научной литературе недостаточное внимание уделено проблеме создания цифровых двойников системы, в качестве которой выступает корпоративная прикладная IT-платформа.

Проанализированы различные подходы для построения и описания архитектуры ЦД, входящего в состав архитектуры предприятия. По результатам анализа была выбрана методология TOGAF, которая широко и эффективно применяется для обеспечения подхода к проектированию, планированию, внедрению и управлению архитектурой IT.

Также проведен сравнительный анализ подходов и методов в области управления предметно-ориентированными знаниями. Анализ показал, что использование свободно распространяемого ПО MediaWiki является оптимальным при построении СУЗ для обеспечения процессов накопления, использования и обмена знаниями при выполнении распределенных проектов, НИР и ОКР.

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВУЗА И ПРЕДПРИЯТИЯ**

Анализ функциональной модели, традиционного процесса взаимодействия вуза и предприятия при выполнении совместных работ, позволил выявить резервы по повышению его эффективности, а также необходимость его реинжиниринга в организационном и информационно-коммуникационном аспектах [7].

Разработана функциональная модель организации и использования ЕИП в процессах комплексного территориально-распределенного взаимодействия вуза и предприятия (рис. 1), использующая механизм базовой кафедры.

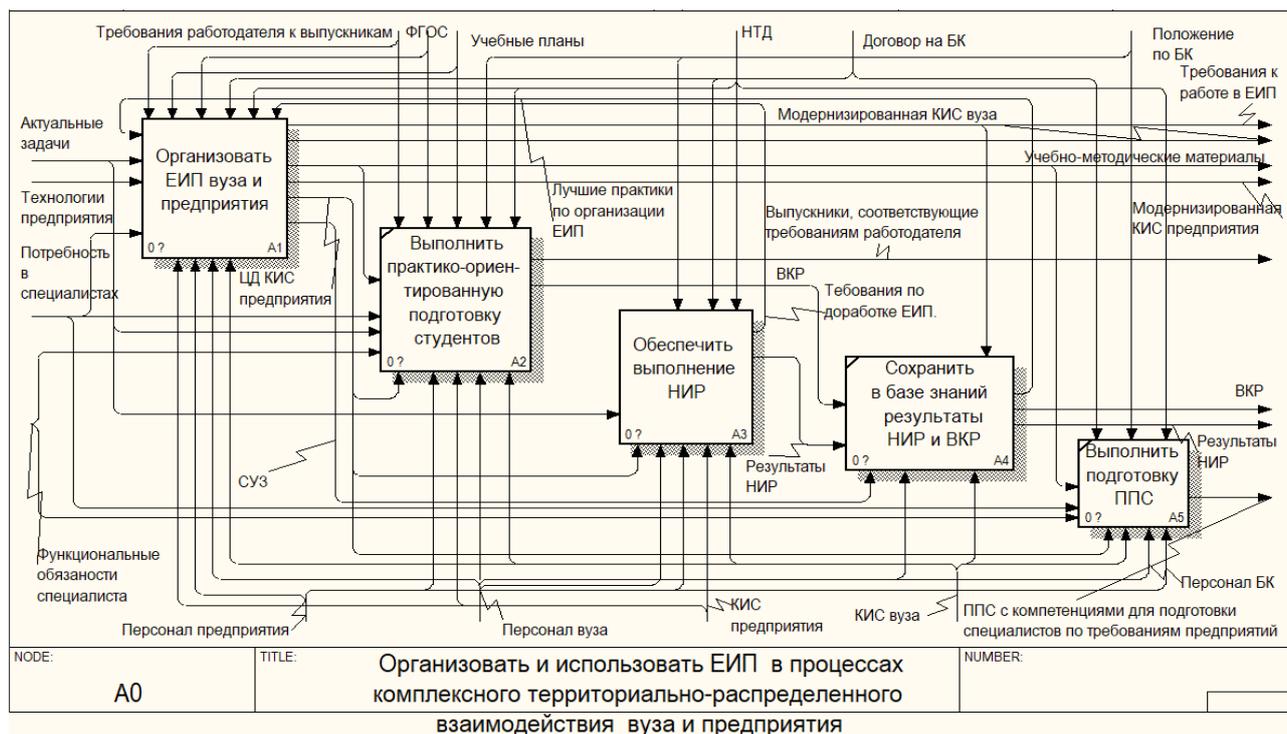


Рис. 1 Фрагмент разработанной функциональной модели.

Разработанная модель формализует процесс построения ЦД КИС и области его применения в рамках организации и использования ЕИП. ЦД КИС является ключевым элементом при комплексном территориально-распределенном взаимодействии вуза и предприятия и обеспечивает:

- устранение информационно-коммуникационных барьеров при решении актуальных производственных задач;
- трансфер технологий из производственной среды в научно-образовательную среду;
- выполнение практико-ориентированной подготовки студентов и получение ими необходимых производственных компетенций.

Важным элементом ЕИП является СУЗ, которая обеспечивает накопление знаний и лучших практик, выработанных предприятием и вузом при выполнении совместных проектов. ЦД, по принципу обратной связи, реализует трансфер данных практик из научно-образовательной в производственную среду, что обеспечивает устойчивое развитие ИТ-инфраструктуры отраслевых корпораций [8–10].

### МОДЕЛЬ И АРХИТЕКТУРА ЦД КОРПОРАТИВНОЙ ПРИКЛАДНОЙ ИТ-ПЛАТФОРМЫ

Корпоративная прикладная ИТ-платформа представляет собой интегрированные информационные системы (ИС) различных классов, охватывающие все этапы ЖЦ продукции в различных аспектах, обеспечивающие информационное взаимодействие большого количества участников рынка и выполняющие функцию консолидации данных. При этом в отраслевых корпорациях разрабатываются и внедряются единые стандарты, методы и методики при работе с цифровой платформой, распространяемые на все дочерние общества (ДО).

Тогда можно записать формулу ЦД корпоративной прикладной ИТ-платформы в следующем виде:

$$ЦД = ЦП \times ЖЦ \times ТК,$$

где ЦП – множество программных средств, реализующих корпоративную прикладную ИТ-платформу; ТК – множество технологий, методов и методик, применяемых в корпорации

при работе с IT-платформой; ЖЦ – стадии жизненного цикла изделия, автоматизированные с применением IT-платформы.

В конкретных ДО применяются различные компоненты (классы ИС и технологии) корпоративной прикладной IT-платформы в зависимости от этапов ЖЦ изделия и бизнес-процессов, реализуемых в ДО. Данные компоненты представлены в виде КИС предприятия.

Из этого следует, что:

$$КИС \subset ЦП; ТП \subset ТК; ЖЦП \subset ЖЦ,$$

где КИС – множество интегрированных ИС различного класса и аппаратных средств, реализованных на конкретном предприятии; ТП – множество технологий, методов и методик, применяемых на предприятии при работе с КИС; ЖЦП – бизнес-процессы ЖЦ изделия на предприятии, для которых выполнена автоматизация в КИС.

Отмечено, что построение ЦД корпоративной прикладной IT-платформы является итерационным процессом, при этом сформулировано необходимое и достаточное условие существования ЦД корпоративной прикладной IT-платформы:

$$ЦД_{\min} = \{ИС_i, ТП_j, ЖЦП_l\},$$

где  $ИС_i \in КИС, i = 1, \dots, k$  – конечное число информационных систем, входящих в КИС предприятия;  $ТП_j \in ТП, j = 1, \dots, t$  – конечное число технологий, методов и методик, применяемых на предприятии при работе с ИС;  $ЖЦП_l \in ЖЦП, l = 1, \dots, n$  – конечное число бизнес-процессов жизненного цикла изделия, для которых выполнена автоматизация в ИС.

При этом можно говорить, что данный ЦД будет являться ЦД элемента КИС определенного предприятия. По мере увеличения областей, в которых реализуются совместные проекты между предприятием и вузом, данный ЦД будет пополняться новым программным обеспечением, технологиями и бизнес-процессами и расширяться до ЦД КИС предприятия. Когда вуз начнет взаимодействовать с различными ДО цифровой двойник КИС превратится в ЦД корпоративной прикладной IT-платформы. Стоит отметить, что ЦД КИС предприятия полного жизненного цикла соответствует ЦД корпоративной прикладной IT-платформы.

Была предложена системная метамодель цифрового двойника (СММЦД) корпоративной прикладной IT-платформы, обеспечивающей работу с несколькими предприятиями [11]:

$$СММЦД = \langle \{ИС_i, ТП_j, ЖЦП_l\}, МО, МП, МБП \rangle,$$

где МО – множество отношений между объектами, входящих в ЦД, а также отношений ЦД с внешними объектами; МП – множество предикатов и операций, определённых в СММЦД; МБП – множество бизнес-процессов, реализуемых над объектами в СММЦД.

ЦД КИС реализуется в вузе как предметно-ориентированное, слабоструктурированное информационное пространство, отвечающее теории множеств, обеспечивающее поддержку жизненного цикла выпускаемой продукции с использованием различных классов информационных систем, получивших распространение в отраслевой корпорации (рис. 2) [12].

Данный двойник будет многоагентным, подчиняется принципу дуальности, отражает формализованное представление реальных и виртуальных объектов и связей образовательной и производственной среды. В качестве агентов выступают производственные коллективы предприятия и научно-образовательные коллективы вузов.

Для данного вида ЦД разработан метод создания и модернизации архитектуры ЦД на основе методологии TOGAF и с применением теории категорий. Согласно предложенному методу, текущее и целевое состояние архитектуры ЦД (в рамках архитектуры предприятия) описывается в четырех доменах: бизнеса, данных, приложений и технологий. Все объекты архитектуры делятся на данные домены, после чего устанавливаются связи между ними [13].

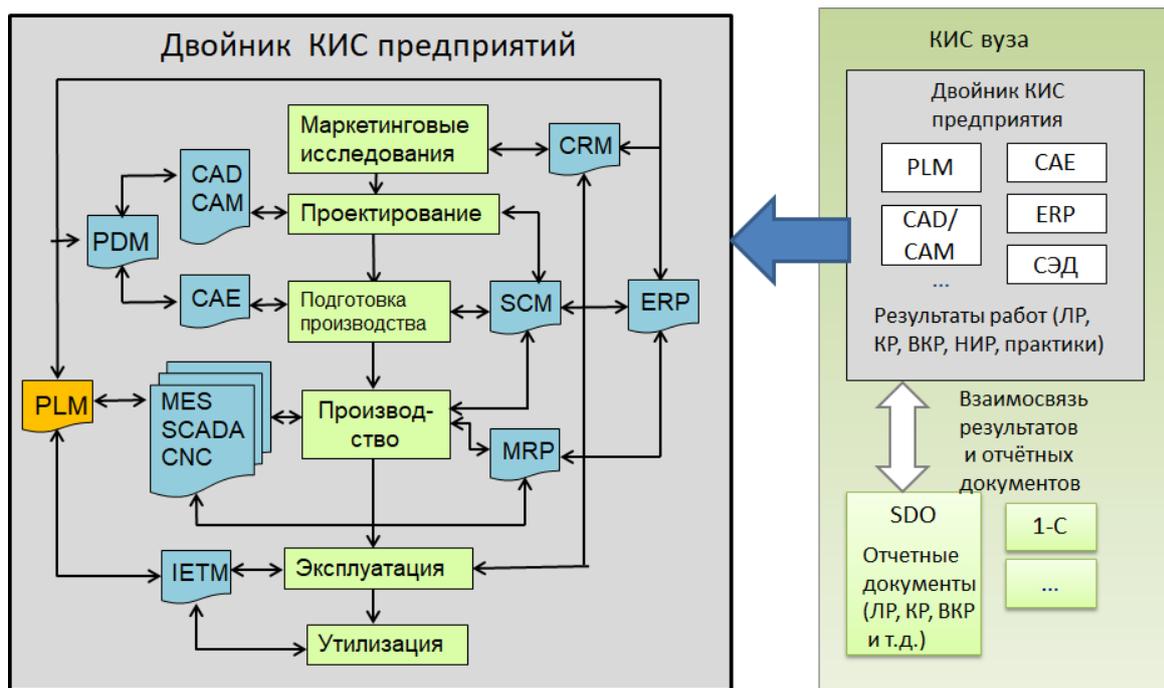


Рис. 2 Структура ЦД КИС предприятия в составе вуза.

Введем обозначения:  $bp_b \in BP, b = 1, \dots, p$  – конечное число состояний домена бизнес-процессов;  $BP$  – множество возможных состояний домена бизнес-процессов;  $wbp_b$  – процесс трансформации домена бизнес-процессов из текущего в целевое состояние;  $WBP$  – множество процессов перехода домена бизнес-процессов из текущего в целевое состояние.

Таким образом, процесс перехода домена бизнес-процессов из текущего в целевое состояние может быть представлен функцией  $FBP$  отображения  $BP \times WBP \rightarrow BP$

$$FBP: BP \times WBP \rightarrow BP,$$

таким образом,  $fbp(bp_b, wbp_b)$  будет отождествлять целевое состояние домена бизнес-процессов после выполнения процесса перехода  $wbp_b$  и может быть представлено формулой

$$bp_{b+1} = fbp(bp_b, wbp_b), b = 1, \dots, p.$$

Таким образом, получаем рекуррентную формулу и множество состояний домена бизнес-процессов, которое образует класс объектов, для каждой пары объектов которого  $bp_b$  и  $bp_m$  задано множество морфизмов  $Hom(bp_b, bp_m)$ . Для каждой пары таких морфизмов, например  $g_{bp} \in Hom(bp_b, bp_m)$  и  $f_{bp} \in Hom(bp_m, bp_n)$ , определена их композиция

$$g_{bp} \circ f_{bp} \in Hom(bp_b, bp_n).$$

Учитывая приведенные выше формулы, можно сделать вывод, что состояния домена бизнес-процессов образуют категорию множеств.

Каждое из множеств состояний доменов приложений, данных, технологий, междоменных связей и связей внутри доменов подчиняются правилам, приведенным для категории множеств состояний домена бизнес-процессов, и являются самостоятельными категориями.

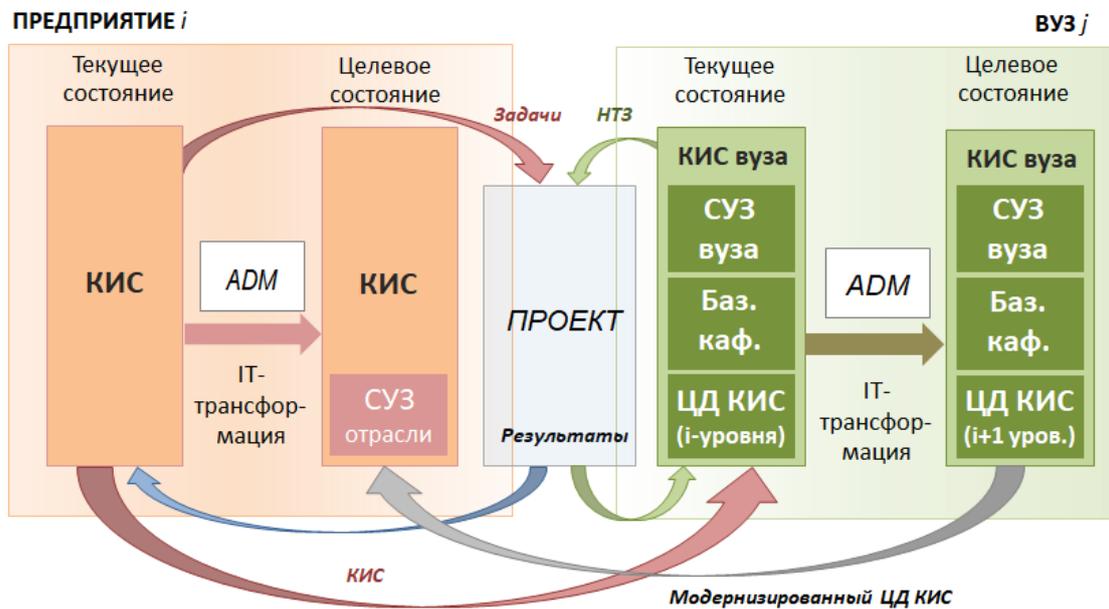
Кроме того, они могут быть объединены в категорию более высокого уровня. В качестве такой категории выступает категория множеств состояний архитектур предприятия:

$$\left. \begin{array}{l} FD: D \times WD \rightarrow D \\ FP: P \times WP \rightarrow P \\ FT: T \times WT \rightarrow T \\ FMS: MS \times WMS \rightarrow MS \\ FVS: VS \times WVS \rightarrow VS \end{array} \right\} \Rightarrow FAP: AP \times ADM \rightarrow AP,$$

где  $D$  – множество возможных состояний домена данных;  $WD$  – множество процессов перехода домена данных из текущего состояния в целевое;  $FD$  – функция отображения текущего состояния домена данных в целевое состояние;  $P$  – множество возможных состояний домена приложений;  $WP$  – множество процессов перехода домена приложений из текущего состояния в целевое;  $FP$  – функция отображения текущего состояния домена приложений в целевое состояние;  $T$  – множество возможных состояний технологического домена;  $WT$  – множество процессов перехода технологического домена из текущего состояния в целевое;  $FT$  – функция отображения текущего состояния технологического домена в целевое состояние;  $MS$  – множество возможных состояний междоменных связей;  $WMS$  – множество процессов перехода междоменных связей из текущего в целевое состояние архитектуры;  $FMS$  – функция отображения текущего состояния междоменных связей в целевое состояние;  $VS$  – множество возможных состояний связей внутри доменов;  $WVS$  – множество процессов перехода связей внутри доменов из текущего в целевое состояние архитектуры;  $FVS$  – функция отображения текущего состояния связей внутри доменов в целевое состояние,  $AP$  – множество состояний архитектуры предприятия;  $ADM$  – множество процессов, реализующихся в рамках ADM метода при переходе архитектуры предприятия из текущего состояния в целевое,  $FAP$  – функция отображения текущего состояния архитектуры предприятия в целевое.

При этом применение ADM затрагивает не только ЦД КИС, а также компоненты КИС вуза, с которыми интегрирован и взаимосвязан ЦД.

На рис. 3 приведена мнемосхема цифровой трансформации производственного предприятия и вуза на основе методологии TOGAF с применением ЦД КИС при реализации совместных проектов с привлечением НТЗ вуза [14].



**Рис. 3** Мнемосхема цифровой трансформации КИС вуза и предприятия с использованием ЦД КИС.

Установлены следующие особенности.

Для предприятия выполнение проектов [15, 16]:

- приближает текущее состояние предприятия к целевому;
- обеспечивает появление новых знаний, полученных как в виде результатов проекта, так и в виде НТЗ вуза;
- модернизация ЦД КИС в университете формирует облик КИС в целевом состоянии предприятия.

Для вуза выполнение проектов:

- требует наличия ЦД КИС в составе университета, является необходимым условием для работы базовых кафедр;
- инициирует модернизацию ЦД КИС, и как следствие, оказывает влияние на IT-трансформацию университета;
- обеспечивает накопление знаний в университете.

Таким образом, применение ЦД КИС в вуз при решении задач по разработке сложных наукоёмких объектов способствует цифровой трансформации и внедрению технологий INDUSTRY 4.0 с использованием научно-технического задела вуза, обеспечивает развитие реальных секторов экономики и накопления научного потенциала.

Приведем описание примера ЦД КИС промышленного предприятия, реализованного в составе КИС УГАТУ (ныне УУНиТ). Для первых итераций построения ЦД КИС выбраны процессы выполнения НИР и ОКР, а также подготовки специалистов по требованиям промышленного предприятия. Построение ЦД КИС осуществлялось сотрудниками БК «ИТ в машиностроении» при промышленном предприятии.

Среди достигнутых результатов можно отметить:

разработано программных модулей .....	9
выполнено проектов и задач .....	14
подготовлено групп студентов .....	28
разработано программ ДПО .....	8
выполнено ВКР .....	9
опубликовано статей .....	17
поддержка грантами .....	1

#### **АРХИТЕКТУРА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ, РЕАЛИЗУЮЩЕГО МЕТОДИКУ НАКОПЛЕНИЯ, ПРОВЕРКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФОРМАЛИЗОВАННЫХ ЗНАНИЙ**

Использование ЦД при решении предприятием и вузом совместных задач устанавливает ряд требований:

- наличие специалистов по работе в ЦД КИС, владеющих технологиями предприятия;
- разработка механизмов выявления неявных знаний;
- повышение информативности документов (использование форматов видео, интерактивных руководств и т. п.);
- сокращение времени изменения документации.

В рамках реинжиниринга процесса сопровождения ЦД КИС предлагается отказаться от разработки и согласования текстовых документов в пользу электронных статей в СУЗ, содержащих материалы различных форматов.

При этом появление новых знаний имеет место не только в процессе технической поддержки, но и в любой сфере деятельности, таким образом, в перспективе СУЗ должна охватывать все бизнес-процессы. Как следствие, в каждом бизнес-процессе с применением функционального моделирования необходимо провести реинжиниринг для выявления и накопления знаний.

В результате для каждого бизнес-процесса добавляется функция выявления и формализации новых знаний, выходные потоки которой в дальнейшем могут быть преобразованы в статьи СУЗ [17].

Для формализации и верификации материалов, используемых при пополнении СУЗ, был разработан алгоритм экспертизы формализованных знаний (рис. 4). Особенностью алгоритма является назначение электронным материалом ключевых слов из существующего списка, который формируется как глоссарий в функциональной модели. При согласовании статьи происходит автоматический выбор экспертов, связанных с ключевыми словами статьи. Профили экспертов в СУЗ заполняются на основании специализации и участия в различных проектах.

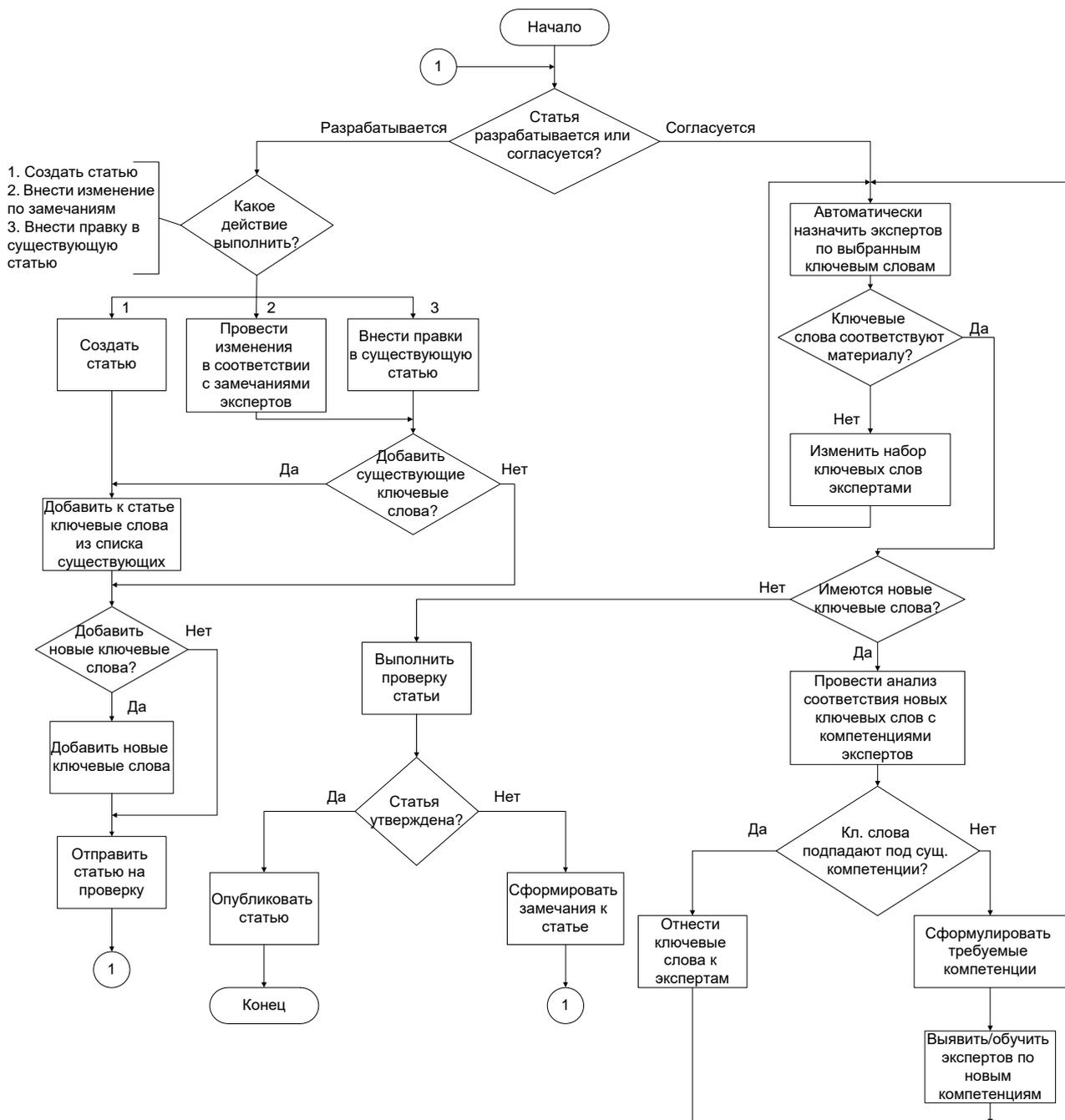


Рис. 4 Алгоритм экспертизы формализованных знаний.

Новые ключевые слова используются для корректировки разработанных функциональной и информационной моделей и вносятся в глоссарий.

Таким образом, представленная методика накопления и управления знаниями является универсальной и может быть использована в других направлениях деятельности вуза, не связанных с использованием ЦД.

Архитектура программного обеспечения обеспечивает реализацию методики накопления, проверки и использования формализованных знаний (рис. 5) [18].

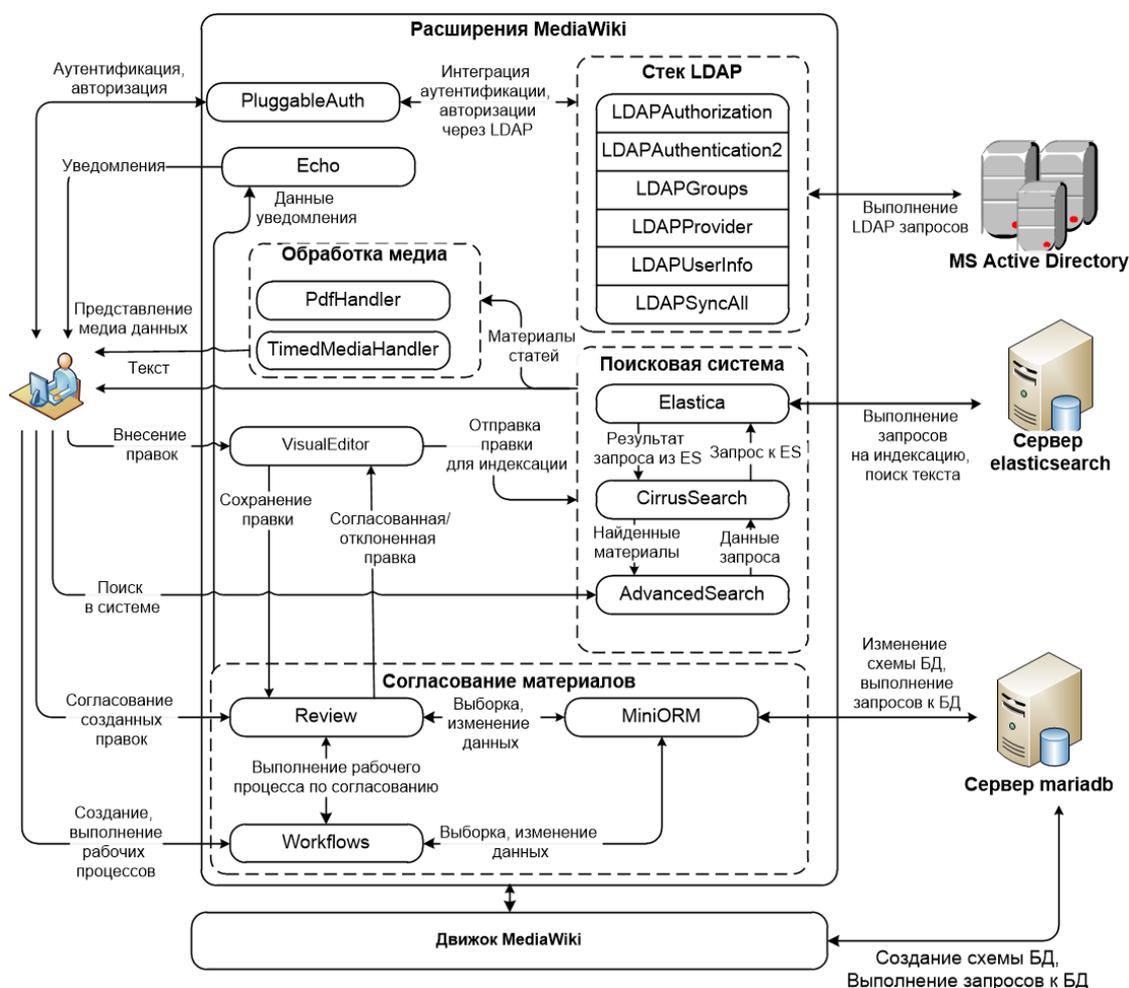


Рис. 6 Архитектура программного комплекса управления знаниями.

В качестве «ядра» для построения СУЗ было выбрано свободно распространяемое ПО MediaWiki.

В соответствии с архитектурой был разработан модуль исполнения рабочих процессов «WorkFlow», который позволяет модифицировать алгоритм экспертизы формализованных знаний для любой предметной области.

Также в данном исследовании выполнен анализ эффективности использования разработанного программного комплекса для процессов технической поддержки пользователей ЦД корпоративной прикладной IT-платформы и изменения документации. Анализ проводился с использованием динамических моделей.

На основе 1000 итераций имитации было выявлено, что время выполнения технической поддержки сократится в 2.5 раза, при актуализации информации – в 1.7 раза.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана функциональная модель организации и применения ЕИП, отличительной особенностью которой является использование ЦД КИС и СУЗ при комплексном территориально-распределенном взаимодействии вуза и предприятия. Модель *позволяет* устранить информационно-коммуникационные барьеры при решении актуальных производственных задач и при выполнении практико-ориентированной подготовки студентов. Наличие обратных связей в процессах организации и применения ЕИП обеспечивает устойчивость и управляемость данных процессов.

2. Разработана теоретико-множественная модель многоагентного ЦД корпоративной прикладной IT-платформы, отличающаяся тем, что сформулировано необходимое и достаточное

условие его существования, определено применение ЦД в процессе взаимодействия вуза и предприятия, что позволило использовать ЦД для решения сложных наукоёмких задач, в том числе с применением технологий INDUSTRY 4.0.

3. Разработан метод создания и модернизации архитектуры ЦД КИС предприятия, отличающийся тем, что основан на методологии TOGAF и положениях теории категорий. Метод позволяет формировать комплексное описание архитектуры ЦД КИС в текущем и целевом состояниях и обеспечивает согласованное развитие архитектур ЦД КИС и КИС предприятия.

4. Разработана архитектура программного комплекса управления знаниями, отличающаяся тем, что содержит программные модули для конструирования и создания рабочих процессов, что позволяет реализовать предложенную методику управления знаниями с учетом изменения бизнес-процессов.

Выполнена апробация разработанных моделей и предложенного метода создания и модернизации архитектуры ЦД КИС в рамках комплексного распределенного взаимодействия вуза и предприятия. Эффективность разработанных моделей и метода подтверждается объемом работ по решению актуальных задач двигателестроительной отрасли, решению образовательных задач, а также НИР, выполненных на ЦД.

Анализ эффективности использования СУЗ предложенной архитектуры проводился в рамках процесса использования ЦД КИС с применением динамических BPMN-моделей. Анализ показал, что предложенное решение по управлению знаниями снижает временные затраты при оказании технической поддержки пользователей в 2.5 раза, а при актуализации информации – в 1.7 раза по сравнению с традиционными способами.

В рамках дальнейших исследований планируется применение технологий машинного обучения в СУЗ для ее трансформации в экспертную систему.

#### БЛАГОДАРНОСТИ И ПОДДЕРЖКА

Авторы посвящают эту работу светлой памяти научного руководителя заслуженного деятеля науки Российской Федерации, доктора технических наук, профессора Геннадия Григорьевича Куликова (1948–2024). Выражаем признательность коллегам – сотрудникам кафедры автоматизированных систем управления, другим исследователям, чьи труды оказали влияние на настоящую работу.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Маврина А. С., Кузнецов А. А., Маврина, А. С. Пример внедрения PLM-системы на ПАО «ОДК-УМПО» в рамках взаимодействия по проекту ПД-14 // Информационные технологии интеллектуальной поддержки принятия решений (ITIDS'2018): Труды VI Всероссийской конференции, Уфа–Ставрополь, 28–31 мая 2018 г. Т. 3. С. 68-71. EDN YMEHPV. [[Mavrina A. S., Kuznetsov A. A. Mavrina, A. S. "Example of implementation of a PLM system at PJSC "UEC-UMPO" as part of interaction on the PD-14 project" // Information technologies for intelligent decision support (ITIDS'2018) : Proc. VI All-Russian Conf., Ufa-Stavropol, May 28–31, 2018. Vol. 3, pp. 68-71. EDN YMEHPV. (In Russian).]]
2. Kuznetsov A. A., Mavrina A. S., Sapozhnikov A. Yu. Example of PLM-system adoption at PJSC «UEC-UMPO» In the network of interaction on the project PD-14 // International Scientific Journal «Industry 4.0». 2018. Vol. 3. Issue 5. Pp. 259-261.
3. Гидинда Г. М., Кромина А. М., Антонов В. В. Реинжиниринг инфраструктуры организации на примере кафедры университета // СИИТ. 2024. Т. 6. № 2(17). С. 3-10. EDN MIPNBO. [[Gidinda G. M., Kromina A. M., Antonov V. V. "Reengineering of an organization's infrastructure using the example of a university department" // SIIT. 2024. T. 6, No. 2(17). pp. 3–10. EDN MIPNBO. (In Russian).]]
4. Ковтуненко А. В., Ковтуненко А. С. Управление реализацией индивидуальных образовательных траекторий в высшей школе на основе онтологической модели данных // СИИТ. 2023. Т. 5. № 6(15). С. 17-23. EDN OEMVIT. [[Kovtunenکو A.V., Kovtunenکو A.S. "Management of the implementation of individual educational trajectories in higher education based on an ontological data model" // SIIT. 2023. V. 5, No. 6(15), pp. 17-23. EDN OEMVIT. (In Russian).]]
5. Воробьев А. В. Методологические основы обработки пространственной информации для поддержки принятия решений на основе агрегированных цифровых двойников (на примере высокоширотных геомагнитных данных) // СИИТ. 2023. Т. 5. № 4(13). С. 3-27. EDN LLACNX. [[Vorobyov A.V. "Methodological foundations for processing spatial information to support decision-making based on aggregated digital twins (using the example of high-latitude geomagnetic data)" // SIIT. 2023. V. 5, No. 4(13), pp. 3-27. EDN LLACNX. (In Russian).]]

6. Моисеева Т. В. Методологические основы поддержки принятия решений по управлению инновационным развитием социотехнических объектов на основе интересубъективного подхода // СИИТ. 2023. Т. 5. № 2(11). С. 66-95. EDN CNPZYU. [[Moiseeva T.V. "Methodological foundations for supporting decision-making in the management of innovative development of socio-technical objects based on an intersubjective approach" // SIIT. 2023. V. 5, No. 2(11), pp. 66-95. EDN CNPZYU. (In Russian).]]
7. Куликов Г. Г., Сапожников А. Ю., Кузнецов А. А., Маврина А. С., Загидуллин Д. И. Подход к применению концепции цифровых двойников для трансформации корпоративной информационной системы под требования INDUSTRY 4.0 (на примере создания единого информационного пространства «вуз – предприятие») // Вестник УГАТУ. 2019. Т. 23. № 4(86). С. 154-160. EDN YNAIS. [[Kulikov G. G., Sapozhnikov A. Yu., Kuznetsov A. A., Mavrina A. S., Zagidullin D. I. "Approach to using the concept of digital twins for transforming a corporate information system to meet the requirements of INDUSTRY 4.0" // Vestnik UGATU. 2019. V. 23, No. 4(86), pp. 154-160. EDN YNAIS. (In Russian).]]
8. Кромина Л. А. Автоматизированная поддержка принятия решений при заказе литературы библиотекой вуза на основе ранжирования потребности изданий // СИИТ. 2023. Т. 5. № 5(14). С. 25-38. EDN KJFSBX. [[Kromina L. A. "Automated support for decision-making when ordering literature by a university library based on ranking the needs of publications" // SIIT. 2023. V. 5, No. 5(14), pp. 25-38. EDN KJFSBX. (In Russian).]]
9. Ковтуненко А. В., Ковтуненко А. С. Метод формирования наилучшего плана фиксации учебных достижений обучающегося на основе генетического алгоритма // СИИТ. 2023. Т. 5. № 1(10). С. 48-55. EDN NVKYDH. [[Kovtuneneko A. V., Kovtuneneko A. S. "Method of forming the best plan for recording a student's educational achievements based on a genetic algorithm" // SIIT. 2023. V. 5, No. 1(10), pp. 48-55. EDN NVKYDH. (In Russian).]]
10. Климова А. В., Ковтуненко А. С., Парфенов Д. В. Формирование учебного плана с использованием технологии RDF-хранилищ // СИИТ. 2022. Т. 4. № 2(9). С. 49-55. EDN QMYQDT. [[Klimova A.V., Kovtuneneko A.S., Parfenov D.V. "Formation of a curriculum using RDF storage technology" // SIIT. 2022. V. 4, No. 2(9), pp. 49-55. EDN QMYQDT. (In Russian).]]
11. Кузнецов А. А. Системная метамодель многоагентного цифрового двойника предметно-ориентированной IT-платформы МП-ВУЗ // Вестник УАТУ. 2023. Т. 27. № 2(100). С. 131-138. EDN RTPKRI. [[Kuznetsov A. A. "System metamodel of a multi-agent digital twin of a subject-oriented IT platform MP-VUZ" // Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University. 2023. V. 27, No. 2(100), pp. 131-138. EDN RTPKRI. (In Russian).]]
12. Куликов Г. Г., Сапожников А. Ю., Кузнецов А. А. Информационно-технологическая модель прикладной цифровой платформы базовой кафедры в наукоемких отраслях промышленности // Управление экономикой: методы, модели, технологии: Мат-лы XIX Международной научной конференции, Уфа – Павловка, 09-10 октября 2019. С. 282-285. EDN VFFIEL. [[Kulikov G. G., Sapozhnikov A. Yu., Kuznetsov A. A. "Information and technological model of the applied digital platform of the basic department in knowledge-intensive industries" // Economic Management: methods, models, technologies: materials of the 19th International Scientific Conference, Ufa – Pavlovka, October 09-10, 2019. Ufa, 2019, pp. 282-285. EDN VFFIEL. (In Russian).]]
13. Куликов Г. Г., Сапожников А. Ю., Кузнецов А. А., Маврина А. С. Архитектура структуры цифрового двойника интегрированной IT-платформы для распределенного, многовариантного проектирования объектов машиностроения // Вестник УГАТУ. 2021. Т. 25. № 2(92). С. 86-92. EDN XKNLZ. [[Kulikov G. G., Sapozhnikov A. Yu., Kuznetsov A. A., Mavrina A. S. "Architecture of the digital twin structure of an integrated IT platform for distributed, multivariate design of mechanical engineering objects" // Vestnik UGATU. 2021. V. 25, No. 2(92), pp. 86-92. EDN XKNLZ. (In Russian).]]
14. Сапожников А. Ю., Кузнецов А. А., Маврина А. С., Куликов Г. Г. Подход к формированию виртуальной метаструктуры цифрового проектного двойника корпоративной информационной системы машиностроительного предприятия // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2021. Т. 21. № 2. С. 5-15. EDN GHFUOE. [[Sapozhnikov A. Yu., Kuznetsov A. A., Mavrina A. S., Kulikov G. G. "Approach to the formation of a virtual metastructure of a digital design twin of a corporate information system of a machine-building enterprise" // Bulletin of the South Ural State University. Series "Computer technologies, control, radio electronics". 2021. V. 21, No. 2, pp. 5-15. EDN GHFUOE. (In Russian).]]
15. Сапожников А. Ю., Кузнецов А. А., Маврина А. С., Куликов Г. Г. Применение цифрового двойника информационной платформы предприятия в производственных и учебных процессах с учетом функционально-стоимостных и временных ограничений (на примере бизнес-процессов базовой кафедры информационных технологий) // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2020. Т. 20. № 3. С. 47-56. EDN ASGRWN. [[Sapozhnikov A. Yu., Kuznetsov A. A., Mavrina A. S., Kulikov G. G. "Application of a digital twin of an enterprise information platform in production and educational processes, taking into account functional, cost and time constraints (on the example of business processes of the basic department information technologies)" // Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer technologies, control, radio electronics. 2020. V. 20, No. 3, pp. 47-56. EDN ASGRWN. (In Russian).]]
16. Фахруллина А. Р. Модели и методы проектирования программных систем для обработки разнородных данных (на примере образовательно-производственной среды) // СИИТ. 2023. Т. 5. № 5(14). С. 39-51. EDN GNKHGA. [[Fakhrullina A. R. "Models and methods for designing software systems for processing heterogeneous data (using the example of an educational and industrial environment)" // SIIT. 2023. V. 5, No. 5(14), pp. 39-51. EDN GNKHGA. (In Russian).]]
17. Сапожников А. Ю., Куликов Г. Г., Кузнецов А. А., Юрлов М. В. Управление знаниями на примере машиностроительного предприятия и ВУЗа // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. 2022. Т. 22. № 2. С. 148-157. EDN TORXQE. [[Sapozhnikov A. Yu., Kulikov G. G., Kuznetsov A. A., Yurlov M. V. "Knowledge management on the example of a machine-building enterprise and a university" // Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer technologies, control, radio electronics. 2022. V. 22, No. 2, pp. 148-157. EDN TORXQE. (In Russian).]]
18. Кузнецов А. А., Сапожников А. Ю., Куликов Г. Г., Кузнецов, А. А. Архитектура информационной подсистемы организации метамодели знаний в предметно-ориентированной проектной области (на примере образовательно-производственной среды) // Вестник УГАТУ. 2022. Т. 26. № 4(98). С. 29-39. EDN UGDCQY. [[Kuznetsov A. A., Sapozhnikov A. Yu., Kulikov G. G., Kuznetsov, A. A. "Architecture of the information subsystem for organizing the knowledge metamodel in a subject-oriented project area" // Vestnik UGATU. 2022. T. 26. No. 4(98). S. 29-39. EDN UGDCQY.]]

(using the example of an educational-industrial environment)" // Vestnik UGATU. 2022. V. 26, No. 4(98), pp. 29-39. EDN UGDCQY. (In Russian).]]

*Поступила в редакцию 3 июля 2024 г.*

#### МЕТАДАННЫЕ / METADATA

**Title:** Models of a multi-agent digital twin of a corporate application IT platform.

**Abstract:** An overview of the results of a study of university-corporation interaction processes when performing current industry tasks using a digital twin of a corporate applied IT platform is presented. The goal of the work is to increase the efficiency of processes of complex, geographically distributed interaction between enterprises and universities using a digital twin of the corporate applied IT platform as part of the university's corporate information system. This goal is achieved through the development of: 1) a functional model of organization and application of a single information space for complex, geographically distributed interaction between a university and a manufacturing enterprise; 2) a set-theoretic model of a multi-agent data center of a corporate applied IT platform for complex knowledge-intensive objects; 3) a method for creating and modernizing the architecture of the CD CIS enterprise, implementing the coordinated development of the CD CIS and CIS enterprise; 4) architecture of a software complex that implements a knowledge management methodology based on a model knowledge hypothesis. The assigned tasks were solved using the methods of an integrated approach and structural analysis of the design process using the Structured Analyze and Design Technology (SADT) methodology, functional modeling (in IDEF0 notation), information modeling (in IDEF1X notation), TOGAF methodology when developing and changing the architecture of the data center corporate applied IT platform, Business Process Model and Notation (BPMN) methodology for modeling business processes in the educational and production environment when developing new mechanical engineering products, set theory and category theory.

**Key words:** digital twins; IT platforms; enterprise architecture; TOGAF methodology; corporate information systems; unified information space; category theory; set theory; knowledge management system.

**Language / Язык статьи:** Russian / русский.

#### Об авторах / About the authors:

##### **КУЗНЕЦОВ Александр Андреевич**

ПАО «ОДК-УМПО», Россия.

Начальник

отдела.

Канд. тех. наук (Уфимск. ун-т науки и технологий, 2023). Исследования в области математического и программного обеспечения вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей

E-mail: kuznecovopkr@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7007-7457>

##### **KUZNETSOV Aleksandr Andreevich**

PJSC «UEC – УЕРА », Russia.

Head of department.

Cand. Sc.(Ufa Univ. of Science & Technology, 2023). Research in the field of mathematical and software support for computing systems, complexes and computer networks.

E-mail: kuznecovopkr@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-7007-7457>

##### **САПОЖНИКОВ Алексей Юрьевич**

ПАО «ОДК-УМПО», Россия.

Заместитель начальника отдела. Канд. тех. наук (УГАТУ, 2012).

Исследования в области автоматизации проектирования авиационных двигателей.

E-mail: bk.it.umpo@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1548-2333>

##### **SAPOZHNIKOV Alexey Yurevich**

PJSC «UEC – УЕРА », Russia.

Deputy head of department. Cand. Sc. (USATU, 2012). Research

in the field of automation of aircraft engine design.

E-mail: bk.it.umpo@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1548-2333>