

ЦИФРОВЫЕ МОДЕЛИ ОБЪЕКТОВ И МОДЕЛИ ДАННЫХ В РЕШЕНИИ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ

Здирук К. Б.¹, Толпыгин А.С.², Гречанюк Ф. А.³, Ханьгин А. Н.⁴

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

⁴АО «РТСофт» (г. Москва), khanygin_an@rtsoft.msk.ru

Аннотация

Статья содержит анализ технологии «цифровых двойников» («Digital Twin», англ., далее – DT), как ключевого элемента в наборе инструментальных средств цифровой трансформации процессов управления производством. Рассмотрены проблемные вопросы создания «цифровых двойников» и их коллекций на основе известных методов концептуального моделирования (представления) сущностей – элементов абстрактной предметной области. Предложены подходы к решению актуальных задач комплексной оценки состояния и управления функционированием промышленных объектов.

Ключевые слова: цифровые двойники, концептуальное моделирование, информационные контейнеры знаний, многомерные темпоральные базы данных

1. Объективные предпосылки цифровой трансформации и оценки достигнутого уровня реализации

Непрерывный прогресс технологий компьютерной сферы с неизбежностью порождает противоречие между функциональными возможностями все новых поколений вычислительной техники и достигнутым уровнем наших представлений о способах ее применения для решения актуальных задач автоматизации. Можно констатировать, что взрывной рост объёмов и многообразия обрабатываемых данных автоматически не приводит к переходу «от количества данных к принципиально новому качеству» процессов принятия решений.

Оценивая применимость новых технологий цифровой трансформации, следует учитывать и негативные факторы – определенную избыточность накопленного терминологического аппарата, формальную неопределенность (размытость) используемых понятий, – как результат маркетинговых усилий разработчиков в продвижении своей продукции. Неправомерное отождествление различных по своему содержанию понятий на практике приводит к тому, что, например, применение известных технологий «Big Data» для цифрового представления моделируемых объектов, оказывается неэффективным, главным образом потому, что, так называемые, первичные данные в концепции «Industry-Internet-of-Things» (IIoT), собираемые на промышленных объектах от IIoT-источников, как

исходное «сырье» для последующего применения технологий «Big Data» – являются зачастую информационным мусором, непригодным для непосредственного анализа и выявления причинно-следственных связей между структурными элементами (объектами и процессами) заданной предметной области. Как результат, непосредственный анализ первичных данных ПоТ – источников, разумно применять в системах реального времени, где размерность данных ограничена, для большинства остальных систем он малопродуктивен.

Возможным решением данной проблемы может быть применение Интегрированных хранилищ информации (ИХИ) [2], включающих, кроме сбора и анализа первичных данных от ПоТ – источников, средства объектного представления предметной области в виде коллекций «цифровых двойников» («Digital Twin Collection», англ., далее – DTC), с описанием структуры, состава объектов, их свойств, а также известных отношений (связей) между ними. Перспективные технологии организации ИХИ должны включать, наряду с поддержкой ПоТ, «Big Data» (первичных данных), специальные технологии формирования банков данных вторичной информации (знаний), содержащих коллекции «цифровых двойников», а также методы их систематизированного описания (конструирования) и логико-аналитической обработки. Применяя (только) средства накопления и анализа первичных данных от ПоТ – источников, мы лишь наблюдаем текущее состояние объектов, но не можем воссоздать в программной среде достаточно полное операционное пространство, реальных и мнимых событий для отработки на «цифровых двойниках» всего комплекса, включая угрозы физическим объектам (процессам) рассматриваемой предметной области. Это, как мы увидим далее, связано с проблемой переноса в вычислительную среду сложившихся субъективных представлений (знаний) о состоянии всей системы управления и их объективизации на уровне концептуальной модели предметной области (КМПО), обладающей, в том числе, и темпоральными (временными) свойствами.

Возникающий, при этом, вопрос – о достаточности инструментальных средств современных промышленных СУБД для адекватного отображения КМПО на уровни логической и физической организации данных предполагает уточнение интенционалов понятий «Знание», «Информация», «Данные», а также их соотношения с вновь введенным понятием «Цифровые двойники» – как информационных контейнеров знаний, размещенных на оси времени.

Существенным также представляется ответ на вопрос о структуре и метризуемости пространства знаний и информационного пространства, а также о возможности формального задания отношений между их элементами. Методический подход к поиску ответов на поставленные вопросы, содержится в работах [2, 3] где, в частности, предлагается когнитивный подход к определению меры в информационном пространстве, а также обосновывается утверждение о принципиальной возможности сведения всех процессов обработки поступающего информационного потока первичных данных (от ПоТ – источников) к последовательности элементарных операций в заданном базисе над «цифровыми двойниками» – элементами Банка данных вторичной информации, как непротиворечивой совокупности объективизированных знаний о предметной области.

В целом, в качестве предпосылок цифровой трансформации в промышленной сфере следует отметить не только практические аспекты реализации упомянутых выше концепций (ПоТ, «Big Data», ДТ, ИХИ и др.), но и их теоретическое обоснование – изучение

свойств включающего информационного пространства, как среды функционирования «цифровых двойников» промышленных объектов (процессов), представленных в виде множества информационных контейнеров знаний.

Рассмотрев существующие предпосылки цифровой трансформации, перейдем далее к анализу достигнутого уровня ее реализации в составе современных технологий автоматизации производства.

Основными локомотивами т.н. четвертой промышленной революции, как известно, являются промышленные лидеры – США, Германия, Япония, Китай, Южная Корея и др., реализующие в рамках концепции Industry 4.0 качественный скачок в интеллектуализации следующих направлений:

- управление производственными процессами;
- управление жизненным циклом оборудования и выпускаемой продукции;
- логистика и рациональное управление ресурсами;
- проектирование новых процессов (цепочек) создания стоимости;
- контроль качества конечной продукции;
- производительное использование персонала (особенно актуально для РФ, в условиях сложившегося дефицита квалифицированного кадрового ресурса).

Одним из ключевых инструментов Industry 4.0 является интеграция «киберфизических систем» («Cyber Physical System», англ., далее – CPS), в производственные процессы, в этой связи разработка и применение коллекций «цифровых двойников» для промышленных объектов и процессов, а также обслуживающего их персонала, – есть инструмент практической реализации целей четвертой промышленной революции.

Следует отметить, что реализация концепции Industry 4.0 предполагает не только цифровизацию отдельных функций по сбору и обработке первичных данных от различных IoT-источников, но также промышленное производство (конструирование) «цифровых двойников» для произвольных объектов предметной области – сущностей и/или их типизированных коллекций. По данным консалтинговой компании Gartner – технология «Digital twins» включена в десятку главных стратегических технологических трендов [1].

На начальном этапе формирования взглядов специалистов на DT-технологии под «цифровым двойником» понималось компьютерное трехмерное (3D) представление конкретного физического изделия, группы изделий, механического или технологического процесса, включающего пространственную геометрию, технические характеристики, параметры работы, условия эксплуатации, взаимодействие с другими изделиями, а также данные предиктивной аналитики, в том числе, по прогнозированию отказов и сбоев (Рис. 1).

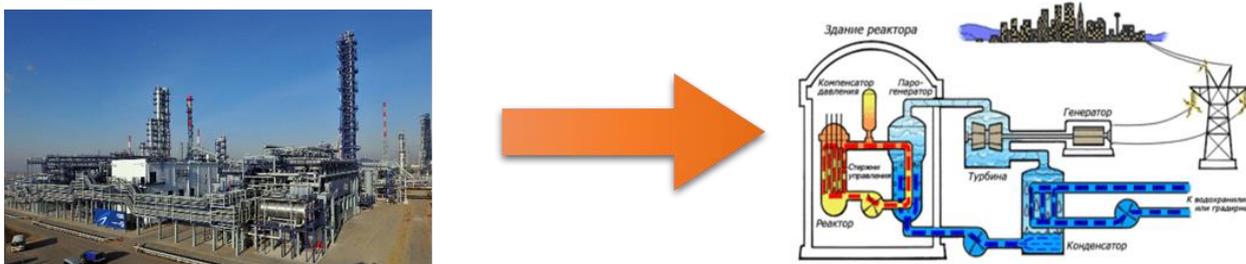


Рис. 1 – Начальный этап представления физических объектов их «цифровыми двойниками»

Современные взгляды на возможные реализации DT-технологии не требуют обязательного наличия пространственной (3D) визуализации физического прообраза, поскольку DT-прототипами могут выступать произвольные предметы (сущности) – объекты живой и неживой природы, социальные структуры, процессы, развивающиеся в пространственно-временном континууме.

Определение 1: В общем случае, под цифровым двойником будем понимать программный (виртуальный) аналог реального физического объекта или процесса, воспроизводящий его структуру, состояние, а также динамику их изменения во времени. ■

В соответствии с современной концепцией DT, «цифровые двойники», порождаемые специально разработанными программными средствами в автоматическом или автоматизированном режимах, функционируют самостоятельно в распределенной компьютерной среде как целостная совокупность адекватных моделей состояния, поведения и управления реальными (физическими) сущностями-прототипами на заданном интервале времени (прошлом настоящем, будущем), либо в составе гибридных структур, включающих как объекты реального мира, так и их цифровое представление (Рис. 2).

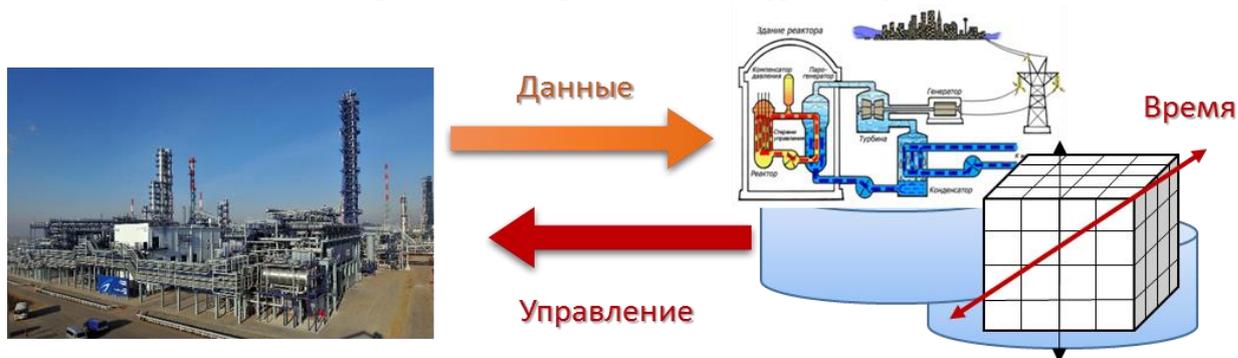


Рис. 2 – Современные подходы к применению «цифровых двойников» в киберфизических системах

Наличие «цифрового двойника» (и их коллекций) помогает организовать связь изделия с подключенными к нему объектами – источниками данных, программным обеспечением, отвечающим за управление изделием, контроль рабочего состояния, процессов эксплуатации и т.д. на всем интервале жизненного цикла.

Примечание 1: Концепция применения «цифровых двойников», как показано в работе [2], не сводится к решению задач проектирования (прототипирования) неких физических объектов (процессов). Наоборот, проектирование – есть одна из форм познания объективного мира, как объекта наблюдения [5, 2]. Результатом проектирования (как акта познания), в этом случае, является сам «цифровой двойник» или коллекция «цифровых двойников».

2. Проблемные вопросы создания средств конструирования «цифровых двойников» объектов и процессов предметной области

Есть все основания предполагать, что в ближайшие 5-10 лет основные усилия лидеров IT-отрасли будут направлены на создание промышленных технологий массового формирования и применения «цифровых двойников», как одного из системообразующих

элементов цифровой трансформации в рамках концепции Industry 4.0. Только на основе разработки множества адекватных реальным прототипам цифровых двойников возможно объединение всех ранее разработанных систем и моделей, используемых для эффективного планирования и управления производством высокотехнологичной продукции.

К настоящему времени отсутствуют универсальные решения массового производства (конструирования) «цифровых двойников» для абстрактных сущностей – объектов и процессов, относящихся к общим определениям классов «Природа» / «Человек» [6], т.е. имеющих, соответственно, естественное или искусственное происхождение. Исключая из рассмотрения объекты и процессы, относящиеся к классу «Природа», можно утверждать, что современный уровень достижений в области цифровизации физических объектов (процессов) искусственного происхождения представлен, в основном, средствами промышленной автоматизации современных АСУ ТП.

Ниже (Рис. 3) показаны преимущества перехода к перспективной модели управления промышленными объектами на основе применения технологии «цифровых двойников» [7].

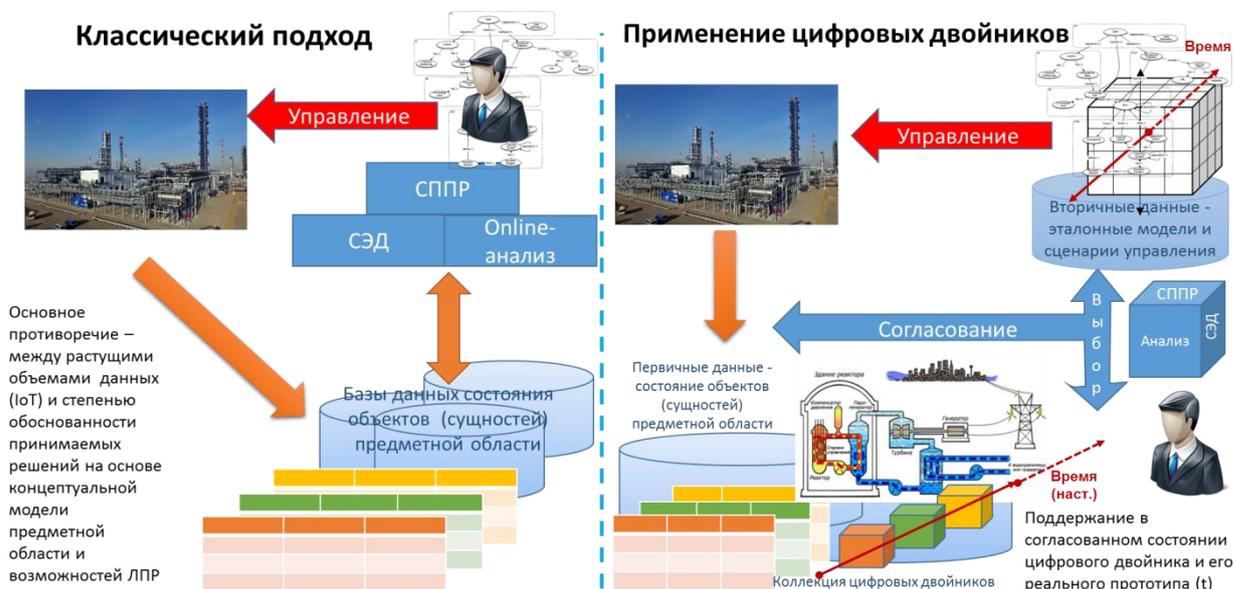


Рис. 3 – Представление классической (слева) и цифровой (справа) модели управления объектами

Развитие технологий промышленного «интернета вещей» (IoT / IIoT) на практике порождает противоречие между растущими объемами собираемых данных о состоянии предметной области и эффективностью управленческих решений, принимаемых на основе сопоставления концептуальной модели («сущность-связь») с результатами интерпретации содержимого Базы (первичных) данных. Как было отмечено ранее, рост объёмов и многообразия накапливаемых средствами IoT / IIoT первичных данных автоматически не гарантирует переход к принципиально новому уровню качества принятия управленческих решений и, соответственно, достижения заданных значений показателей эффективности их реализации.

Ключевой проблемой здесь являются объективные (биологически обусловленные) ограничения для лиц, принимающих решения (ЛПР), возможности воспринимать все возрастающие объемы разнородных данных о состоянии объектов управления, операционной среды, ресурсном обеспечении и т.д. – составляющих компонентов единого

операционного пространства (ОП). Интерпретация первичных Данных с переходом на уровень Информации о состоянии объекта(ов) управления и, наконец, к Знанию об ОП для ЛПР также связана с субъективными и объективными ограничениями, что в итоге формирует в сознании ЛПР неполное / искаженное Представление об объекте управления (на левой части Рис. 3 показано в виде сетеиерархического слоя поверх изображения ЛПР – источника управляющего воздействия).

На правой части Рис. 3 сетеиерархический слой Представлений ЛПР об объекте управления помещен в сегмент коллекции «цифровых двойников» (DT-коллекции) Банка данных вторичной информации (БнД ВИ), который включает также другие сегменты, представляющие различные аспекты-границы накопленных Знаний об ОП в целом [2].

На Рис. 4 представлена структура операционного пространства, включающего элементы:

S – объект управления;

E – операционную среду (функционирования);

U – орган (субъект) управления;

D – злонамеренное (деструктивное) воздействие (в том числе, возможно, включая сам источник);

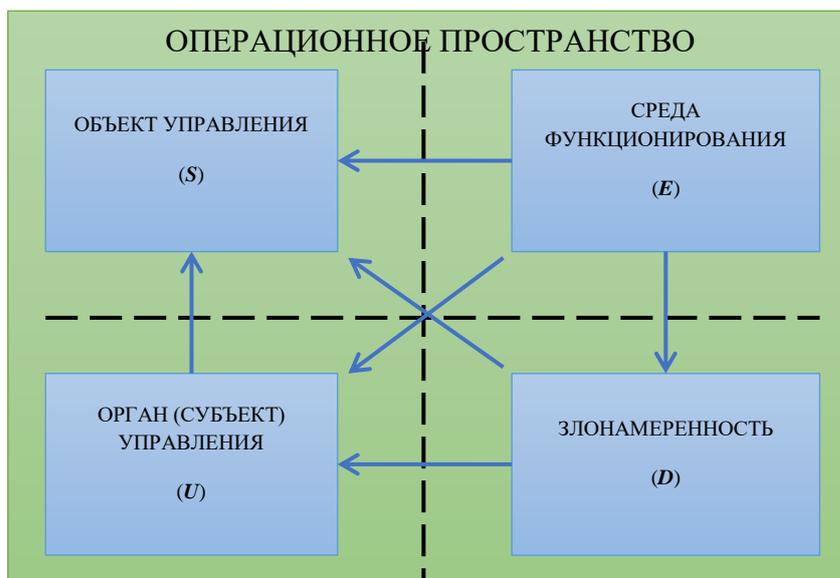


Рис. 4 – Структура операционного пространства

Стрелками показаны возможные направления существенных (с точки зрения анализа) воздействий (связей) между элементами ОП.

Пусть (S, P) – частично-упорядоченное (по критерию предпочтения) множество возможных состояний объекта управления, где

$S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ – конечное множество, P – порядок, заданный на нем.

Управляющее воздействие вида

$$U_{t_{i+1}} \stackrel{\text{def}}{=} F \left(\left[S_{t_i} \xrightarrow[\Delta(t)]{R} S_{t_{i+1}} \right], \mathbb{K}_{t_i} \right) \quad (1)$$

переводит в течение заданного интервала времени $\Delta(t) = t_{i+1} - t_i$ объект управления из состояния S_{t_i} в состояние $S_{t_{i+1}}$, затрачивая ресурсы R , при этом в качестве цели

управляющего воздействия выступает соответствие критерию $S_{t_{i+1}} \geq S_{t_i}$ при заданных ограничениях на $\{R, \Delta(t)\}$.

Параметр $\mathbb{K}_{t_i} = \langle I(S_{t_i}), I(E_{t_i}), I(D_{t_i}), I(U_{t_i}) \rangle$, представляет собой *объективизированные Знания* [2], накопленные к моменту времени t_i (в «цифровых двойниках» – информационных контейнерах знаний), как результат субъективной интерпретации $I(\cdot)$ сведений о состоянии объекта управления S_{t_i} , операционной среды E_{t_i} , (возможного) злонамеренного воздействия D_{t_i} и самого органа управления U_{t_i} .

Результативность управляющего воздействия вида (1) можно оценить условной вероятностью достижения цели $P_{\text{дц}}$ при наличии / отсутствии в распоряжении ЛПР совокупности накопленных к моменту времени t_i *Знаний*, содержащихся в коллекции «цифровых двойников», представленной в виде случайной величины $\widehat{\mathbb{K}}_{t_i}$, распределенной в интервале $[0, 1]$.

$$P_{\text{дц}}(\mathbb{K}_{t_i}) \stackrel{\text{def}}{=} P\left(\left[S_{t_i} \xrightarrow[\Delta(t)]{R} S_{t_{i+1}} \right] / \widehat{\mathbb{K}}_{t_i} \right) \quad (2)$$

При $\mathbb{K}_{t_i} = 0$ имеет место классический подход к оценке результативности управляющего воздействия в условиях стохастической неопределенности ЛПР относительно состояния элементов операционного пространства: $S_{t_i}, E_{t_i}, D_{t_i}, U_{t_i}$ в момент времени t_i .

При $\mathbb{K}_{t_i} = 1$ имеет место полная осведомленность ЛПР, т.е. *Истина* – «тождество предмета своему понятию» [6], обеспечивающая *гарантированное* достижение цели управляющего воздействия при переводе объекта из текущего состояния S_{t_i} в предпочтительное $S_{t_{i+1}}$.

Обозначив $\Delta(\mathbb{K}_{t_{i+1}}) = \mathbb{K}_{t_{i+1}} - \mathbb{K}_{t_i}$, сформулируем (тривиальное) утверждение о том, что в условиях снижения стохастической неопределенности и рационального поведения ЛПР, имеет место следующее соотношение:

$$P_{\text{дц}}(\mathbb{K}_{t_{i+1}}) \geq P_{\text{дц}}(\mathbb{K}_{t_i}), \text{ при } \Delta(\mathbb{K}_{t_{i+1}}) > 0 \quad (3)$$

Дальнейшее исследование зависимости $\Delta(P_{\text{дц}_{t_{i+1}}}) = P_{\text{дц}}(\mathbb{K}_{t_{i+1}}) - P_{\text{дц}}(\mathbb{K}_{t_i})$ от $\Delta(\mathbb{K}_{t_{i+1}})$ предполагает введение когнитивной меры в пространстве объективизированных *Знаний* $\mathbb{K} = \langle I(S), I(E), I(D), I(U) \rangle$.

Подходы к решению данной задачи рассмотрены в работах [2, 3].

3. Применение технологии «цифровых двойников» в задачах поддержки принятия решений и управления функционированием промышленных объектов

Предполагается, что технологии «цифровых двойников» могут применяться в составе АСУ ТП, как составной элемент систем поддержки принятия решений и управления функционированием промышленных объектов. Рассмотрим возможные подходы к решению ряда актуальных задач (ниже обозначены как **3-1**, **3-2**, **3-3**, **3-4**), возникающих в процессе применения систем данного класса.

3-1: Оценка текущего состояния и потенциала совершенствования (модернизации) реального (физического) объекта по его «цифровому двойнику».

Для оценки текущего состояния и потенциала модернизации реального (физического) объекта в условиях заданного операционного пространства представляется целесообразным рассмотреть подход, основанный на вычислении показателя внутренней конфликтности, содержащийся в работах [10, 11].

В работе [10] обосновывается использование новой системной характеристики, – *внутренней конфликтности* для оценки текущего состояния и потенциала развития некоторой технической системы. Предлагаемая количественная мера – *показатель конфликтности* внутренних процессов, может вычисляться средствами контроля и управления функционированием системы, что может служить объективной основой для принятия решений по ее целенаправленному совершенствованию (модернизации) или замене.

Распространенной методической ошибкой при оценке состояния сложных технических систем является рассмотрение их поведения на интервале времени, сравнительно малом по отношению к общему периоду эксплуатации. На практике это приводит к тому, что результаты и сроки эксплуатации систем с явно выраженными этапами жизненного цикла зачастую противоречат теоретическим прогнозам. Фактически на этапе внедрения система (отдельные ее компоненты) успевает устареть, к тому же потенциал развития, заложенный при проектировании, оказывается явно недостаточным. Предлагаемая в работе [11] количественная мера – *показатель внутренней конфликтности*, в абсолютном и относительном выражении может формироваться (вычисляться) средствами функционального контроля АСУ ТП для каждого, произвольно заданного момента времени на всем интервале эксплуатации.

В настоящее время известен общий вид (Рис. 5) зависимости изменения параметров технической системы от времени, но внутренние механизмы, формирующие именно такой вид зависимости, вскрыты еще далеко не полностью.

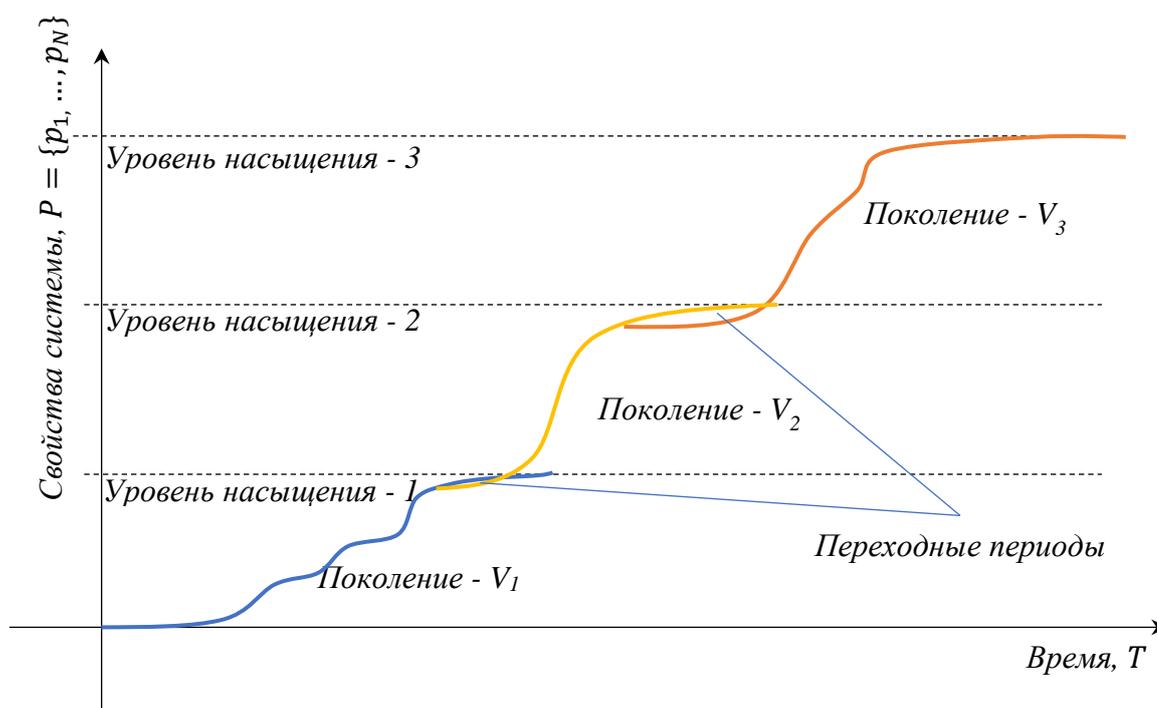


Рис. 5 – Зависимость системных параметров от времени

На произвольном интервале наблюдений переход системы от одного состояния к другому рассматривается как результат разрешения ее внутренних противоречий (по уровням – сверху-вниз):

- 1) между требованиями к системе и ее возможностями;
- 2) между составом элементов и способом их организации в системе;
- 3) между количеством доступных системных ресурсов и потребностями в них в произвольный момент времени.

Примечание 2: Для объектов в составе сложных технических систем внутренняя противоречивость закладывается на этапе их проектирования и разработки (определения архитектуры, интерфейсов взаимодействия, выбора средств общего и общесистемного программного обеспечения и т.д.).

Совокупное действие противоречий высших уровней может быть представлено количественными характеристиками массы противоречий нижнего (3-го) уровня, внешним проявлением которых служат конфликты (конфликтные ситуации) при доступе соперничающих процессов обработки поступающих требований-запросов к совместно используемым ресурсам.

Разрешение противоречий в процессе функционирования отдельного средства вычислительной техники возлагается на его орган управления – операционную систему, а для автоматизированной системы – на средства контроля и управления её функционированием. Функционирование абстрактного технического объекта, в таком случае, можно рассматривать как непрерывный процесс возникновения и разрешения конфликтов, как показано на Рис. 6 (здесь: {А, Б, В, ... , М} – множество процессов; {х, у, ... , z} – совместно используемые ресурсы).

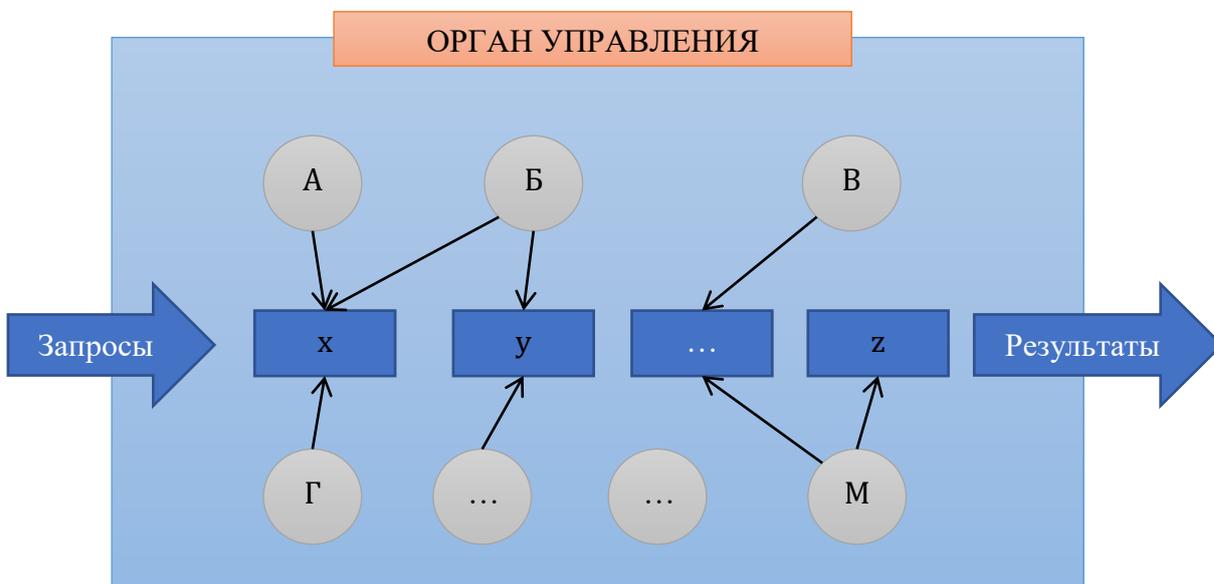


Рис. 6 – Схема функционирования элементов объекта КИИ

В условиях возрастания нагрузки, относительная производительность системы (соотнесенная с накладными расходами на организацию ее работы), снижается, хотя в абсолютном выражении она может возрастать. Этот эффект обусловлен тем, что при увеличении интенсивности входного потока **внутренняя конфликтность системы**

растет быстрее объема выполненной полезной работы. Дальнейшее увеличение производительности будет постоянно сдерживаться ростом внутренней конфликтности системы, пока не прекратится совсем (уровни насыщения см. Рис. 5). Потенциал развития (в рамках данного способа структурной организации) исчерпан, жизненный цикл эксплуатации системы считается завершенным.

Таким образом, функционирование системы рассматривается как непрерывный процесс возникновения и разрешения внутренних противоречий (конфликтных ситуаций).

Регистрируя факты возникновения конфликтных ситуаций, можно следить за текущим состоянием системы. Для этого используется показатель ее внутренней конфликтности $\Pi_{\text{КФ}}$, определенный как интенсивность (частота) возникновения конфликтных ситуаций, методика расчета которого базируется на модели соперничества процессов за некоторый конечный набор совместно используемых ресурсов из имеющихся в системе.

Для комплексной оценки состояния конкретного экземпляра – образца системы (на произвольный момент времени) могут применяться два показателя конфликтности: текущий – $\Pi_{\text{КФ}}^T$ и предельно допустимый – $\Pi_{\text{КФ}}^{\text{lim}}$ (при достижении которого система перестает удовлетворять заданным требованиям). Поэтому, имеет смысл рассматривать относительное значение показателя конфликтности:

$$\Pi_{\text{КФ}}^0 = \frac{\Pi_{\text{КФ}}^T}{\Pi_{\text{КФ}}^{\text{lim}}} \quad (4)$$

Потенциал развития системы, в этом случае, может быть представлен в виде:

$$\Pi_p = 1 - \Pi_{\text{КФ}}^0 = \frac{\Pi_{\text{КФ}}^{\text{lim}} - \Pi_{\text{КФ}}^T}{\Pi_{\text{КФ}}^{\text{lim}}} \quad (5)$$

Преимущество новой (более совершенной) системы по отношению к существующей заключается в том, что ее относительное значение показателя конфликтности $\Pi_{\text{КФН}}^0$ на этапе смены поколений не превосходит аналогичное значение $\Pi_{\text{КФС}}^0$ унаследованной системы, то есть всегда имеет место:

$$\frac{\Pi_{\text{КФН}}^T}{\Pi_{\text{КФН}}^{\text{lim}}} \leq \frac{\Pi_{\text{КФС}}^T}{\Pi_{\text{КФС}}^{\text{lim}}} \frac{\Pi_{\text{КФН}}^T}{\Pi_{\text{КФН}}^{\text{lim}}} \leq \frac{\Pi_{\text{КФС}}^T}{\Pi_{\text{КФС}}^{\text{lim}}} \quad (6)$$

Это соотношение фиксирует направленность развития систем и носит достаточно общий характер [11].

Примечание – 3: Вообще говоря, показатель конфликтности может быть представлен в виде вектора размерности $\langle N \rangle$:

$$\Pi_{\text{КФ}\langle N \rangle} = \langle R_{\text{КФ}_1}, R_{\text{КФ}_2}, \dots, R_{\text{КФ}_N} \rangle \quad (7)$$

где $R_{\text{КФ}_i}$ – уровень конфликтности системы, складывающийся при работе с ресурсами i -го вида ($i = 1(1)N$). Может быть применена и свертка показателя конфликтности $\Pi_{\text{КФ}}$, то есть представление его в виде:

$$\Pi_{\text{КФ}} = \sum_{i=1}^N \alpha_i * R_{\text{КФ}_i} \quad (8)$$

где α_i – «вес» i -го ресурса в оценке уровня внутренней конфликтности.

Предлагаемый подход, как представляется, применим на этапе технического проектирования, при решении задач оценки потенциала развития проектируемых систем, т.к. абсолютные и относительные значения показателя конфликтности могут быть определены, как только будет структурирован состав элементов системы (обрабатывающих процессов, ресурсов) и уточнены параметры основных потоков запросов к ним.

Предложенный показатель нового системного свойства: внутренней конфликтности – может быть использован для сравнительного анализа качества нескольких вариантов проектируемой системы (при прочих равных характеристиках большим качеством будет обладать вариант, имеющий меньшее значение относительного показателя внутренней конфликтности).

Динамика изменения измеряемых непосредственно в процессе функционирования системы значений $P_{KФ<N>} = \langle P_{KФ_1}, P_{KФ_2}, \dots, P_{KФ_N} \rangle$ помогает отслеживать последствия работ по модернизации составных элементов системы на всем интервале ее эксплуатации. Отклонения значений от «нормы» (трансформация закона распределения измеренных случайных величин) может служить признаком наличия скрытого вредоносного воздействия на систему.

Описанный выше подход к анализу внутренней конфликтности систем, представляющих цифровые модели объектов (или их отдельных элементов) предоставляет соответствующим должностным лицам объективный инструмент для обоснованного принятия решений о текущем состоянии технической системы, потенциале совершенствования, а также о возможных последствиях внесения изменений в рамках ее модернизации (работы по оптимизации параметров функционирования должны быть направлены на снижение показателя внутренней конфликтности системы, как важной характеристики, во многом обуславливающей другие эксплуатационные свойства).

Решение данной задачи при некоторых начальных условиях подробно изложено в работе [11].

3-2.: Оценка величины остаточного ресурса реального (физического) объекта по его «цифровому двойнику».

Оценка остаточного ресурса элемента в составе технической системы, как представляется, может основываться на принципиальном подходе, предложенном Н. М. Седякиным [8]: «Надежность элемента (системы) зависит от величины выработанного им (ей) ресурса в прошлом и не зависит от того, как выработан ресурс». Этот принцип получил универсальную формулировку в виде закона, предложенного Х. Л. Смолицким [9] в дифференциальной форме: «Скорость изменения ресурса в момент, когда выработан ресурс, равна интенсивности отказов в этот момент».

На Рис. 7 приведены графики зависимостей интенсивностей отказов $\lambda(t)$ двух «одинаковых» устройств на интервалах их жизненных циклов $[0, T_1]$ и $[0, T_2]$, соответственно, находящихся в условиях эксплуатации (нагрузки) ε_1 (форсированных испытаний) и ε_2 (штатной эксплуатации, в соответствии с техническими условиями).

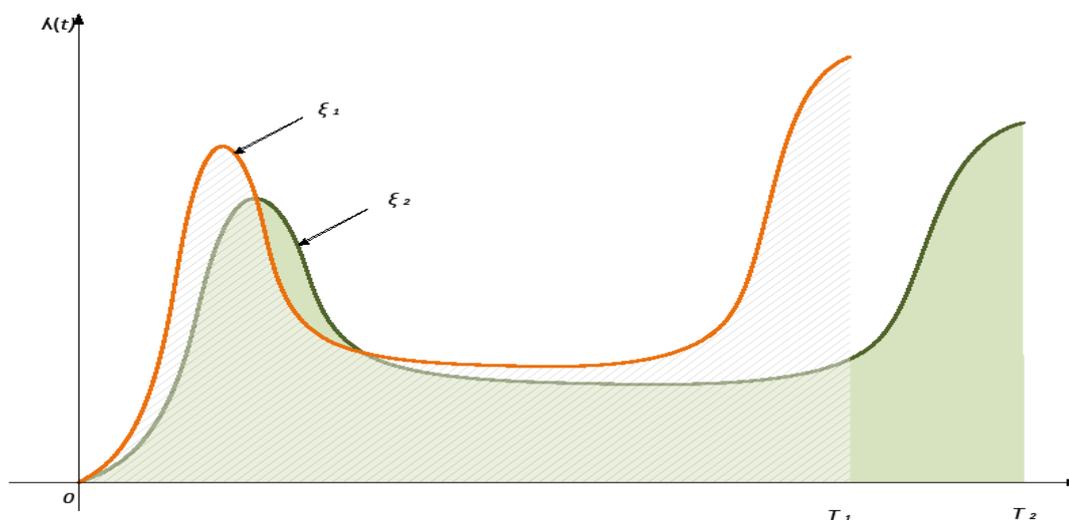


Рис. 7 – Примерный вид зависимостей интенсивности отказов от величины нагрузки и времени

Можно предположить, что в условиях форсированных испытаний (на Рис. 7 – в условиях ε_1), нам экспериментально известны значения T_1 , а также площадь под данной кривой, соответствующая расходу имеющегося ресурса в данном режиме эксплуатации.

Тогда искомые характеристики для режима ε_2 могут быть найдены решением уравнения вида:

$$\int_0^{T_1(\varepsilon_1)} \lambda(t, \varepsilon_1) dt = \int_0^{T_2(\varepsilon_2)} \lambda(t, \varepsilon_2) dt \quad (9)$$

Представленные подходы к решению задач 3-1 и 3-2 могут быть в дальнейшем уточнены на основе результатов работ [2, 3, 4].

3-3.: Анализ уязвимостей и аномалий функционирования реального (физического) прототипа по его «цифровому двойнику».

Решение данной задачи основывается на представлении концептуальной модели предметной области (КМПО) в виде n-мерных диаграмм Г. Ф. Вороного (на Рис. 8 – справа снизу), обеспечивающих разбиение метрического пространства на сегменты таким образом, что каждому объекту (доминанту) однозначно соответствует область пространства, образованная точками, которые находятся «ближе» (по заданной мере) к этому объекту, чем к любому другому (Рис. 8).

Мерой аномалии, в данной интерпретации, может выступать изменение координат доминантной точки и площади (объема) принадлежащего ей сегмента в построенной n-мерной конструкции, по отношению ко всем сопредельным (возможно – остальным) элементам диаграммы Вороного.

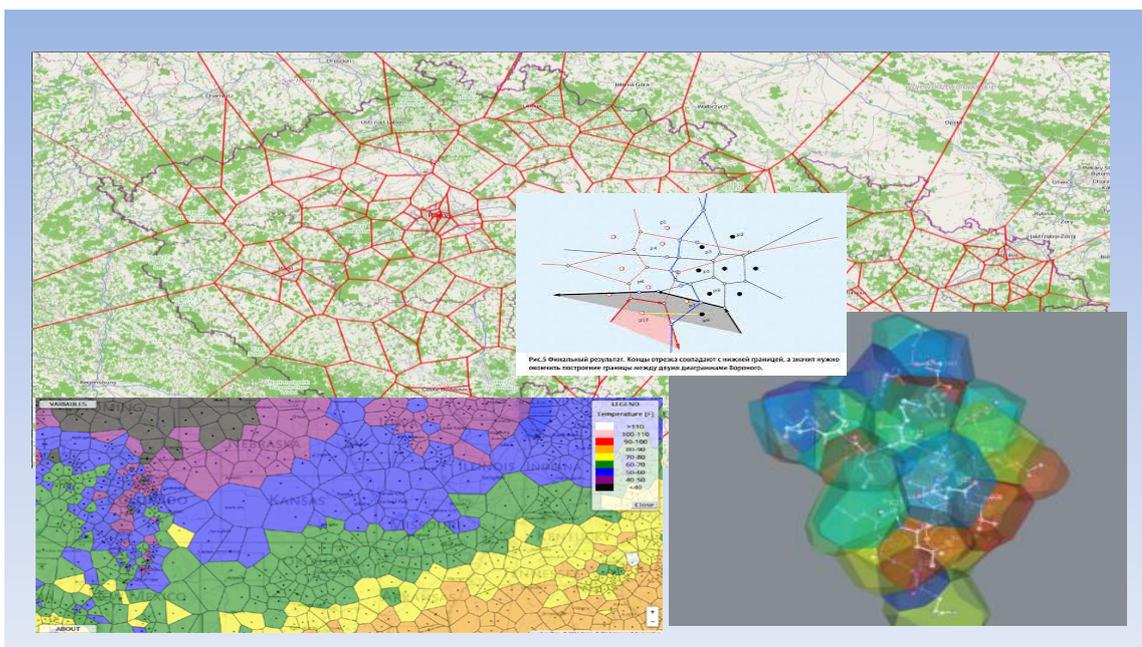


Рис. 8 – Применение диаграмм Вороного для представления двумерных и n-мерных (справа внизу) элементов-сущностей

3-4.: Предиктивный анализ поведения реального (физического) прототипа на основе темпоральной модели «цифрового двойника».

Данную задачу предлагается решать посредством применения многомерной темпоральной СУБД (СУБД_{МТ}) «SLON». Доступ к функциям (сервисам) хранения СУБД_{МТ} «SLON» обеспечивается посредством темпорального расширения SQL-интерфейса и рекурсивных обращений к объектам КМПО – «цифровым двойникам» Банка данных вторичной информации ИХИ [2].

Справка: Реализация проекта по созданию многомерной темпоральной СУБД_{МТ} «SLON» велась группой разработчиков «Communication & Data Base Working Group – 12» (CWG-12) под общим руководством К. Б. Здирука в период с 1996 г. по 2013 г. На основе разработанного ядра СУБД_{МТ} «SLON» в этот период, а также в период с 2014 г. по 2016 г. выполнено значительное количество – более 120 000 инсталляций прикладных систем (ИБК «Юпитер», СЭД «БюрократЪ», ИП «Капитан» и др.), в которых функции распределенного хранения данных в гетерогенной вычислительной среде реализуются средствами данного продукта. Научно-методическая и практическая основа для создания СУБД_{МТ} «SLON» была заложена усилиями Е. Е. Попова, Н. Н. Чернобривенко и В. И. Морозова в период с 1984 г. по 1996 г. в рамках реализации ряда специальных проектов.

Применение СУБД_{МТ} «SLON» позволяет решать задачи по логической консолидации физически распределенных информационных сегментов ИХИ и доступу к различным временным срезам (поколениям) данных с использованием конструкций языка запросов SQL-92, содержащих синтаксические расширения для поддержки темпоральных запросов, относящихся к моментам времени, произвольно расположенным на временной оси (в прошлом, настоящем и будущем). Лежащая в основе СУБД_{МТ} «SLON» уникальная темпорально-многомерная модель данных обеспечивает возможность выполнения на множестве одних и тех же баз данных как традиционных OLTP-запросов (on-line transaction

processing), так и проведения многомерного OLAP-анализа (on-line analilic processing) накопленных в процессе работы временных срезов данных в системах поддержки принятия решений.

Программная реализация ядра СУБДмт «SLON» основывается на оригинальных отечественных решениях и, при этом, не содержит заимствованных фрагментов программного кода других производителей.

Многомерное хранилище данных, реализуемое средствами СУБДмт «SLON», выполнено по поликубической схеме и, при этом, обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными реляционными системами хранения. К ним, в частности, относятся:

- объекты (экземпляры сущностей) в многомерных БД «SLON» можно хранить целиком – со всеми атрибутами, не раскладывая их по отдельным таблицам посредством применения процедур нормализации;
- оперативность обработки запросов в многомерных БД «SLON» практически не зависит ни от объемов хранимых данных, ни от количества заданных в запросе параметров (критериев отбора по различным измерениям);
- компактность хранения многомерных индексов в БД «SLON», что обеспечивает удельную составляющую индексной части не более 2-3 % от общего объема данных.

Как указывалось выше, важнейшей особенностью СУБДмт «SLON» является поддержка темпоральной модели представления и хранения знаний об эволюции сущностей, явлений и процессов, представленных в рекурсивно связанных объектах многомерной базы данных ИХИ. Время, в этом случае, является первичным (т. н. модельным) атрибутом, позволяющим, строить средствами СУБДмт «SLON» информационные системы, содержащие как, собственно, актуальные данные об объектах предметной области, полученные путем непосредственных измерений (наблюдений) в реальном мире, так и их модельное представление, отражающее динамику предметной области – изменение ее состояния в различные моменты времени: в прошлом, настоящем и будущем (Рис. 9).

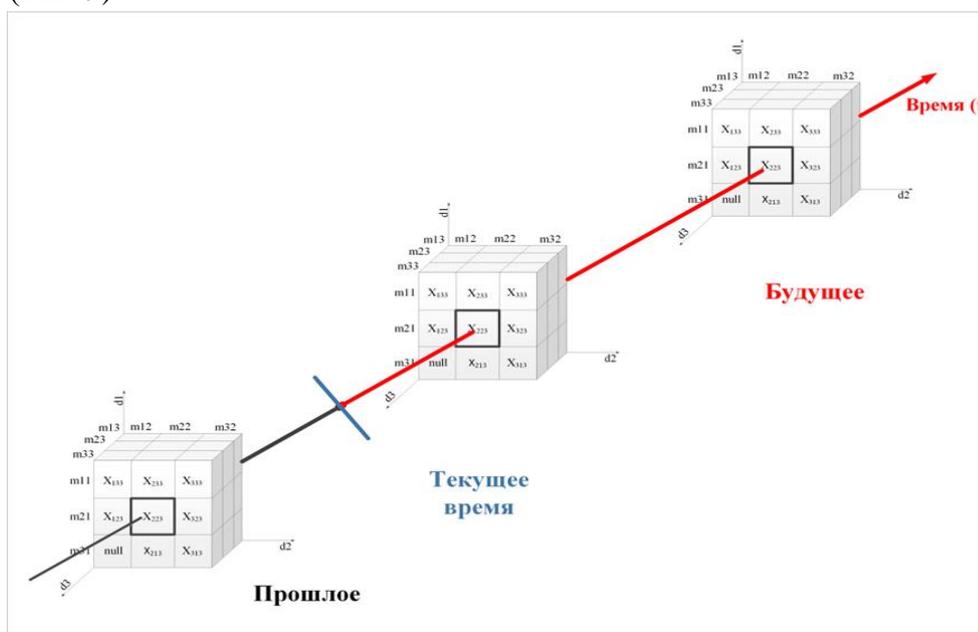


Рис. 9 – Многомерное темпоральное представление данных, реализованное средствами СУБДМТ «SLON»

СУБДмт «SLON» обеспечивает хранение полной исторической информации об эволюции объектов предметной области: для любого объекта, который был создан в момент времени T_1 и закончил свое существование в момент времени T_2 , в темпоральной базе данных сохраняются все его состояния (снимки) на интервале $[T_1, T_2]$. Вся совокупность накопленных данных обладает общим свойством – темпоральностью, которое обеспечивается наличием у каждого хранимого элемента набора временных меток, а также встроенными в состав ядра СУБДмт «SLON» правилами их интерпретации в процессе выполнения запросов.

Подробное описание функциональных возможностей СУБДмт «SLON» приведено в эксплуатационной документации на включающее изделие – «Службу защищенного темпорального хранения данных SLON» в составе продукта «Инструментальный комплект средств интеграции (ИКСИ)» – БИГЕ.466451.099-03 (вариант исполнения: с поддержкой DT-интерфейсов).

Заключение

В настоящей статье предложены подходы к решению задач цифровой трансформации производственных процессов на основе применения «цифровых двойников», как одного из элементов достижения заданных параметров эффективности целенаправленных процессов, формально представленных как перевод объекта управления из текущего состояния в предпочтительное в условиях действующих ограничений. Обоснованность выбора управляющего воздействия из множества допустимых решений в каждой конкретной ситуации во многом определяется наличием в распоряжении лица, принимающего решение, средств сбора достоверной информации об объекте управления и формирования комплексной оценки его состояния в заданный момент времени (в прошлом, настоящем, будущем) на всем интервале жизненного цикла системы. Для этого, как представляется, могут применяться предложенные в работе показатели уровня внутренней конфликтности системы, потенциала ее модернизации и остаточного ресурса. Поскольку анализ поведения реального (физического) прототипа на основе темпоральной модели «цифрового двойника» предполагает сбор и накопление всей доступной совокупности исторических данных о нем, крайне важно иметь специализированные программные средства обработки «больших данных», поддерживающие многомерную темпоральную модель организации интегрированных хранилищ информации.

Дальнейшее развитие и конкретизации теоретических положений данной статьи содержится в работах [2, 3, 4].

Благодарности

Авторы выражают признательность Е. Е. Попову за методическую помощь при формировании единого общесистемного подхода к решению задач, изложенных в представленной статье.

Список источников

1. Top 10 Strategic Technology Trends for 2019 [Электронный ресурс] // Gartner, Inc. URL:<https://www.gartner.com/doc/3891569?srcId=1-3931087981> (дата обращения 02.12.2018).
2. Здирук К. Б., Гречанюк Ф. А., Толпыгин А. С. Синтез цифровых двойников промышленных объектов с применением многоаспектной рекурсивной декомпозиции [Электронный ресурс] // Экстремальные технологии и системы URL: <https://www.extansy.com/> (дата обращения 12.01.2019).
3. Здирук К. Б., Гречанюк Ф. А., Толпыгин А. С. 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 12.02.2019).
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. Боргест Н. М. Научный базис онтологии проектирования / Н. М. Боргест // Онтология проектирования. - №1(7)б 2013. –с.7-25.
6. Труфанов С. Н. Грамматика разума - Самара.: Гегель-фонд, 2003. – 624 с.
7. 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).
8. Седакин Н. М. Об одном физическом принципе теории надежности. Изв. АН СССР. Техническая кибернетика №3. 1966. С. 80-87.
9. Смолицкий Х. Л. Об одной количественной характеристике надёжности. - Радиотехника, 1960, т.15, №8. - 7 с.
10. Здирук К. Б. Оценка автоматизированных систем сбора и обработки данных на основе показателя внутренней конфликтности / К. Б. Здирук, В. А. Минаев, А. В. Мазин, Е. В. Поддубная // Вопросы радиоэлектроники – 2017. - №11.- С.29-34.
11. Минаев В. А., Мазин А. В., Здирук К. Б., Поддубная Е. В. Моделирование внутренних конфликтов автоматизированных систем сбора и обработки данных. Радиопромышленность. 2018;(1):118-123.