

Цифровой двойник человека как элемент социо-киберфизической системы**В. Я. Ананьева¹, А. И. Водяхо^{1✉}, Н. А. Жукова², В. В. Цехановский¹**¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия² Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

✉ aivodyaho@mail.ru

Аннотация. Предметом рассмотрения в настоящей статье служат принципы построения социо-киберфизических систем, использующих цифровые двойники человека. Приводится эталонная архитектура такой системы, созданной на базе цифровых двойников (ЦД), а также обобщенная структура цифрового двойника человека (ЦДЧ). Рассматривается использование ЦДЧ в процессе обучения студентов, предлагается подход к проектированию системы поддержки процесса создания и мониторинга образовательного контента, а также модель учебного процесса, ключевым элементом которой является модель студента. Модель обучаемого и преподавателя предлагается рассматривать как компетентностные модели.

Ключевые слова: киберфизическая система, цифровой двойник, цифровой двойник человека, система поддержки процесса создания и мониторинга образовательного контента, система систем, принципы построения социо-киберфизических систем

Для цитирования: Цифровой двойник человека как элемент социо-киберфизической системы / В. Я. Ананьева, А. И. Водяхо, Н. А. Жукова, В. В. Цехановский // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 5. С. 21–32. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-5-21-32.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Digital Twin of Human as an Element of Socio-Cyberphysical System**V. Ya. Ananeva¹, A. I. Vodyaho^{1✉}, N. A. Zhukova², V. V. Tsekhanovsky¹**¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia² SPIIRAS of St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

✉ aivodyaho@mail.ru

Abstract. The subject of consideration in this article is the principles of building socio-cyberphysical systems using human digital twins. The reference architecture of the socio-cyberphysical system is created on the basis of digital twins, as well as the generalized structure of the human digital twin, is presented. The use of human digital twins in training students process is considered, the approach for designing the system of supporting the process of developing and tracking educational content, the model of the educational process, the key element of which is the student model, are proposed. The student's and the teacher's models are proposed to be considered as competence models.

Keywords: cyberphysical system, digital twin, human digital twin, system of supporting the process of creating and monitoring educational content, system of systems, principles of building socio-cyberphysical systems

For citation: Digital Twin of Human as an Element of Socio-cyberphysical System / V. Ya. Ananeva, A. I. Vod-yaho, N. A. Zhukova, V. V. Tsekhanovsky // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 5. P. 21–32. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-5-21-32.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. Современный этап развития общества характеризуется быстрым развитием техники и технологий. При этом успехи в таких областях, как микроэлектроника, телекоммуникации и программная инженерия, выступают в качестве одной из основных движущих сил прогресса. При этом уже в настоящее время в данных областях накоплен большой задел, в частности технологический – в области микроэлектроники и программной инженерии, создана развитая инфокоммуникационная инфраструктура. Эти достижения, в свою очередь, открывают перспективы для широкого практического применения разного рода крупномасштабных интеллектуальных систем различного назначения, в частности киберфизических (КФС) и социо-киберфизических (СКФС) систем [1], [2]. Создание крупных СКФС, в частности построенных по принципу системы систем (СС) [3], – серьезный вызов, стоящий на пути дальнейшего развития системотехники.

Типовым решением, используемым при построении КФС, служит применение цифровых двойников (ЦД) [4]–[8]. В настоящее время ЦД можно считать достаточно зрелой и широко используемой технологией. Однако это утверждение можно считать справедливым только по отношению к ЦД, используемым в КФС, но не к ЦД человека (ЦДЧ), которые могут быть использованы в составе СКФС. Очевидно, что в обозримом будущем о создании достаточно полного двойника человека речь не идет, но представляется возможным говорить о некоторых упрощенных моделях, которые уже давно и достаточно активно используются в различных областях. Причем это не обязательно модели, используемые в системах искусственного интеллекта (ИИ), а, скорее, использование ИИ при построении ЦД.

Ключевые понятия и определения. К сожалению, терминологию, используемую применительно к ЦД, нельзя назвать устоявшейся, хотя данному вопросу посвящено много внимания в многочисленных обзорных статьях [4]–[6] и монографиях [2], [7], [8]. Этот феномен можно объяснить сложностью самого понятия ЦД, что, в

первую очередь, относится к ЦДЧ. В настоящей статье термины, относящиеся к данной тематике, определяются следующим образом.

Кибернетическая система – это упорядоченная совокупность объектов (элементов системы), которые взаимосвязаны и взаимодействуют между собой. Они могут воспринимать, запоминать и обрабатывать информацию, а также ею обмениваться.

Киберфизическая система – это комплексная система из вычислительных и физических элементов, которая постоянно получает данные из окружающей среды и использует их для дальнейшей оптимизации процессов управления. КФС – это подкласс кибернетических систем.

Социо-киберфизическая система – КФС, состоящая из различных искусственных подсистем, природных объектов и управляющих контроллеров как единого целого. «Социо» означает добавление в данную систему человека и общества.

Цифровой двойник, используемый в качестве элемента КФС или СКФС, можно определить как цифровое представление некоторой сущности, которое формируется в интересах конкретной заинтересованной стороны. Это представление может включать в себя атрибуты моделируемой сущности и информацию о ее поведении. Понятие ЦД может относиться как к отдельному экземпляру моделируемой сущности, так и к классу моделируемых сущностей. ЦД можно рассматривать как частный случай модели (подкласс класса моделей), т. е. ЦД можно определить как модель специального вида.

Понятие ЦД – это многоаспектное понятие, а сам ЦД можно рассматривать как одну или несколько архитектурных точек зрения [9].

Можно выделить следующие точки зрения на ЦД:

1) это программный компонент, инкапсулирующий модель или комплекс моделей некоторой существующей либо еще или уже не существующей социо-киберфизической системы. Это может быть применено и к ЦДЧ;

2) частная модель некоторой наблюдаемой сущности, в частности человека;

3) программный компонент, инкапсулирующий модель или комплекс моделей некоторого класса сущностей, в частности группы людей;

4) контроллер, имитирующий поведение человека;

5) программный компонент, обеспечивающий формирование некоторого представления (видения) наблюдаемой и управляемой СКФС, которое формируется в интересах определенной заинтересованной стороны, в качестве которой может выступать и человек;

6) элемент архитектурного стиля, предполагающий использование паттернов типа ЦД и ЦДЧ.

Цифровая тень. Данный термин используется реже по сравнению с термином ЦД. Иногда под этим термином понимается состояние двойника в конкретный момент, иногда – модель, которая может только наблюдать за состоянием некоторой наблюдаемой системы (НС), но не может ее изменять, иногда цифровой тенью называют некоторый моментальный снимок состояния НС. По

причине неоднозначности этого термина в данной статье он не используется.

Цифровой двойник коллектива (группы) людей (ЦДК) – цифровое представление группы или коллектива людей как элемента СКФС (в качестве элементов ЦДК могут выступать ЦДЧ, но это не обязательно). Понятия ЦД коллектива и коллектив (система) ЦД – это разные понятия.

Следует заметить, что использование ЦД – один из возможных подходов к построению КФС и СКФС.

Оценка современного состояния исследований и разработок в области ЦДЧ и СКФС, использующих ЦДЧ. В настоящее время доступно большое число монографий и обзорных статей [2]–[8], посвященных как вопросам построения КФС, так и ЦДЧ в ЦДК, входящих в их состав. Значительно меньше публикаций посвящено вопросам использования ЦДЧ в составе СКФС. Основываясь на этих публикациях, можно предложить их классификацию, схема которой показана на рис. 1.

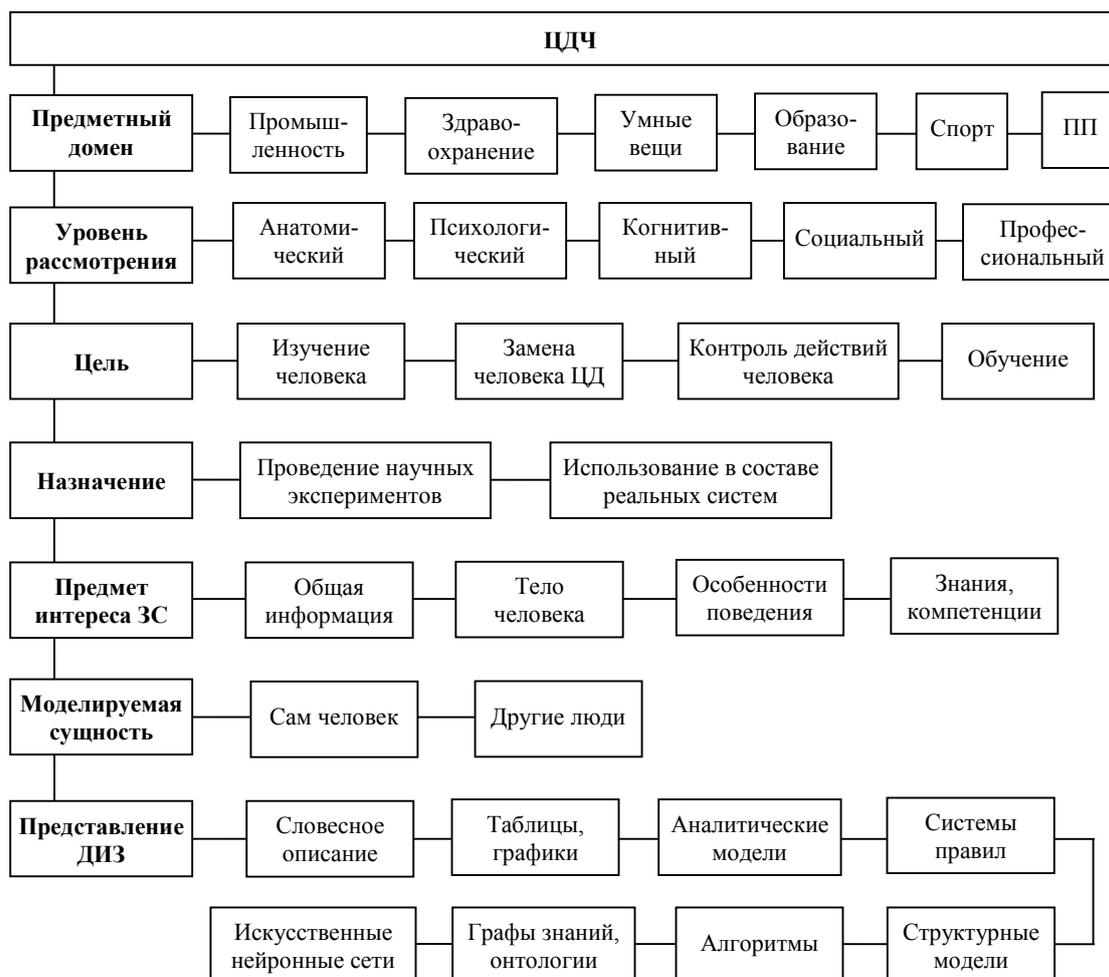


Рис. 1. Классификация ЦДЧ

Fig. 1. DTH classification

ЦДЧ можно классифицировать по следующим основным признакам: предметный домен; цель, для которой создается ЦДЧ; назначение; предмет интереса заинтересованных сторон (ЗС); уровень рассмотрения; моделируемая сущность; способ представления данных, информации и знаний (ДИЗ), используемых для представления ЦДЧ.

В настоящее время ЦДЧ находят применение в таких областях как [5], [7]: промышленность, здравоохранение, умный город, умный дом, транспорт, образование, спорт, персональные помощники (ПП) и др. Следует заметить, что сфера применения ЦДЧ постоянно расширяется. Можно утверждать, что потенциальная сфера применения ЦДЧ практически совпадает со сферой применения традиционных ЦД.

В зависимости от цели создания модель человека может строиться в разных терминах. Можно выделить по крайней мере четыре основных уровня, на которых работают ЦДЧ: анатомический, психологический, когнитивный и социальный.

Целью функционирования ЦДЧ может быть: изучение человека, замена человека автоматом, контроль действий и (или) помощь оператору. Целью применения ЦДЧ также может быть поддержка процесса обучения и создание компетентностной модели.

Назначением ЦДЧ может стать проведение экспериментов, в которых участвует человек в качестве объекта исследования, а также использование человека в качестве элемента реальной системы.

Разные заинтересованные стороны могут иметь разные интересы относительно человека-элемента СКФС. В качестве предмета интереса могут выступать: общая информация о человеке-элементе СКФС, тело и поведение человека, его знания и компетенции.

У каждого человека в голове есть модели самого себя и других людей. Модель человека-элемента СКФС может иметь разные уровни детализации, начиная от самых общих сведений и заканчивая подробностями о деталях.

ДИЗ о человеке-элементе СКФС в ЦДЧ может быть представлена разными способами. Для этого можно использовать словесное описание, реляционные базы данных, графики, таблицы, аналитические модели, системы правил, структурные модели, классические алгоритмы, графы знаний (онтологии), а также нейронные сети и др.

Следует заметить, что приведенная классификация – крайне упрощенная, и отражает, скорее,

только те части реальной модели человека, которые можно отобразить в моделях, служащих частью ЦДЧ.

Проблемы развития СКФС. Среди ключевых проблем построения СКФС – включение в состав системы человека (как элемента СКФС). Эту задачу можно рассматривать как частную по отношению к построению модели человека. Если рассматривать человека в качестве элемента СКФС, то этот элемент обладает свойствами, которыми принципиально не могут обладать антропогенные системы и их элементы. Можно выделить следующие проблемы, которые, по мнению авторов, имеют особое значение при построении СКФС:

– отсутствие полной информации о человеке как элементе СКФС, при этом речь идет как о конкретном экземпляре, так и о классе и отдельных подклассах;

– как элемент СКФС ЦДЧ может быть описан на нескольких уровнях (анатомическом, психологическом, когнитивном и социальном), при этом механизмы трансформации моделей остаются практически неизвестными;

– люди обладают как внешним, так и внутренним «Я», при этом человек может активно препятствовать определению внутреннего «Я», т. е. задача построения реальной модели человека резко усложняется;

– люди могут эффективно обучаться, но механизмы обучения остаются во многом непонятными;

– поведение человека зависит от многих факторов и может быть описано вероятностными моделями;

– модель человека как элемента СКФС – многоуровневая полимодель, причем алгоритмы переходов между уровнями неизвестны (под полимоделью в данном случае понимается система моделей, описывающих сущность с разных точек зрения).

Предмет рассмотрения. Предметом рассмотрения в настоящей статье служат принципы построения СКФС, использующих ЦДЧ.

Использование ЦД – только один из возможных подходов к построению СКФС. В основу развиваемого подхода могут быть положены следующие принципы:

1. Можно считать, что СКФС строятся по принципу системы систем (СС) [3] и могут быть отнесены к классам федеративных, а в ряде случаев и к классу коалиционных систем [3].

2. ЦД и, в частности, ЦДЧ рассматривается как некоторый вспомогательный элемент, который реализует один из возможных подходов к интеграции элементов разной физической природы в СКФС, в частности позволяет заменить неинформационные связи между элементами на информационные или создавать новые информационные связи.

В рамках развиваемого подхода ЦД и, в частности ЦДЧ, рассматриваются как полноценные элементы КФС (СКФС). Каждый элемент СКФС может иметь произвольное число ЦД в зависимости от числа точек зрения на НС.

ЦД можно определить как виртуальный (программный) элемент со специальными свойствами. Этих свойств два: 1) ЦД хранит дискретную модель некоторой другой сущности произвольной природы; 2) состояния ЦД и НС автоматически синхронизируются.

Можно выделить три варианта синхронизации состояний ЦД и НС:

- 1) ЦД наблюдает за состоянием НС и отслеживает состояние НС;
- 2) ЦД управляет состоянием НС;

3) ЦД может наблюдать и управлять состоянием НС. Если состояния не синхронизируются, то речь идет не о ЦД, а о модели. В этом контексте можно говорить о ЦД как о модели со специальными свойствами.

Класс ЦДЧ можно рассматривать как подкласс класса ЦД. На рис. 2 показаны подклассы класса ЦД, которые наиболее часто встречаются в качестве элементов СКФС.

Эталонная архитектура СКФС, созданной на базе ЦД. В самом общем виде СКФС можно представить как многоуровневую систему, построенную по принципу системы систем, реализующую парадигму интернета вещей.

Обобщенная структура СКФС – это многоуровневая структура, которая в зависимости от сложности может иметь от трех до шести уровней [10]. Следует иметь в виду, что поскольку СКФС строится по принципу системы систем, то каждая из вложенных имеет собственную организацию.

Обобщенная структура СКФС для верхнего уровня показана на рис. 3, где символ ⊗ обозначает заинтересованное лицо (stakeholder), ФС – фи-

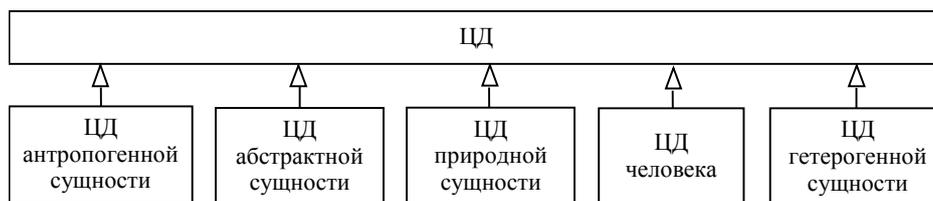


Рис. 2. Таксономия ЦД
Fig. 2. DT taxonomy

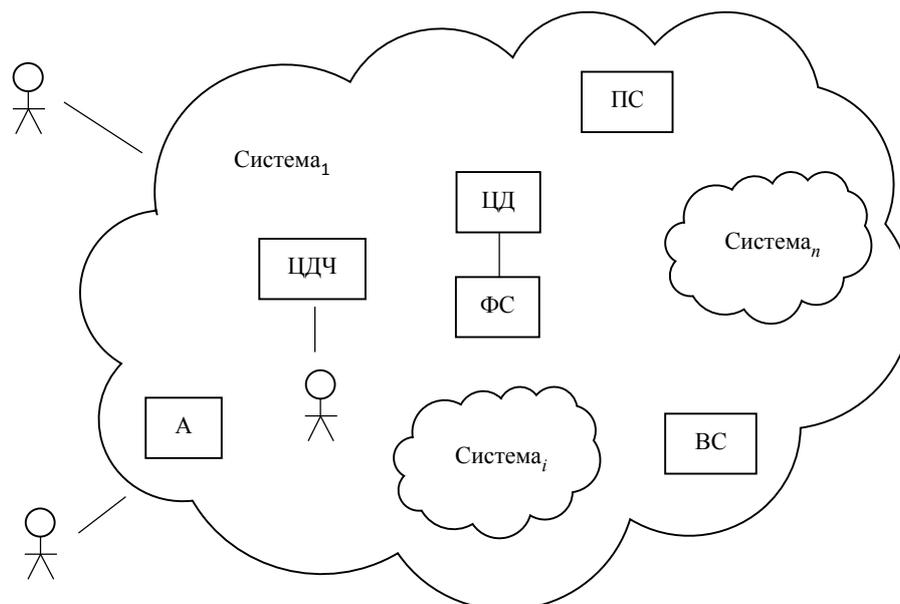


Рис. 3. ЦД как элемент СКФС (идеализированная модель)
Fig. 3. DT as SCPS element (idealized model)

зическая сущность, ВС – виртуальная сущность, ПС – природная сущность, А – агент. В данном случае под агентом понимается ЦД, имеющий слабую связь с хозяином. Агент может, например, управляться своим хозяином в терминах целей. При этом механизмы синхронизации не используются.

Одной и той же НС может соответствовать произвольное число ЦД, которые строятся исходя из интересов заинтересованных сторон. Основным назначением ЦД служит формирование требуемого цифрового представления некоторого элемента СКФС или всей СКФС.

Практически во всех случаях СКФС строится по принципу интернета вещей и представляет собой многоуровневую систему, которая может содержать от трех до пяти уровней [10].

Каждый человек может быть представлен своим ЦДЧ, который, в свою очередь, может также быть представлен ЦДЧ, который сам можно рассматривать как одну из систем, входящих в состав системы систем. Основным доводом в пользу рассмотрения человека в качестве элемента СС можно считать отсутствие полных знаний о человеке, и более того, человек может скрывать знания о себе.

Цифровой двойник человека как элемент СКФС. Можно определить следующие особенности сущностей, принадлежащих классу ЦДЧ: высокая сложность, отсутствие полного знания об объекте наблюдения (человеке) и даже отсутствие теоретической возможности его получить, способность к обучению и способность получать ДИЗ из внешних источников.

Обобщенная структура ЦДЧ показана на рис. 4.

В самом общем виде ЦДЧ может быть представлен в виде репозитория моделей (РМ), процессора моделей (ПМ) и процессора формирования действий (ПФД). Процессор моделей отвеча-

ет за поддержание модели НС, в качестве которой выступает человек в актуальном состоянии. Модель НС, т. е. человека, хранится в репозитории моделей. Модель человека в общем случае представляет собой многоуровневую полимодель [11], которую можно определить как множество частных моделей, относящихся к разным уровням (анатомический, психологический, когнитивный, социальный, профессиональный), а также к механизмам трансформации моделей. Для каждого конкретного уровня ЦДЧ можно определить:

$$HDTM = \langle AS, AM, SHC, AMC, \Delta T \rangle,$$

где HDTM – модель ЦДЧ; AS – наблюдаемая сущность (человек); AM – модель наблюдаемой сущности, SHC – интересы заинтересованных сторон; AMC – механизмы взаимодействия (коммуникации) между А и AM; ΔT – временной интервал, к которому принадлежит ЦДЧ. На верхних уровнях (социальный, профессиональный) каждому человеку в каждый конкретный момент времени можно поставить в соответствие две модели: внутреннюю и внешнюю, которые соответствуют внутреннему и внешнему «Я» соответственно. К моделям верхнего уровня можно отнести контекстные модели, которые описывают конкретные ситуации и правила поведения в них.

Процессор моделей отвечает за построение и поддержание моделей в актуальном состоянии. Процессор формирования действий отвечает за общение с внешним миром, в частности за обработку информации от внешнего мира и формирование реакций.

Описанная модель ЦДЧ носит самый общий характер и может быть уточнена для различных уровней. Построить полную модель человека на сегодняшний день вряд ли возможно, если вообще возможно. Тем не менее, создание полезных с точки зрения практики частных моделей, которые

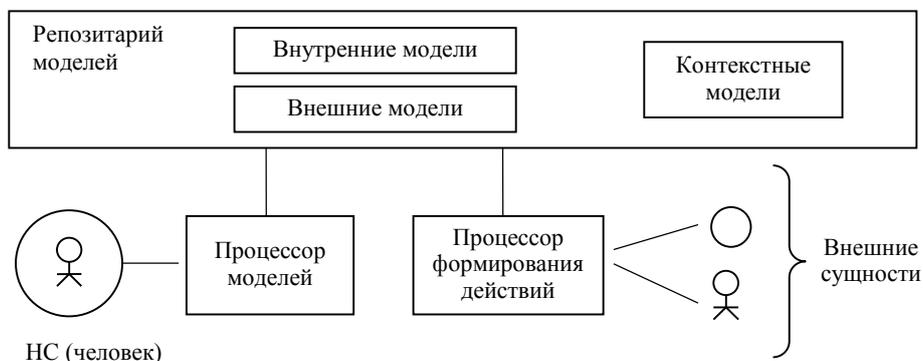


Рис. 4. Обобщенная структура ЦДЧ
Fig. 4. DTH generalized structure

учитывают интересы конкретных заинтересованных сторон на различных уровнях, вполне осуществимо.

Пример. ЦД студента технического вуза. Рассмотрим в качестве примера использование ЦДЧ в составе информационной системы поддержки учебного процесса технических вузов. В данном случае речь идет об использовании ЦДЧ в составе такой системы при подготовке специалистов в области информационных технологий. Данный пример интересен тем, что именно способность к обучению – это одно из принципиальных отличий человека, причем речь не идет о таких относительно простых механизмах, как машинное обучение [12].

Принципиально к решению данной проблемы могут быть привлечены аналитики, которые должны проверять актуальность и целостность образовательной программы на всех этапах ее жизненного цикла. В качестве аналитиков могут выступать руководители образовательных программ, которые чаще всего и есть их разработчики. Однако применительно к ИТ-отрасли, которая характеризуется очень высокой динамикой развития, возникает необходимость поддержания образовательного контента в актуальном и целостном состоянии. Проблема усложняется тем, что в реализации программы могут принимать участие преподаватели разных кафедр и представители промышленности, которые выступают в роли заказчиков. Задача становится еще более сложной, если необходимо поддерживать индивидуальные образовательные траектории.

В этом контексте появляются следующие частные задачи:

- 1) формирование в автоматическом или полуполупри автоматическом режиме набора образовательных модулей с учетом существующих ограничений, которые налагает учебный план;
- 2) проверка образовательного модуля на полноту и целостность;
- 3) возможность проверки образовательной программы на соответствие требованиям заинтересованных сторон;
- 4) возможность оперативного внесения изменения в образовательный контент при изменении интересов одной или нескольких заинтересованных сторон или появлении новых заинтересованных сторон. Проверка на полноту предполагает проверку того факта, что все требования заказчика, в качестве которого могут выступать как потенциальные работодатели, так и требования со

стороны других модулей, а также со стороны образовательного стандарта, выполнены.

Еще одна проблема, стоящая на пути совершенствования учебного процесса в сфере подготовки специалистов и, в частности, ИТ-специалистов, – это формирование и поддержание в актуальном и целостном состоянии индивидуальных образовательных траекторий.

В основу подхода к построению образовательных программ для подготовки ИТ-специалистов может быть положен архитектурный подход к построению систем управления образовательным контентом, предполагающий использование следующих принципов:

- 1) университет, реализующий подготовку ИТ-специалистов, рассматривается как СКФС;
- 2) реализация образовательной программы рассматривается как один из динамических бизнес-процессов (БП), реализуемых в рамках некоторой СКФС, в качестве которой может выступать университет;
- 3) университет рассматривается как элемент СКФС более высокого уровня, в качестве которого выступает общество;
- 4) студенты и преподаватели в качестве элементов СКФС уровней университета и отдельной программы представлены своими ЦД.

Модель учебного процесса. Учебный процесс может быть представлен полимоделью, которая включает в себя набор связанных между собой частных моделей:

$$EPM = \{EBP, CF, VF, STM, TM\},$$

где EBP – образовательный БП; CF – поток компетенций, VF – поток компетенций, STM – модель студента, TM – модель преподавателя.

Образовательный БП предлагается представлять с помощью графа потока работ, что позволяет упорядочить процесс по времени. Вершинам EBP ставятся в соответствие некоторые курсы или элементы курсов. Дугам соответствуют взаимосвязи между отдельными элементами.

Поток накопления компетенций описывает процесс формирования компетенций. Этот процесс может быть описан в терминах машины состояний, т. е. конечного автомата. Следует заметить, процесс накопления компетенций во многом схож с используемым в производственных системах понятием потока стоимости.

Ключевой элемент рассматриваемой полимодели – это модель студента STM, содержащая набор компетенций, которыми владеет обучаемый, модель преподавателя также можно рас-

смаивать как компетентностную модель, в которой имеется дополнительный уровень компетентности. Компетентностные модели студента и преподавателя можно представить в виде ЦДЧ, что позволит накапливать знания о компетенциях студента, облегчит процесс обмена информацией между университетом и работодателями, упростит подбор исполнителей для выполнения того или иного проекта.

Компетентностная модель отображает процесс получения и накопления компетенций. Данный процесс можно представить в виде автомата, описывающего переходы между компетентностными состояниями обучающегося. Компетентностная модель основывается на понятиях компетенции, компетентностное состояние и переходов между компетентностными состояниями.

В настоящее время существует множество интерпретаций термина «компетентность», используемых психологами, педагогами, разного рода тренерами и другими специалистами в области обучения. Под компетенцией обычно понимают множество различных понятий, принадлежащих разным областям знаний.

Применительно к рассматриваемым моделям компетентности можно использовать таксономию Блума, в рамках которой предлагается выделять следующие уровни учебных целей: 1) знание; 2) понимание; 3) применение; 4) анализ; 5) синтез; 6) оценка. Данная таксономия позволяет определить уровни знаний, что может быть полезно при работе с итерационными моделями обучения. Следует заметить, что в ряде случаев можно использовать более простую классическую модель «знать–уметь–иметь представление». Однако эта модель представляется слишком грубой.

Компетентностное состояние можно определить как набор компетенций, которыми обладает обучаемый. Переход в новое компетентностное состояние имеет место после завершения изучения модуля (курса, программы). Данный процесс можно описать с помощью модели состояний. В этом случае система переходит в новое состояние при появлении информации о некотором событии, например о сдаче теста.

Компетентностное состояние может изменяться одним из четырех способов:

- 1) компетенция остается без изменений;
- 2) появляется новая компетенция;
- 3) компетенция переходит на новый более высокий уровень;
- 4) на основе уже полученных ранее и новых компетенций формируется компетенция более высокого уровня.

Компетентностное состояние хранится в форме атрибутов, компетентностная модель может быть представлена как автоматная модель.

Для описания компетентностного состояния можно использовать графы знаний [14], [15].

Модель потребителя образовательного ресурса: $CNSM = \langle PDKG \rangle$, где PDKG определяется как подграф доменного графа знаний, который может быть использован для составления списка требований. При этом возникает проблема определения степени близости графов. Это достаточно хорошо известная задача, варианты решения которой можно найти, например, в [16].

Модель образовательного контекста может быть представлена различными способами – например, ее можно представить с помощью онтологии, rdf-графа знаний [15] или графа потока работ [17]. Модель образовательных ресурсов можно определить следующим образом: $ERSM = \langle EM, LNK \rangle$, где EM – образовательные модули, а LNK – связи между модулями. Траекторию $CurM$ можно представить как граф потока работ.

Модель предметной области может быть представлена в виде доменной онтологии [18]. Однако в настоящее время найти подобные онтологии достаточно сложно. Однако такие онтологии могут быть построены на базе профессиональных стандартов.

В качестве потребителя специалистов может выступать как компания (организация), где планирует работать или уже работает обучаемый, так и образовательная программа следующего уровня.

Модель требований, предъявляемых к обучаемому, может быть сформулирована на основе корпоративного графа знаний [15], с учетом роли потенциального сотрудника в организации.

Структура системы, которая позволяет формировать индивидуальные образовательные траектории, представлена на рис. 5. Система включает в себя 4 компонента: репозиторий для хранения доменных онтологий и других моделей – моделей образовательных модулей (программ), моделей образовательных ресурсов, компетентностных состояний обучаемых и преподавателей, типовые образовательные траектории. В состав системы входят еще 3 модуля (процессора): процессор формирования доменных онтологий (ПФДО), процессор формирования образовательных программ (ПФОП), а также процессор компетенций.

Решение задачи построения индивидуальной образовательной траектории предполагает решение собственно задачи построения образователь-



Рис. 5. Система формирования индивидуальных образовательных траекторий
 Fig. 5. Individual educational trajectories formation system

ной программы и назначение образовательных ресурсов и построение БП, реализующего данную образовательную программу.

Первая задача более сложна, поскольку для ее решения требуется выполнить поиск и слияние информации из различных источников. Следует иметь в виду, что подобный тип слияния информации достаточно часто используется в рамках СКФС.

Практическая реализация рассмотренной системы, которая по сути своей – одна из подсистем управления образовательной организацией, не должна вызывать проблем, так как отсутствуют жесткие требования времени отклика.

В рассмотренном примере используется достаточно простая модель обучаемого (студента), входящая в состав ЦД. Описанная модель – сильно упрощенная. Реальные модели могут быть более сложными. В частности, крайне желательна возможность учитывать личностные качества студента – личные предпочтения обучаемого, его способность к обучению по конкретным направлениям, лидерские качества обучаемого, способность обучаемого взаимодействовать с другими студентами и т. п. В рамках предлагаемого подхода компетентностные модели рассматриваются как полимодели, что позволяет добавлять новые и заменять старые более совершенными или доменно-ориентированными моделями.

Заключение. ЦДЧ можно применять для различных целей, в частности, для изучения человека,

замены человека автоматом, помощи оператору. Также ЦДЧ может быть использован для поддержки процесса обучения и создания компетентностной модели. Основная проблема, связанная с построением ЦДЧ, – это ограниченность знания о самом человеке. В настоящее время во многих отраслях науки ведутся интенсивные работы в этом направлении, в частности в рамках исследований в области искусственного интеллекта.

СКФС можно рассматривать как многоуровневые системы, построенные по принципу системы систем. В статье предложен подход к построению СКФС, где в качестве одного из элементов системы предлагается использовать ЦДЧ. Отсутствие полных знаний о человеке ведет к рассмотрению его в качестве элемента системы систем. Таким образом, ЦДЧ будет состоять из следующих элементов: наблюдаемой сущности (человека), модели наблюдаемой сущности, интересов заинтересованных сторон, механизмов взаимодействия между наблюдаемой сущностью и ее моделью. Также необходимо учитывать временной интервал, к которому принадлежит ЦДЧ.

В качестве примера представлено использование ЦДЧ в составе информационной системы поддержки учебного процесса технических вузов при подготовке специалистов в области информационных технологий. Сформулированы частные задачи, которые нужно решить при проектировании данной системы, для чего необходимо рас-

смотреть учебный процесс. В данной статье приводится модель, а именно полимодель учебного

процесса, ключевой элемент которой – компетентностная модель студента и преподавателя.

Список литературы

1. Calinescu R. C., Camara M. J., Paterson C. Socio-cyber physical systems: Models, opportunities, open challenges // 2019 IEEE/ACM 5th Intern. Workshop on Software Engin. for Smart Cyber-Phys. Syst. (SEsCPS). Montreal, QC, Canada: IEEE, 2019. 6 p.
2. The digital twin of humans. An interdisciplinary concept of digital working environments in industry 4.0 / I. Gräßler, G. W. Maier, E. Steffen, D. Roesmann. Cham, Switzerland: Springer, 2023. 360 p. doi: 10.1007/978-3-031-26104-6.
3. Jamshidi Mo M. System of systems engineering: innovations for the 21st century. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2008. 616 p. doi: 10.1002/9780470403501.
4. A comprehensive review of digital twin – part 1: modeling and twinning enabling technologies / A. Thelen, X. Zhang, O. Fink, Y. Lu, S. Ghosh, B. D. Youn, M. D. Todd, S. Mahadevan, Chao Hu, Zhen Hu // Structural and Multidiscipl. Optimization. 2022. Vol. 65, no. 12. P. 1–75.
5. Barricelli B. R., Casiraghi E., Fogli D. A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 167653–167671. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2953499.
6. Web of digital twins / A. Ricci, A. Croatti, S. Mariani, S. Montagna, M. Picone // ACM Transactions on Internet Technol. 2022. Vol. 22, no. 4. P. 1–30. doi: 10.1145/3507909.
7. Vohra M. Digital twin technology: fundamentals and applications. Beverly, MA: Scrivener Publ., 2023. 273 p.
8. Lv Z., Fersman E. Digital twins: Basics and applications. Cham, Switzerland: Springer, 2022. 125 p. doi: 10.1007/978-3-031-11401-4.
9. Bass L., Clements P., Kazman R. Software architecture in practice. 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Addison-Wesley, 2013. 61 p.
10. Lea P. Internet of Things for architects. Birmingham Mumday, UK: Packt Publ., 2018. 1039 p.
11. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
12. Бринк Х., Ричардс Д., Феверолф М. Машинное обучение. СПб.: Питер, 2017. 336 с.
13. Taxonomy of educational objectives: The classification of educational goals. Handbook 1: Cognitive domain / B. S. Bloom, M. D. Engenhart, E. J. Furst, W. H. Hill, D. R. Krathwohl. NY: Longman, 1956. 207 p.
14. Aggrawal N., Anand A. Social networks: modeling and analysis. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, 2022. 254 p.
15. Blumauer A., Nagy H. The Knowledge graphs cookbook. Recipes that work. 1st ed. Vienna, Austria: Semantic Web Company, 2020. 228 p.
16. Similarity measure of graphs / A. Labriji, S. Charkaoui, I. Abdelbaki, A. Namir, El H. Labriji // Intern. J. of Recent Contributions from Engin., Sci. IT (IJES). 2017. Vol. 5, no. 2. P. 42–56. doi: 10.3991/ijes.v5i2.7251.
17. Russell N., Van der Aalst Wil M. P., Hofstede A. H. M. Workflow pattern: the definitive guide. Cambridge, Massachusetts, USA: MIT Press, 2016. 384 p.
18. Gasevic D., Djuric D., Devedzi V. Model driven architecture and ontology development. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. 312 p. doi: 10.1007/3-540-32182-9.

Информация об авторах

Ананьева Варвара Яновна – аспирант, старший преподаватель кафедры информационных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: varvara.spb99@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0000-2074-5438>

Водяхо Александр Иванович – д-р техн. наук, профессор кафедры информационных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: aivodyaho@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0933-0933>

Жукова Наталия Александровна – д-р техн. наук, вед. науч. сотр. Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук, 14-я линия В. О., 39, Санкт-Петербург, 199178, Россия.

E-mail: nazhukova@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5877-4461>

Цехановский Владислав Владимирович – канд. техн. наук, профессор, зам. зав. кафедрой информационных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: vvcehanovsky@mail.ru

Вклад авторов:

Ананьева В. Я. – оценка современного состояния исследований и разработок в области ЦДЧ и СКФС, использующих ЦДЧ; работа над примером – системой формирования индивидуальных образовательных траекторий, разработка модели учебного процесса.

Водяхо А. И. – формирование предмета рассмотрения статьи, эталонной архитектуры СКФС, созданной на базе ЦД, модели цифрового двойника человека как элемента СКФС.

Жукова Н. А. – формирование проблем развития СКФС; работа над примером – системой формирования индивидуальных образовательных траекторий; разработка модели учебного процесса.

Цехановский В. В. – формирование предмета рассмотрения статьи, эталонной архитектуры СКФС, созданной на базе ЦД, модели цифрового двойника человека как элемента СКФС.

References

1. Calinescu R. C., Camara M. J., Paterson C. Socio-cyber physical systems: Models, opportunities, open challenges // 2019 IEEE/ACM 5th Intern. Workshop on Software Engin. for Smart Cyber-Phys. Syst. (SEsCPS). Montreal, QC, Canada: IEEE, 2019. 6 p.
2. The digital twin of humans. An interdisciplinary concept of digital working environments in industry 4.0 / I. Gräßler, G. W. Maier, E. Steffen, D. Roesmann. Cham, Switzerland: Springer, 2023. 360 p. doi: 10.1007/978-3-031-26104-6.
3. Jamshidi Mo M. System of systems engineering: innovations for the 21st century. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2008. 616 p. doi: 10.1002/9780470403501.
4. A comprehensive review of digital twin – part 1: modeling and twinning enabling technologies / A. Thelen, X. Zhang, O. Fink, Y. Lu, S. Ghosh, B. D. Youn, M. D. Todd, S. Mahadevan, Chao Hu, Zhen Hu // Structural and Multidiscipl. Optimization. 2022. Vol. 65, no. 12. P. 1–75.
5. Barricelli B. R., Casiraghi E., Fogli D. A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications // IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 167653–167671. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2953499.
6. Web of digital twins / A. Ricci, A. Croatti, S. Mariani, S. Montagna, M. Picone // ACM Transactions on Internet Technol. 2022. Vol. 22, no. 4. P. 1–30. doi: 10.1145/3507909.
7. Vohra M. Digital twin technology: fundamentals and applications. Beverly, MA: Scrivener Publ., 2023. 273 p.
8. Lv Z., Fersman E. Digital twins: Basics and applications. Cham, Switzerland: Springer, 2022. 125 p. doi: 10.1007/978-3-031-11401-4.
9. Bass L., Clements P., Kazman R. Software architecture in practice. 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Addison-Wesley, 2013. 61 p.
10. Lea P. Internet of things for architects. Birmingham Mum dai, UK: Packt Publ., 2018. 1039 p.
11. Ohtilev M. Ju., Sokolov B. V., Jusupov R. M. Intel'kual'nye tehnologii monitoringa i upravlenija strukturnoj dinamikoj slozhnyh tehnikeskikh ob#ektov. M.: Nauka, 2006. 410 s. (In Russ.).
12. Brink H., Richards D., Feverolf M. Mashinnoe obuchenie. SPb.: Piter, 2017. 336 s. (In Russ.).
13. Taxonomy of educational objectives: The classification of educational goals. Handbook 1: Cognitive domain / B. S. Bloom, M. D. Engehart, E. J. Furst, W. H. Hill, D. R. Krathwohl. NY: Longman, 1956. 207 p.
14. Aggrawal N., Anand A. Social networks: modeling and analysis. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC, 2022. 254 p.
15. Blumauer A., Nagy H. The knowledge graphs cookbook. Recipes that work. 1st ed. Vienna, Austria: Semantic Web Company, 2020. 228 p.
16. Similarity measure of Graphs / A. Labriji, S. Charkaoui, I. Abdelbaki, A. Namir, El H. Labriji // Intern. J. of Recent Contributions from Engin., Sci. IT (IJES). 2017. Vol. 5, no. 2. P. 42–56. doi: 10.3991/ijes.v5i2.7251.
17. Russell N., Van der Aalst Wil M. P., Hofstede A. H. M. Workflow pattern: the definitive guide. Cambridge, Massachusetts, USA: MIT Press, 2016. 384 p.
18. Gasevic D., Djuric D., Devedzi V. Model driven architecture and ontology development. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006. 312 p. doi: 10.1007/3-540-32182-9.

Information about the authors

Varvara Ya. Ananeva – postgraduate student, Starshiy prepodavatel` of the Department of Information Systems, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: varvara.spb99@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0000-2074-5438>

Aleksandr I. Vodyaho – Dr Sci. (Eng.), Professor of the Department of Information Systems, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: aivodyaho@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-0933-0933>

Natalia A. Zhukova – Dr. Sci. (Eng.), Leading Researcher, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 14st line, 39, Vasilievsky Island, Saint Petersburg, 199178, Russia.

E-mail: nazhukova@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0001-5877-4461>

Vladislav V. Tsekhanovsky – Cand. Sci. (Eng.), Professor, Deputy Head of the Department of Information Systems, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: vvcehanovsky@mail.ru

Author contribution statement:

Ananeva V. Y. – assessment of the current state of research and development in the field of HDT and SCPS based on HDT; work on an example system for the formation of individual educational trajectories, development of a model of the educational process.

Vodyaho A. I. – formation of the subject of the article, the SCPS reference architecture based on DT, the model of the human digital twin as an element of SCPS.

Zhukova N. A. – formation of the SCPS development problems; work on an example system for the formation of individual educational trajectories, development of a model of the educational process.

Tsekhanovsky V. V. – formation of the subject of the article, the SCPS reference architecture based on DT, the model of the human digital twin as an element of SCPS.

Статья поступила в редакцию 28.01.2025; принята к публикации после рецензирования 17.03.2025; опубликована онлайн 26.05.2025.

Submitted 28.01.2025; accepted 17.03.2025; published online 26.05.2025.
