

СИНТЕЗ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МНОГОАСПЕКТНОЙ РЕКУРСИВНОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ

Здирук К. Б.¹, Толпыгин А.С.², Гречанюк Ф. А.³.

¹ООО «Экстремальные технологии и системы» (г. Москва), zkb_64@mail.ru

²Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, a.tolpygin@gmail.com

³Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, f.grechanyuk@ukraft.ru

Аннотация

В статье представлено краткое изложение научно-методических основ формирования (коллекций) цифровых двойников на основе применения алгоритма многоаспектной рекурсивной декомпозиции предметной области. Обосновывается утверждение о континуальности информационного пространства, как порожденной субстанции, содержащей элементы пространства знаний, объективизированные посредством (известных) знаковых форм. Предложен новый – когнитивный подход для оценки полноты представления (меры) знаний в информационном пространстве. Рассмотрена модель интегрированного хранилища информации, реализующего накопление знаний в банках данных первичной и вторичной информации. В качестве примера выполнена рекурсивная декомпозиция подмножества инженерных систем МГТУ им. Н. Э. Баумана.

***Ключевые слова:** цифровые двойники, объективизация знаний, субъективизация информации, сферическая и атрибутивная меры, многоаспектная рекурсивная декомпозиция.*

I. Основные определения

О-1: Предметная область – окружающий нас мир в целом или некоторый его сегмент, – предмет познавательной деятельности и/или объект воздействия.

О-2: Предмет – объект познания, все то, на что направлено наше мышление (в том числе, логические объекты: понятия, высказывания, суждения, умозаключения).

О-3: Знание – результат целенаправленной познавательной деятельности, полученный на основе накопления и осмысления практического и теоретического опыта, отличающийся единством, полнотой и непротиворечивостью субъективного представления предметной области (в виде некоторой сложившейся в сознании субъекта «единой картины мира»).

О-4: Информация – результат объективизации знаний субъекта о предмете с использованием одной из известных знаковых форм.

О-5: Данные – то же, представленное в произвольной знаковой форме. Таким образом, информация – есть подкласс данных. Понятия данные и информация – тождественны при условии, если применяемая знаковая форма всегда известна¹.

О-6: Свойство – объективная особенность предмета, зависящая от его строения и характеризующая какую-либо отдельную его сторону (аспект).

О-7: Атрибут – необходимое, существенное свойство (признак) предмета.

О-8: Качество – совокупность свойств предмета (объекта познания), отличающая его от других объектов и характеризующая его соответствие своему назначению.

О-9: Мера – единство качественной и количественной определенности свойств предмета.

О-10: Цифровой двойник – программный (виртуальный) аналог реального физического объекта или процесса, воспроизводящий его структуру, состояние, а также динамику их изменений во времени.

О-11: Понятие – многоаспектное (многогранное) содержание предмета, выраженное средствами формального языка или формальной модели.

О-12: Высказывание – определение фактического (текущего) состояния, свойства предмета по некоторой мере (качественной или количественной), а также событий, связанных с изменениями свойств предмета, выраженные средствами некоторой знаковой системы (формального языка).

О-13: Суждение – обобщенное высказывание, выраженное средствами формального языка, в одной из 2-х форм:

О-13.1: Суждение рефлексии [6] – высказывание о состоянии предмета (объекта) исследования, как целого, полученное на основе оценки или суперпозиции оценок его отдельных состояний (свойств).

О-13.2: Суждение необходимости [6] – высказывание о принадлежности предмета (объекта) исследования к некоторому множеству (классу) по критерию(ям) подобия его особенных свойств.

О-14: Умозаключение – совокупность двух и более высказываний и/или суждений, связанных общим выводом, реализующим истинность, т.е. тождественность реального предмета понятию о нем.

II. Краткое описание проблематики и методических подходов к представлению знаний посредством цифровых двойников

Общей тенденцией развития современных АСУ является переход от «трехслойной» архитектуры информационных систем (слой клиента, слой логики, слой базы данных) к «четырёхслойной» архитектуре [5], где новый слой – слой представления знаний – включает реализацию концептуальной модели предметной области (специализированную

¹ В дальнейшем изложении будем полагать тождественность предмета в определениях **О-4** и **О-5**. Вопросы преднамеренного деструктивного искажения или сокрытия информации-данных в процессе объективизации знаний в данной работе не рассматриваются.

базу данных, программные средства, методики и алгоритмы концептуального моделирования). Широко обсуждаемые в последнее время концепты #«Умный» или #«Smart» также предполагают интеллектуализацию (как минимум – рациональность) поведения киберфизических систем на основе формализации представления знаний о них самих и окружающем (т. н. *операционном*) пространстве. По замыслу, в результате достигается накопление критической массы знаний о предметной области в форме, пригодной для автоматизированной обработки в системах моделирования технологических процессов и поддержки принятия «обоснованных» управленческих решений. В этом, на первый взгляд, очевидном подходе кроется несколько фундаментальных проблем, препятствующих повсеместному переходу к технологиям накопления и обработки баз знаний, провозглашаемым на теоретическом уровне развития систем искусственного интеллекта (*artificial intelligence*, англ., далее – AI).

К примеру, на сегодняшний день неясными для практического применения остаются следующие вопросы AI-теории [9]:

Q1: Соотношение понятий «Знание» / «Информация» / «Данные» и нового понятия – «Цифровых двойников» (как информационных контейнеров знаний);

Q2: Структура (метризуемость) пространства знаний и информационного пространства, взаимосвязи между ними;

Q3: Представление предметной области в виде общей концептуальной модели (т. н. «единой картины мира») и ее отображение на уровень логической и физической структуры средствами существующих баз данных;

Q4: Количественная оценка (мера) полноты накопленных знаний для достижения гарантируемого (не ниже заданного уровня) качества целенаправленных процессов наблюдения и управления объектами предметной области.

С позиций современной философии Знание объективизируется посредством различных (известных) знаковых форм на 3-х основных уровнях (ступенях) [6]:

- искусства (ступень чувственного восприятия);
- религии (ступень представлений);
- науки (ступень мышления).

В дальнейшем изложении мы будем рассматривать только область научных знаний, получаемых в процессе познавательной деятельности с применением научно обоснованных методов познания, как основного средства формирования объективного (истинного) знания о предмете (исследуемом объекте).

Соответствие реального предмета представлению о нем в сознании субъекта будем называть *истинным Знанием – Истиной (филос.)*. Представляет интерес введение в научный оборот количественной *меры* знаний \mathbb{K}_{t_i} , накопленных о предмете к моменту времени t_i .

Тогда, при условии исключения утраты накапливаемых знаний на открытом (справа) интервале познания, для оценки степени полноты накопленных *Знаний* \mathbb{K} по отношению к *Истине* \mathbb{T} можно рассмотреть сходимость по *норме* (матем.) следующего вида:

$$\|\mathbb{K}_{t_i} - \mathbb{T}\| \rightarrow 0, t_i \rightarrow \infty \quad (1)$$

С прагматичной точки зрения, актуальность решения данной задачи обусловлена необходимостью формирования обоснованных суждений о достаточности (полноте) накопленных *Знаний* (выраженной в некоторой количественной *мере*) для достижения

гарантируемого (априорно заданного) *уровня качества* целенаправленных процессов взаимодействия *субъекта* и *предметной области* (в частности, процессов наблюдения и управления).

Научное знание включает три основные составные части:

- *декларативную* (фактографические знания – результат наблюдения за состоянием предметной области);
- *понятийную* (системные знания, содержащие свойства и взаимосвязи между понятиями);
- *процедурную* (знания, определяющие состав и порядок действий для достижения цели, – алгоритм решения).

В теории искусственного интеллекта и экспертных систем *Знание* – есть совокупность базовых утверждений о мире, свойствах объектов, закономерностях процессов и явлений, а также правил порождения непротиворечивых производных утверждений для обоснованного принятия управленческих решений.

Процесс накопления (базовых и производных) Знаний и их последовательная объективизация – отображение на множества концептуальных / логических / физических структур данных² является неизбежным этапом создания любых систем поддержки принятия решений. Отображению на структуры данных, при этом, подлежат все три вышеперечисленные составные части научного знания.

К настоящему времени специалистами, при решении задач искусственного интеллекта, применяется ряд известных концепций – подходов к представлению знаний (*knowledge based systems, knowledge representation systems and languages*), наиболее известными из которых являются [7]:

- семантические сети;
- ситуационное управление;
- формальная логика (исчисление предикатов);
- фреймовые структуры;
- нейронные сети;
- онтологии.

Для всего приведенного перечня можно отметить общий недостаток – отсутствие содержательной метрики (**1**), позволяющей получить *оценку полноты представления знаний* посредством применения указанных выше концепций.

Поскольку непосредственное измерение уровня субъективного знания (во всяком случае - в настоящее время) невозможно, оценка *полноты накопленных знаний* о предмете может быть получена **только** опосредованно – применением избранной *меры* к элементам *информационного пространства* \mathbb{I} , как продукта объективизации некоторого первичного субстрата – *знаний* \mathbb{K} .

Известные на сегодняшний день подходы к определению меры в информационном пространстве (на Рис. 1 – *синтаксический* и *семантический*) [10] не связаны с проблемой количественной оценки полноты представления прообраза – пространства знаний, по своему заполнению сходящегося к *Истине* – абсолютному *Знанию*. Для устранения

² Каждое из множеств можно рассматривать как самостоятельное информационное пространство (знаковых форм), включающее группы объектов – элементов, объединенных общей аксиоматикой, определяющей их свойства и поведение.

отмеченного недостатка первых двух подходов, справа на Рис. 1 представлен когнитивный подход, включающий атрибутивную и сферическую меры, а также их суперпозицию.



Рис. 1 – Когнитивный подход, как дополнение ранее введенных способов определения меры в информационном пространстве.

Применяя меры опосредованной оценки *полноты* представления *знаний* в рамках предлагаемого в данной работе когнитивного подхода, следует учитывать неизбежность потерь части содержания в силу естественных ограничений при вербальном представлении знаний посредством каких-либо знаковых форм [8]. Тем не менее, в рамках единого методического подхода к вычислению количественных оценок с применением атрибутивной и сферической мер (их суперпозиции), и при последующем сопоставлении (сравнении) полученных оценок для объектов заданной предметной области, потери объективизации знаний можно считать регулярной погрешностью процесса измерения.

Далее (в разделе III), при изложении когнитивного подхода нами будет рассмотрено формирование концептуальной модели предметной области (КМПО) с применением *многоаспектной рекурсивной декомпозиции*, как базового метода структуризации информационного пространства.

Формальное определение *атрибутивной* и *сферической* мер для получения количественных оценок полноты КМПО, как конечного продукта объективизации исходного пространства знаний, предложено в работе [3].

На основании введенных определений, краткого изложения проблематики и предлагаемого подхода, будем полагать:

1. *Знание* – результат позитивной (см. сноску 1 на стр. 2) целенаправленной познавательной деятельности, осуществляемой как на уровне эмпирического опыта (ощущений, восприятий), так и на уровне абстрактного теоретического мышления.
2. Между *Информацией* и *Знанием* существует взаимосвязь [8]:
 - *Информация* переходит в *Знание* в результате ее восприятия и содержательной интерпретации субъектом (процесс субъективизации);

Коллекция «цифровых двойников» (*DT-коллекция*), как показано в работе [2], является средством уменьшения *стохастической неопределенности* (повышения результативности управления, оцениваемой, например, по вероятности достижения цели) при реализации принятого решения в заданном операционном пространстве (ОП). Обладая *полным* (истинным) *Знанием* об элементах ОП (представленным в Банке данных ВИ) можно априорно *гарантировать* либо успешность управляющего воздействия, либо уменьшение стохастической неопределенности при его реализации на величину, не ниже заданной.

При отсутствии Банка данных ВИ, как такового, основанием принятия решения является непосредственная интерпретация потока первичной информации (накопленной в Банке данных ПИ), а также личный «опыт» (субъективные знания) лица принимающего решения (ЛПР). Эти элементы составляют (см.Рис. 3):

1-й контур управления. В качестве вспомогательного инструментария для ЛПР в этот контур могут быть включены все известные, в настоящее время, программные средства: online – аналитики, работы с Big Data, VI – анализа.

2-й контур управления образуется Банком данных ВИ и интерактивным взаимодействием ЛПР – *Диспетчера «цифровых двойников»*, с коллекцией «цифровых двойников», размещенной на оси времени (в прошлом, настоящем и будущем).

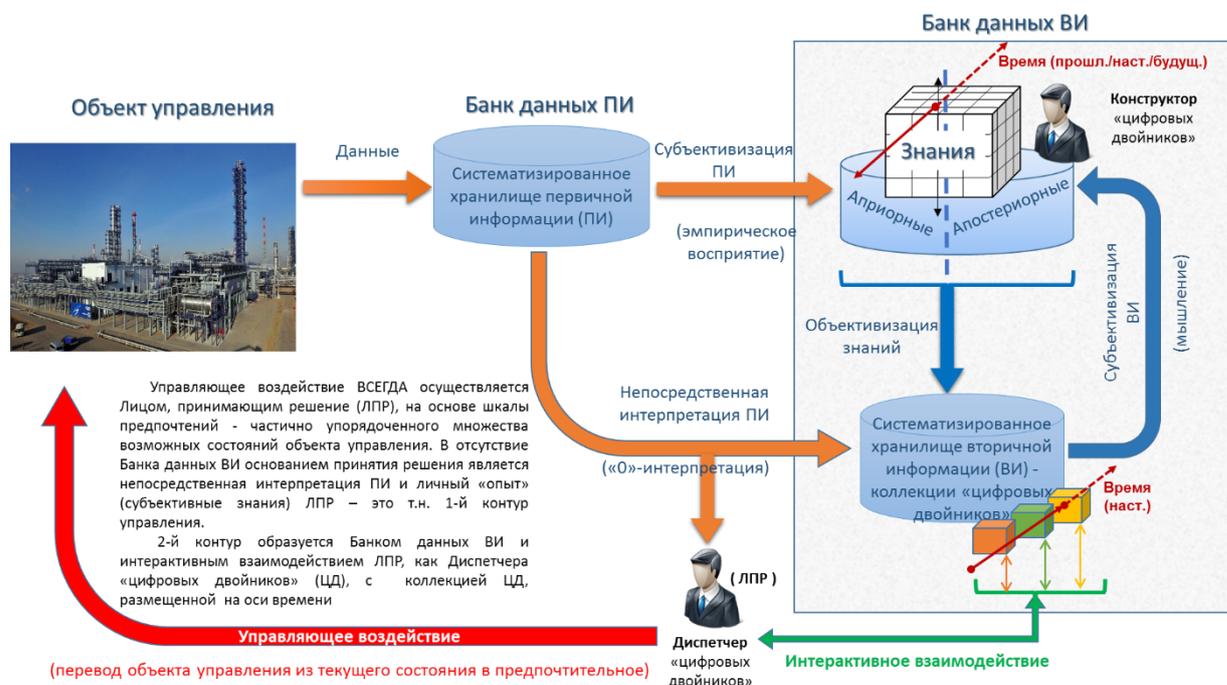


Рис. 3 – Применение коллекции «цифровых двойников» в двухконтурной схеме управления.

III. Многоаспектная рекурсивная декомпозиция предметной области, как общий методологический подход к формированию «цифровых двойников»

Совокупность накопленных сведений о предмете сама по себе еще не составляет единую систему знаний о нем. В общем случае, единство и многообразие окружающего нас мира составляют объективную основу деятельности нашего интеллекта по выработке и систематизации разрозненных знаний и формированию на их основе целостных представлений – т. н. «единой картины мира» [6] – изначально – в сознании субъекта, с последующей их объективизацией в виде *концептуальной модели* предметной области

(КМПО), как отдельного слоя представления знаний в информационном пространстве автоматизированной системы.

Теоретический уровень реализации КМПО, очевидно, должен основываться на общей методологии – формальной теории, обеспечивающей *единство, полноту и непротиворечивость* описания элементов и отношений между ними для абстрактной предметной области (как предмета).

Практический уровень реализации КМПО должен включать набор инвариантных по отношению к предмету специализированных инструментов концептуального моделирования: методик, (обще)системных классификаторов, специализированных баз данных, а также программных средств их поддержки. Наличие такой целостной совокупности взаимоувязанных компонентов, как научно обоснованной системы инструментальных средств проектирования, реализованных на теоретическом и практическом уровнях, дают основания для положительного ответа на один из проблемных вопросов – *Q3* (см. раздел **II**) – о возможности представления предметной области в виде общей концептуальной модели («единой картины мира») и ее *адекватного* отображения на уровень логической и физической структур данных, доступных для непосредственной обработки программными средствами существующих СУБД.

Примечание 1: Одной из разновидностей концептуального моделирования является онтологическое моделирование, где под онтологией понимается результат формализации некоторой области знаний в виде **концептуальной схемы** предметной области. Концептуальная схема включает в себя совокупность **концептов** - сущностей предметной области и их классов, **отношения** между концептами, **правила** (аксиомы, теоремы, ограничения, термины-определения), принятые в предметной области. Обсуждение онтологического подхода к концептуальному моделированию выходит за рамки данной работы, тем не менее отметим отсутствие к настоящему времени единой общепринятой методологии проектирования онтологий, а также методов (количественной) оценки результатов моделирования [13]. Представление знаний на основе онтологий, как будет показано далее (в разделе **III**), может применяться для описания классификационно-терминологической основы – содержимого Банка данных классификаторов КМПО - составного элемента Интегрированного хранилища информации (ИХИ).

С позиций современной математики, использование термина «пространство» применительно к результатам процесса субъективизации информации (множеству накопленных знаний), а также по отношению к обратному процессу – объективизации знаний (множеству вербально выраженных и семантически воспринимаемых знаковых форм) – представляется не вполне корректным³.

Понятно, что говорить о структуризации совокупности знаний субъекта невозможно, не выполнив декомпозицию знаний на отдельные элементы и присущие им свойства. Отсюда можно сделать вывод о том, что вся совокупность знаний субъекта(ов) представляет собой некий первичный субстрат, пронизанный ассоциативными связями (отношениями), верхняя граница которых соответствует *булеану* (множеству всех подмножеств) элементов первичного субстрата.

³ Термин «пространство» применим по отношению к (непустым) множествам, с заданной аксиоматикой свойств их элементов, определяющей некоторую структуру на данном множестве.

Применительно к информации, как порожденной субстанции, содержащей объективизированные (посредством знаковых форм) отношения элементов первичного субстрата (знаний), следует отметить принципиальное отличие – возможность структуризации данной субстанции посредством введения аксиоматики на множестве ее элементов. Ниже предлагается подход к заданию структуры информационного пространства, оценки его *мощности* и определения базиса операций на множестве элементов и их свойств.

Утверждение 1 (о структуре информационного пространства): *структурными элементами информационного пространства (не субстанции) являются «цифровые двойники» – целостная и непротиворечивая совокупность рекурсивно связанных информационных контейнеров (объективизированных) знаний о предметной области, размещенных на оси времени.* ■

Данное утверждение означает возможность представления информационного пространства в виде некоторой системы связанных отношениями информационных контейнеров, в совокупности представляющих собой результат объективизации знаний о предметной области.

В дальнейшем изложении под термином «*концептуальная модель предметной области*» (КМПО) будем понимать полученное таким образом (подчеркнуто абзацем выше) представление объективизированных знаний в информационном пространстве.

Утверждение 2 (о мощности информационного пространства): *информационное пространство, представленное как DT-коллекция в Утверждении 1, содержит континуальное множество включающих элементов – сущностей.* ■

Данное утверждение означает возможность рассмотрения *информационного пространства* в виде целостной совокупности *информационных контейнеров знаний*, содержащих *несчетное* множество рекурсивно определяемых элементов – сущностей. Следствием из данного утверждения является вывод о том, что вся совокупность знаний субъекта(ов) – т. н. *первичный субстрат*, включающий в качестве *акцидентий* – множество ассоциативных связей (отношений), избирательно отображаемых на элементы – сущности информационного пространства посредством известных знаковых форм, имеет мощность, превосходящую континуум. Формальное доказательство **Утверждения 2** содержится в работе [3].

Утверждение 3 (об операциях в информационном пространстве): *при представлении концептуальной модели некоторой предметной области, как DT-коллекции в информационном пространстве (Утверждение 1), обработка входящего информационного потока может быть представлена в виде конечной последовательности счетного и ограниченного множества операций (базиса \mathcal{S}), изменяющих либо отдельные свойства элементов коллекции «цифровых двойников», либо их структуру.* ■

Данное утверждение означает принципиальную возможность сведения содержательной обработки поступающего потока сообщений / запросов о *событиях* предметной области (накопленных в Банке данных ПИ) к последовательности элементарных операций (см. Табл. 1) над «цифровыми двойниками» – элементами Банка данных вторичной информации.

Философией, как наукой о наиболее общих законах развития природы, общества и мышления, предлагается научно обоснованная методология формирования системы

понятий – представлений о сущности и сущностях – элементах абстрактной предметной области на основе последовательности развития философских категорий, начиная с уровня объективной логики (учении о *бытии* и учении о *сущности*) и заканчивая уровнем субъективной логики (учении о *понятии, как таковом*⁴) [6].

На уровне субъективной логики, наши представления о *сущности* предметной области формируются в виде логического ряда субъективных форм мысли относительно предмета исследований (физических объектов и процессов заданной предметной области), выражаемых в форме *понятий* (определений), *высказываний*, *суждений* и *умозаключений* (см. раздел **I. Основные определения**, с **О-11** по **О-14**).

В соответствии с решаемой задачей, на уровне разрабатываемой общей методологии формирования «цифровых двойников» (*DT-методологии*) должен быть определен ее *базис* \$: множество элементарных (в рамках данной методологии) сущностей и операций над ними, реализующих весь представленный выше ряд субъективных форм мысли.

Способ выражения субъективных форм мысли посредством упомянутого выше *базиса* \$ (задается Табл. 1) образует внутреннее содержание предлагаемого подхода к концептуальному моделированию предметной области – на основе представления ее сущностей (объектов и процессов) в виде некоторой системы – целостной совокупности (коллекции) «цифровых двойников», формируемых посредством кратного применения (с масштабированием по уровням вложенности и граням-аспектам) единой методологии – многоаспектной рекурсивной декомпозиции заданной предметной области.

Табл. 1 – Отображение множества субъективных форм мысли на элементы *базиса* \$ при формировании *DT-коллекции*.

Субъективная форма	Компоненты DT-методологии (<i>базис</i> \$)	Функциональное назначение компонента	Способ программной реализации
<i>Понятие</i>	Объекты: <i>K</i> – Куб, <i>F</i> – Грань (фасет), <i>E</i> – Элемент (класс элементов) <i>P</i> – Свойство (атрибут) Операции: CREATE (as) / DROP / UPDATE	Многоаспектная <i>DT-модель</i> предметной области, Куб представлен совокупностью сущностей: <i>Граней</i> , каждая из которых, в свою очередь, представляется совокупностью <i>Элементов</i> и/или <i>Классов элементов</i> , обладающих однородными <i>Свойствами</i>	Программный и пользовательский интерфейсы, совокупность баз данных. Алгоритмическая реализация методологии многоаспектной рекурсивной декомпозиции без ограничений по количеству сущностей, их свойств и уровней вложенности
<i>Высказывание</i>	<i>M</i> – контейнер сообщения	Отражение фактов существования и изменения свойств сущностей в <i>DT-модели</i>	Набор структурированных контейнеров – сообщений и API-методов их обработки
<i>Суждение рефлексии</i> (состояние)	<i>R</i> – метод (внешний) «свертки»	Обеспечение полноты <i>DT-модели</i> , вычисление производных показателей:	Программы-сценарии (интерпретируемый код), инициируемые в результате

⁴ Далее по тексту при употреблении терминов «сущность» / «сущности» – как философской категории, они будут выделены курсивом. Термины «сущность» (в ед. числе) и «сущности» (во мн. числе) – как элементы абстрактной модели «Entity–Relationship», принятой в теории баз данных, в тексте не выделяются.

	показателей свойств сущностей <i>DT-модели</i>	текущего статуса (ТС) и остаточного ресурса (ОР), как суперпозиции свойств элементов, их классов и граней (аспектов)	системного события – обработки контейнера сообщения (высказывания)
<i>Суждение необходимости</i> (классификация)	<i>C</i> – метод (внешний) классификации сущностей <i>DT-модели</i>	Обеспечение полноты <i>DT-модели</i> , создание / удаление / отдельных элементов, их классов, граней (аспектов) и кубов – понятий предметной области	Программные средства поддержки WEB-интерфейса конечного пользователя, набор API-методов, вызываемых на уровне программ-сценариев
<i>Умозаключение</i>	<i>D</i> – метод (внутренний) суперпозиции двух и более высказываний и/или суждений	Обеспечение не-противоречивости <i>DT-модели</i>	Программы-сценарии, инициируемые в результате наступления (реализации) комплекса условий, переводящие объекты <i>DT-коллекции</i> в новое состояние

С учетом сделанного ранее *Утверждения 1* и формализации способов выражения субъективных форм мысли посредством введенного выше *базиса \$* (Табл. 1) *Утверждение 3* можно изложить в более строгой формулировке:

Утверждение 4: При реализации концептуальной модели некоторой предметной области, как DT-коллекции на основе отображения, заданного таблицей (Табл. 1), обработка входящего информационного потока может быть представлена в виде конечной последовательности элементарных операций в базисе \$, изменяющих либо структуру «цифровых двойников» (набор Кубов, Граней, состав Элементов и их Свойств), либо значение меры отдельных атрибутов (представленной в качественном или количественном выражении). ■

Данное утверждение означает принципиальную возможность сведения содержания всех процессов обработки поступающего потока событий – первичных данных о состоянии предметной области к наборам элементарных операций над *информационными контейнерами* сообщений и объектами концептуальной модели предметной области (КМПО) – содержимому *темпоральных* Банков данных (БнД) первичной и вторичной информации.

На Рис. 4 приводится пример матрицы обработки событий некоторой предметной области с выделением специализированных классов информационных контейнеров сообщений: ТРП-транспорт, МЕД-здравоохранение, ФИН- экономика, ОБР-образование, Э-Э – электроэнергетика, и т. д.). Классификатор предметной области является структурированным представлением КМПО в виде *DT-коллекции* в информационном пространстве, соответствующем *Утверждениям 1-4*.

Программы-сценарии, инициируемые в результате системных событий – поступления и обработки контейнеров сообщений, переводят *DT-коллекцию* в новое состояние посредством выполнения операций в *базисе \$*. Отображение множества событий на сценарии их обработки задается Управляющим словарем событий, содержащим ссылки на системную грань *Куба* – Банк моделей (сценариев), как показано на Рис. 5.

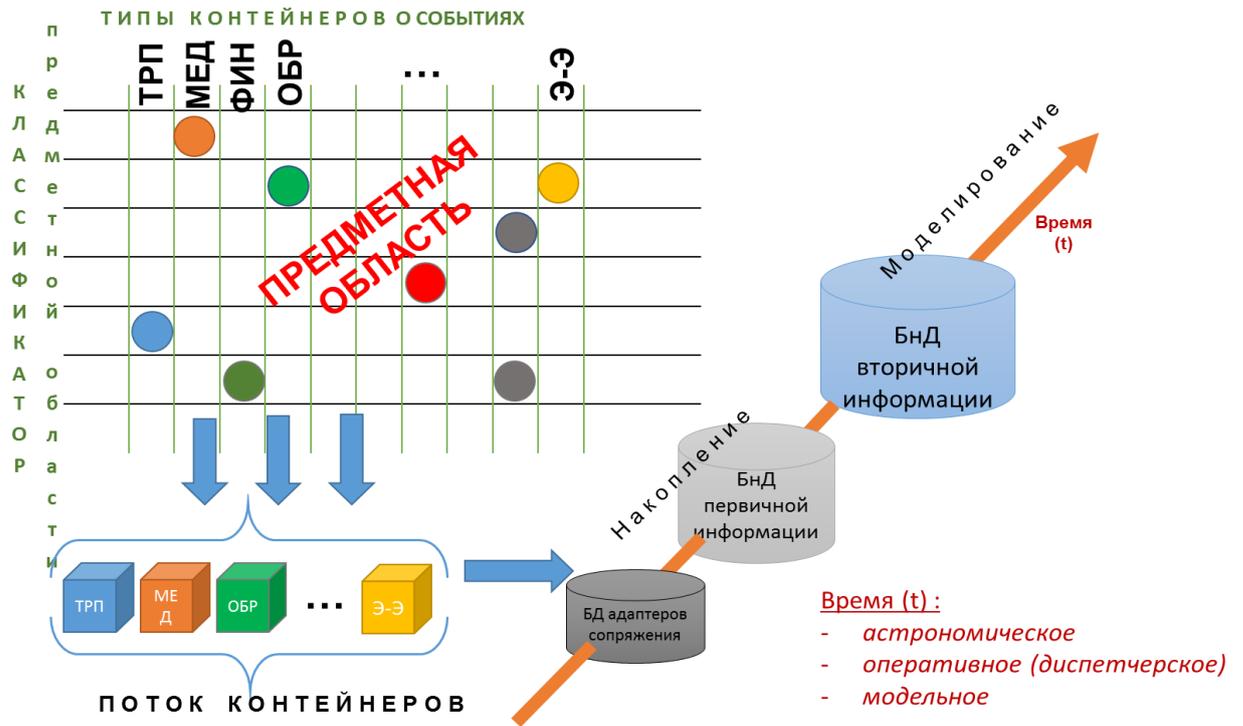


Рис. 4 – Формирование и обработка потока событий - данных об объектах предметной области с учетом темпоральной модели организации Банков данных первичной и вторичной информации.

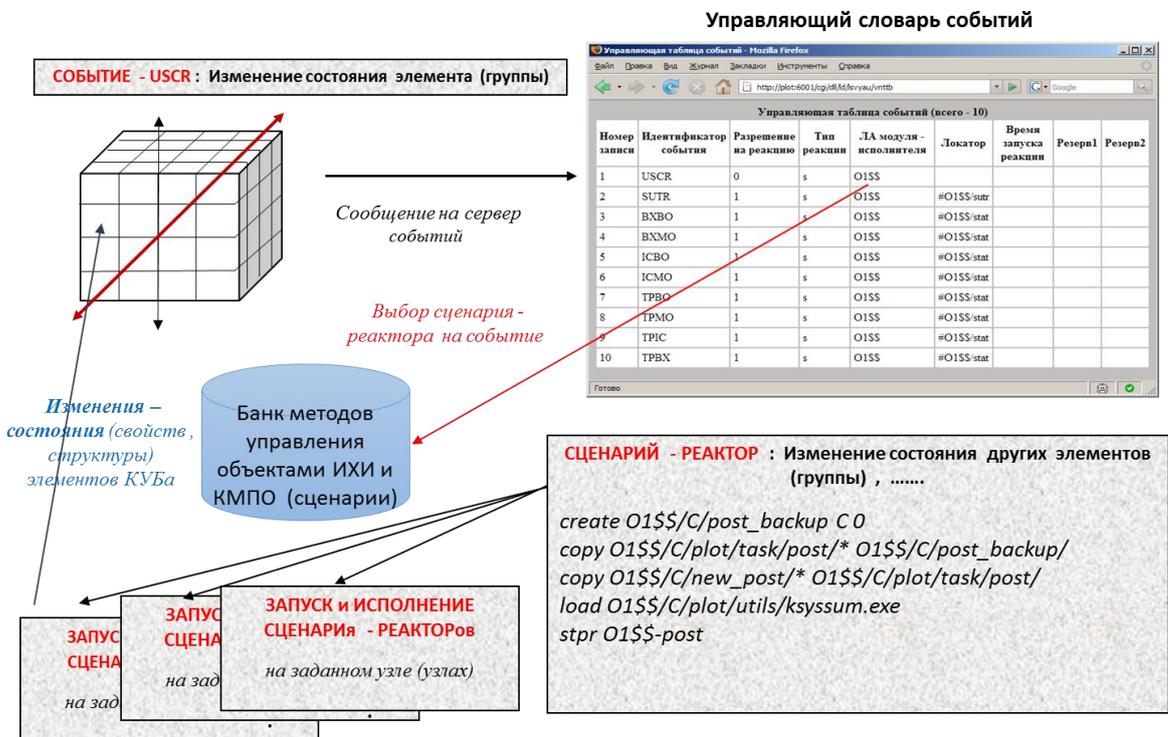


Рис. 5 – Вызов сценариев – обработчиков потока событий с использованием Управляющего словаря событий.

Предлагаемый подход в рамках единой методологии – *многоаспектной рекурсивной декомпозиции* произвольной предметной области, где $P_0^{(0)}$ – исходная сущность –

предметная область, реализуется в виде конечной последовательности шагов с соответствии с нижеприведенным алгоритмом.

Верхний индекс используется для обозначения уровня рекурсии, нижний – для перечисления элементов-сущностей и операций-проекций, получаемых в результате декомпозиции.

Шаг-0 (начальное состояние).

Ш-0.1: $P_0^{(0)}$ – исходная сущность (предметная область), подлежащая декомпозиции и обладающая набором измеримых и означенных (по некоторой задаваемой «мере») свойств $Y[P_0^{(0)}] = \langle y_{10}^{(0)}, \dots, y_{S_0}^{(0)} \rangle$, определяющих ее **качество** (т.е. позволяющих отличать данную сущность от всех других, как *нечто* и *иное* [6]).

Ш-0.2: **Базис** \mathcal{F} , включающий:

$T = \{K, F, \dots, D\}$ – компоненты *DT-методологии* (Табл. 1)

$R(P_i^J / F_{i+1}^J), i, j = 0(1)\infty^5$ – проектор сущности P_i^J на грань F_{i+1}^J , результатом действия которого является множество элементов – сущностей вида

$$P_{i+1}^{J+1} = \{P_{1i+1}^{J+1}, P_{2i+1}^{J+1}, \dots, P_{ki+1}^{J+1}\}$$

Где k – количество новых сущностей, полученных в результате декомпозиции.

Ш-0.3: Рекурсивно определяемые *Отождествления* следующего вида:

$$\begin{aligned} K^{(J)} &:= P_i^{(J)} \\ P_{i+1}^{J+1} &:= R(P_i^J / F_{i+1}^{J+1}) \\ F_{i+1}^{J+1} &:= P_{i+1}^{J+1} \\ E_{y_{i+1}}^{J+1} &:= P_{y_{i+1}}^{J+1} \\ P_{y_{i+1}}^{J+1} &:= K^{(J+1)} \end{aligned}$$

Ш-0.4: Верхний и нижний индексы совпадают и равны 0 (см. сноску 5).

Шаг-1. Выполнить проекцию $R(P_i^J / F_{i+1}^J), i, j = 0(1)\infty$ сущности P_i^J на (очередную) грань F_{i+1}^J с образованием множества $P_{i+1}^{J+1} = \{P_{1i+1}^{J+1}, P_{2i+1}^{J+1}, \dots, P_{ki+1}^{J+1}\}$, где k – количество новых сущностей, полученных в результате выполнения проецирования (декомпозиции).

Шаг-2. Для каждой образованной на предыдущем шаге в результате декомпозиции новой сущности определить «меру» для всех свойств $Y[P_{i+1}^{J+1}] = \langle y_{1i+1}^{(J+1)}, \dots, y_{S_{i+1}}^{(J+1)} \rangle$, определяющих ее **качество**⁶.

Шаг-3. Присвоить каждому свойству его значение – показатель (в количественном или качественном выражении), выполнить преобразование качественных показателей свойств в количественные с последующим нормированием в интервале $[0,1]$.

Шаг-4.

Ш-4.1: Если $k = 1$ (количество новых сущностей, полученных в результате декомпозиции не изменилось), выполнить декремент верхнего индекса ($J := J - 1$), инкремент номера грани ($i := i + 1$), с переходом к **Шагу-1** при невыполнении

⁵ Для каждой сущности вида P_i^J ее верхний и нижний индексы могут быть ограничены (критерий окончания процесса декомпозиции)/

⁶ В общем случае, как сами наборы свойств полученных сущностей, так и их «измеренные» значения – различны, этим обеспечивается уникальность представления каждой сущности – элемента множества P_{i+1}^{J+1} .

критерия завершения проецирования сущности на грани F_{i+1}^J , иначе – выполнить переход к **Шагу-6**.

Ш-4.2: Иначе, при $k \neq 1$ (образован набор новых сущностей в результате проецирования – декомпозиции), перейти к **Шагу-5**.

Шаг-5. При невыполнении критерия завершения декомпозиции сущности по количеству уровней (см. сноску 5 на стр. 2) выполнить инкремент верхнего индекса ($J := J + 1$), инициализацию номера грани ($i := 0$), рекурсивные отождествления **Ш-0.3** и переход к **Шагу-1**.

Иначе (если достигнуто установленное ограничение на декомпозицию сущности по количеству уровней) – выполнить переход к **Шагу-6**.

Шаг-6. Выполнить декремент верхнего индекса ($J := J - 1$).

Если ($J := 0$) – переход к **Шагу-7** (окончание процесса декомпозиции)

Иначе – произвести выбор очередного элемента – сущности, подлежащей декомпозиции (с применением любого из известных алгоритмов рекурсивного обхода деревьев), выполнить рекурсивные отождествления **Ш-0.3** и переход к **Шагу-1**.

Шаг-7. Окончание процесса рекурсивной декомпозиции (выход).

На Рис.6 показан пример реализации представленной методологии для декомпозиции начальной сущности – МГТУ им. Н. Э. Баумана [14] с рекурсивным представлением Основных инженерных систем (ИС) и одной из ключевых подсистем – Безопасной эксплуатации зданий и сооружений (на рисунке – (Б)ЭЗиС).

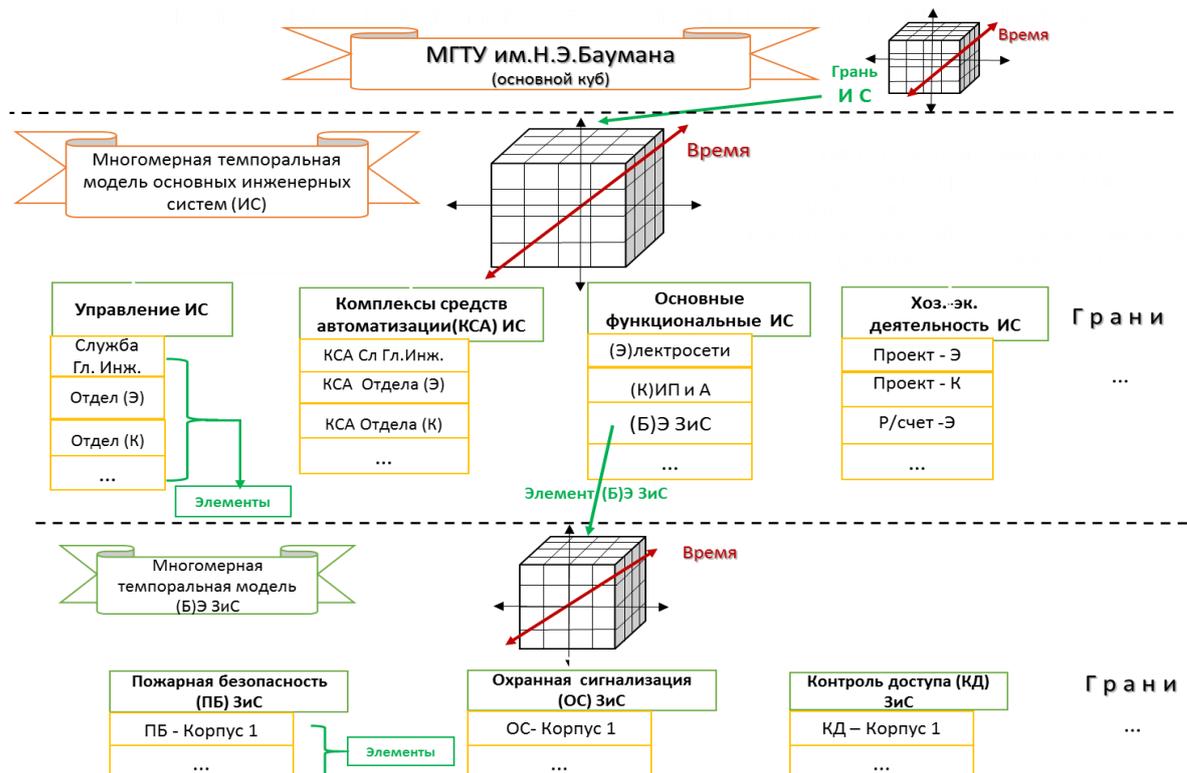


Рис. 6 – Пример реализации представленной методологии для декомпозиции инженерных систем МГТУ им. Н. Э. Баумана.

Применяя данную методологию к объектам избранной предметной области, мы получим коллекцию иерархически связанных M/S-отношением («Master /Slave») представлений сущностей, элементы которых обладают однородными свойствами,

измеряемыми по некоторой «мере». Программная реализация данной методологии выполнена в составе Инструментальной программной платформы (ИПП) «ПОЛИКУБ» [4], включающей средства интерактивного конструирования цифровых двойников (*DT-Конструктор*), представления и анализа состояния предметной области средствами (*DT-Диспетчер*), а также защищенного хранения первичных и вторичных данных в многомерных темпоральных банках данных Интегрированного хранилища информации.

IV. Модель функционирования Банков данных первичной и вторичной информации в составе ИХИ

Структурно-функциональная схема Интегрированного хранилища информации полного состава приведена на Рис. 7.

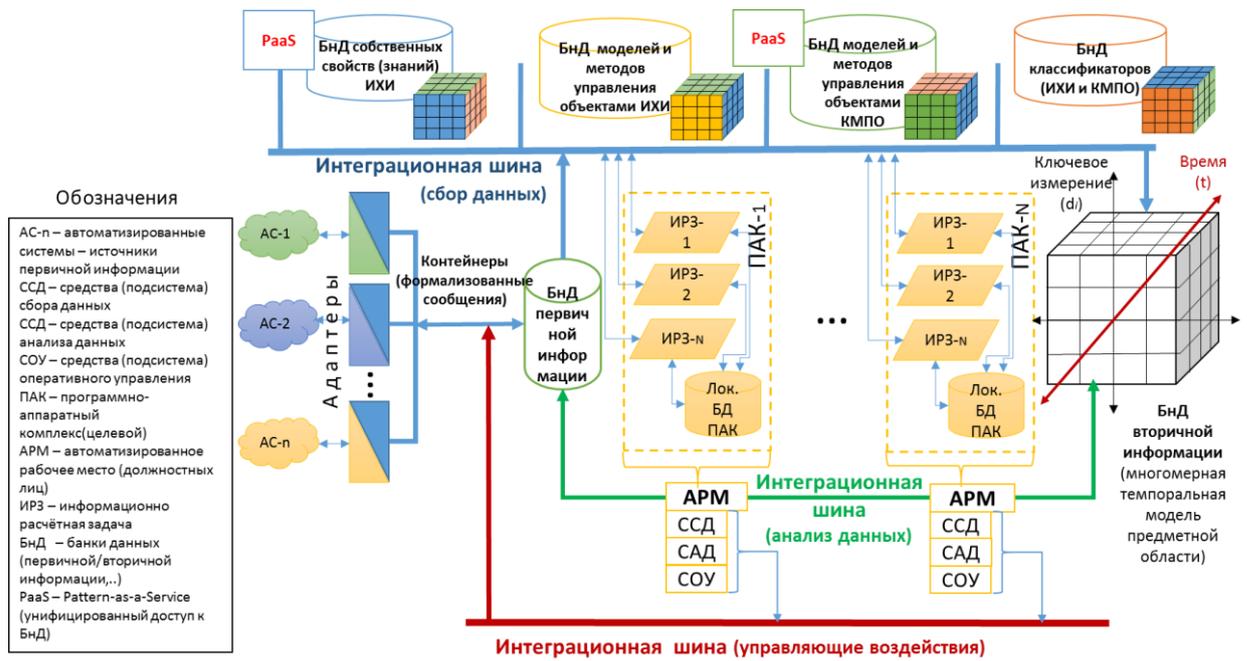


Рис. 7 – Структурно-функциональная схема ИХИ.

ИХИ включает:

БнД первичной информации (БнД ПИ) – систематизированное хранилище *Контейнеров*, содержащих данные различных типов (сообщения об отдельных событиях – изменении состояния предметной области, получаемые от внешних источников – автоматизированных систем (АС-1,2,...n)). *Контейнеры* формируются в программных *Адаптерах* сопряжения с внешними источниками (на схеме – слева) и помещаются в БнД ПИ. Количество адаптеров соответствует количеству сопрягаемых систем. Каждый адаптер порождает контейнеры различных типов (как показано на Рис. 4) на основе обработки потока событий по протоколам, принятым в сопрягаемой системе. Время хранения контейнеров в БнД ПИ не ограничено. Корректировка первичной информации в БнД ПИ исключена (во избежание нарушения причинно-следственных связей и темпоральных зависимостей между отдельными событиями).

БнД вторичной информации (БнД ВИ) – объектно-ориентированная БД, построенная на основе многомерной темпоральной *DT-модели* предметной области (КМПО). Количество ключевых измерений предметной области – не ограничено [11]

(например, для КМПО:= РФ ключевыми измерениями являются – «Система управления», «Образование», «Здравоохранение», «Промышленность» и др.). Первичным измерением (на Рис. 7 выделено красным цветом) всегда является *модельное время*, манипулирование которым позволяет решать задачи анализа состояния, ситуационного моделирования и управления объектами предметной области.

Поддержание в актуальном состоянии *DT-модели* предметной области обеспечивается посредством распаковки контейнеров и корректировки иерархических структур, представляющих каждое ключевое измерение – ось. Ось «Образование», к примеру, может содержать всю иерархию объектов – от структуры Министерства образования и науки до первичного образовательного учреждения. В процессе распаковки содержимого контейнера возможно критическое изменение свойств объектов оси, либо изменение структуры моделируемой предметной области.

В обоих случаях средствами ИХИ обеспечивается автоматический запуск программ-сценариев, которые порождают соответствующую индикацию на оси, трактуемую как изменение состояния «цифрового двойника».

Темпоральная база данных вторичной информации обеспечивает хранение всех поколений состояния объектов модели: в прошлом, настоящем и будущем.

БнД собственных свойств (знаний) ИХИ – содержит описание ИХИ – как *DT-модели*, доступ к данным обеспечивается унифицированными API-вызовами, ориентированными на предоставление унифицированных сервисов работы с шаблонами документов и сообщений с использованием тематических витрин данных (PaaaS). Банк включает полную конструкторскую документацию и программную реализацию всех технологий и решений, применяемых в процессе создания и функционирования ИХИ. Включению в состав Банка также могут подлежать другие компоненты (сторонних разработчиков), обладающие свойством экстремальности, т.е. обеспечивающие достижение *экстремума* (max/min) показателей функциональных характеристик при их применении в составе конечных (прикладных) систем.

БнД классификаторов (ИХИ и КМПО) – включает нормативно-справочную информацию, унифицированные формы документов, системные классификаторы, необходимые для функционирования всех структурных элементов ИХИ и КМПО. Наполнение содержимым этого банка данных может производиться с применением онтологий, обеспечивающих структуризацию системы понятий предметной области и их единую интерпретацию (семантическое отождествление) при обработке контейнеров - сообщений (Рис. 4), поступающих от адаптеров сопряжения с внешними источниками: АС-1,2,...n. (Рис. 7). Локальный и удаленный доступ к информационным ресурсам этого банка обеспечивается посредством публикации соответствующих сервисов на специализированных витринах данных.

Локальные БД – включают множество информационных ресурсов, необходимых для работы информационно-расчетных задач в составе специального программного обеспечения контроля и управления производственными процессами в составе прикладных программно-аппаратных комплексов (ПАК). Оператором локальных БД является служба эксплуатации ИХИ. Удаленный доступ к содержимому локальных БнД исключен.

БнД моделей и методов управления объектами ИХИ – включает программную реализацию унифицированных моделей и методов изменения структуры и свойств собственных (общесистемных) компонентов ИХИ. Доступ к содержимому Банка

обеспечивается посредством унифицированных API-вызовов, ориентированных на предоставление сервисов работы с шаблонами программных методов (функций), представленных на тематических витринах данных (PaaS). Операторами Банка являются системные администраторы и администраторы безопасности ИХИ, определяющие состав методов, регламент доступа и политику безопасности при работе с ресурсами (данными и сервисами). Обеспечивается удаленный / локальный доступ к программным сервисам – методам в синхронном и асинхронном режимах. Пополнение и корректировка Банка реализуется его оператором или (по согласованию) – внешней организацией, обеспечивающей авторское и научно-методическое сопровождение ИХИ.

БнД моделей и методов управления объектами КМПО – включает программную реализацию прикладных моделей и методов обработки содержимого тематических контейнеров – сообщений об изменениях свойств объектов предметной области (Рис. 4). Порядок доступа к содержимому Банка аналогичен описанному выше (для БнД моделей и методов управления объектами ИХИ). Дополнительно в Банке могут содержаться внешние ссылки – для удаленного вызова (как сервисов) программных модулей сторонних разработчиков, реализующих специальные модели и методы обработки потока событий предметной области.

АРМ конечных пользователей, дополнительно к комплексам сбора, анализа данных и оперативно-диспетчерского управления, оснащаются программными средствами *DT-Конструктора / DT-Диспетчера* «цифровых двойников» для взаимодействия со всеми Банками данных ИХИ по встроенной Интеграционной шине (Рис. 7) и реализации 2-х контурной схемы управления, как показано на Рис. 3.

Дальнейшее развитие и конкретизация теоретических и прикладных аспектов, изложенных в данной статье, содержится в работах [3 и 4].

Заключение

В статье рассмотрены общие подходы к решению первых трех вопросов (*Q1*, *Q2*, *Q3*), сформулированных в качестве актуальных для современного этапа развития AI-теории. Конкретизация общепринятой терминологии [1], в частности понятий «Знание» / «Информация» / «Данные» и их сопоставление с новым термином – «Цифровых двойников» – *информационных контейнеров знаний (Q1)*, позволяет выполнить структуризацию информационного пространства, представленного как продукт (результат) объективизации *первичного субстрата* – знаний. Одновременно достигается решение вопроса (*Q2*) о структуре, оценке мощности и метризуемости информационного пространства, представленного в виде рекурсивно определяемого, частично упорядоченного множества элементов – коллекции «цифровых двойников» (*DT-коллекции*).

Возможность целостного представления знаний о предметной области в виде *DT-коллекции* и ее отображение на уровень логической и физической структуры данных (*Q3*) обеспечивается применением *многоаспектной рекурсивной декомпозиции*, как общего методологического подхода к формированию концептуальной модели предметной области.

Практическая реализация данного подхода и его применение в составе автоматизированных систем управления предполагает поддержание жизненного цикла создания и функционирования «цифровых двойников» в составе Интегрированного хранилища информации, реализующего 2-х контурную схему (модель) управления объектами предметной области.

Качество целенаправленных процессов [12] наблюдения (мониторинга) и управления в 2-х контурной схеме «существенно» зависит от полноты представления знаний об объектах предметной области в информационном пространстве *DT-коллекции*. На основе предложенного когнитивного подхода может быть введена количественная оценка (*мера*) полноты представления знаний в информационном пространстве. Более подробно вопрос (*Q4*) о достижении гарантируемого (не ниже заданного уровня) качества целенаправленных процессов наблюдения и управления объектами предметной области на основе *когнитивного* подхода с использованием т.н. *сферической* и *атрибутивной* меры в информационном пространстве рассмотрен в работе [3].

Благодарности

Авторы выражают признательность Л. С. Куликову и В. А. Минаеву за научно-методическое сопровождение исследований и непосредственное участие в обсуждении актуальных вопросов разработки и применения «цифровых двойников» в составе автоматизированных систем управления.

Список источников

1. ГОСТ Р ИСО 704 – 2010 Терминологическая работа. Принципы и методы.
2. Здирук К. Б., Толпыгин А. С., Гречанюк Ф. А., Ханьгин А. Н. Цифровые модели объектов и модели данных в решении задач управления [Электронный ресурс] // Экстремальные технологии и системы URL: <https://www.extansy.com/> (дата обращения 12.02.2019).
3. Здирук К. Б., Толпыгин А. С., Гречанюк Ф. А. Формальное определение меры представления знаний в информационном пространстве на основе когнитивного подхода [Электронный ресурс] // Экстремальные технологии и системы URL: <https://www.extansy.com/> (дата обращения 21.03.2019).
4. Здирук К. Б., Гречанюк Ф. А., Кузьминов И. М., Толпыгин А. С. Реализация методов конструирования цифровых двойников инженерных систем в среде Инструментальной программной платформы «ПОЛИКУБ» [Электронный ресурс] // Экстремальные технологии и системы URL: <https://www.extansy.com/> (дата обращения 12.03.2019).
5. Выхованец В. С. Информационная система с понятийной моделью предметной области / В. С. Выхованец // Об Управление большими системами. -2017 г. Вып. 66. с. 25-67.
6. Труфанов С. Н. Грамматика разума – Самара.: Гегель-фонд, 2003. – 624с.
7. Каширин Д. И., Каширин И. Ю. Модели представления знаний в системах искусственного интеллекта. [Текст] Вестник РГРТУ. № 1 (выпуск 31). Рязань, 2010.
8. Караваев Н. Л. Знание и информация как необходимые компоненты познавательного процесса: взаимоотношения и взаимопереходы [Текст] : дис. ... канд. филос. наук: 09.00.01 / Киров, 2009. – 196 с.: ил. РГБ ОД, 61:09-9/532.
9. Здирук К. Б. Применение цифровых двойников в системах управления сложными объектами [Электронный ресурс] // Экстремальные технологии и

системы URL: <https://www.extansy.com/> (доклад-презентация, дата обращения 04.02.2019).

10. Савчук В. Л. Электронные средства сбора и обработки информации [Электронный ресурс] / В. Л. Савчук. – Режим доступа: <http://www.i.e.tusur.ru/books/COI/index.htm>, - свободный (дата обращения 26.02.2009).
11. Гречанюк Ф. А., Здирук К. Б., Толпыгин А. С. Киберконтракт как инструмент регулирования гражданско-правовых отношений в цифровой экономике. XVI Всероссийская научная конференция «Нейрокомпьютеры и их применение». Программа конференции – М: ФГБОУ ВО МГППУ, – 32 с.
12. Петухов Г. Б., Якунин В. И. Методологические основы внешнего проектирования целенаправленных процессов и целеустремленных систем. – М.: АСТ, 2006. – 504 с.
13. Ontology Summit 2013 Communique. Towards Ontology Evaluation across the Life Cycle. Current Version is: v1.0.4 - 2013.05.31. [Электронный ресурс] / – Режим доступа: http://ontolog.cim3.net/cgi-bin/wiki.pl?OntologySummit2013_Communique.
14. Т. И. Агеев и др. Информационная управляющая система МГТУ им. Н.Э. Баумана «Электронный университет»: концепция и реализация. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. – 376 с.